

*Giuliano De Mio*

*Condicionantes geológicos na interpretação de ensaios de piezocone para  
identificação estratigráfica na investigação geotécnica e geoambiental*

Tese apresentada à Escola de  
Engenharia de São Carlos da  
Universidade de São Paulo, como  
parte dos requisitos para obtenção do  
Título de Doutor em Geotecnia

Orientador: Prof. Heraldo Luiz Giacheti

São Carlos

2005

*A*

*Pedro, Mario e Geisa,  
pelo apoio e constantes momentos de felicidade.*

## ***AGRADECIMENTOS***

Ao meu orientador, **Prof. Heraldo Giacheti**, pela paciência, estímulo e constante apoio para o desenvolvimento desta pesquisa.

A **CAPES** pelo fornecimento de bolsa de estudo que permitiu a finalização deste trabalho, e aos auxílios financeiros da FAPESP (Processos nº 99/09770-4, 01/05182-2 e 03/05024-3). que permitiram adquirir alguns dos equipamentos utilizados nesta pesquisa.

Ao **Prof. Nelson Aoki** pelo estímulo, apoio e orientações na exploração de conhecimentos nas interfaces da Geologia e da Engenharia.

Ao **Prof. Renato Cunha**, pelo auxílio e orientação fornecidos durante o exame de qualificação e que contribuíram para a orientação da pesquisa em um foco específico,

Ao **Prof. Lázaro Zuquette** pela infraestrutura fornecida para realização da pesquisa

A todos os professores do Departamento de Geotecnia da EESC, em especial **Prof. José Eduardo Rodrigues, Prof. Nilson Gandolfi, Prof. Edmundo Rogério Esquivel, Prof. José Carlos Ângelo Cintra, Prof. Orêncio Monje Vilar, Prof. Nélio Gaioto, Prof. Osni Pejon**, pelo estímulo, amizade e apoio em todos os momentos.

Aos funcionários do Departamento de Geotecnia da EESC, **especialmente Maristela Aparecida Zotesso Batissaco, Álvaro Luiz Nery, Décio Aparecido Lourenço e Herivelto Moreira dos Santos**, pelos vários momentos de ajuda e gentilezas durante o transcorrer desta pesquisa.

Aos funcionários da Biblioteca da EESC, em especial **Elena Luzia Palloni Gonçalves**, pelo constante apoio na busca de informações que subsidiaram a pesquisa.

Aos meus pais e irmãos, **Livio, Ivanete, Rômulo, Bianca, Tiago e Camila**, além de **Gonzaga Luiz e Edmea**, pelo constante apoio, amizade, compreensão e companheirismo.

*As teorias científicas não estarão nunca  
aptas a fornecer uma descrição completa e  
definitiva da realidade. Serão sempre  
aproximações da verdadeira natureza das  
coisas.*

**Fritjof Capra, 1991**



## RESUMO

De Mio, G. (2005) *Condicionantes geológicas na interpretação de ensaios de piezocone para identificação estratigráfica na investigação geotécnica e geoambiental*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005

As campanhas de investigação geotécnica e geoambiental do subsolo utilizam diversos tipos de sondagem e ensaios com objetivo de mapear a distribuição espacial das unidades e definir os parâmetros de projeto específicos para cada tipo de intervenção. A etapa de identificação da distribuição e da constituição dos materiais é comum a grande parte dos projetos e normalmente é conduzida através de sondagens em campo que produzem uma perfilagem pontual e vertical do terreno. Os estudos realizados durante esta pesquisa tiveram como principal objetivo avaliar a influência da história geológica na execução e na interpretação dos ensaios de piezocone para identificação estratigráfica. Os ensaios de piezocone sísmico foram realizados com objetivo de identificar a interface entre solos lateríticos e os não-laterítico. Os ensaios de piezocone de resistividade foram realizados principalmente para avaliação de intrusões de cunhas de águas salinas em aquíferos sedimentares rasos. Desta forma, foram selecionadas nove áreas localizadas em regiões com diferentes condições geológicas, representativas do território brasileiro. Abrangem sedimentos quaternários das planícies litorâneas, sedimentos cenozóicos de bacias tafrogênicas e solos tropicais desenvolvidos a partir de rochas sedimentares e ígneas da Bacia do Paraná. Os locais foram selecionados em função da disponibilidade de informações adequadas às análises pretendidas. Nos sedimentos os resultados dos ensaios de piezocone foram eficazes na caracterização estratigráfica, classificação dos sedimentos e estimativa de parâmetros de projeto a partir de correlações. Nestes sedimentos, a experiência internacional, adquirida principalmente em sedimentos da América do Norte e Europa, pôde ser utilizada. Os ensaios com piezocone de resistividade foram eficazes em identificar intrusões salinas no aquífero, contribuindo também para identificação da estratigrafia do perfil. Nestes sedimentos foram observadas relações consistentes entre a história de formação do perfil e as propriedades geotécnicas estimadas a partir da interpretação dos ensaios de piezocone. Já, nos solos tropicais, os processos de intemperismo produzem transformações no perfil que dificultam a definição da estratigrafia, a classificação dos solos e a estimativa de parâmetros com base em correlações. Em solos tropicais, os ensaios com piezocone de resistividade foram ineficientes na identificação da profundidade do nível d'água e na definição da sequência estratigráfica, provavelmente devido à presença de óxidos de ferro e nível de água profundo. Já, os ensaios de piezocone sísmico foram eficazes para diferenciar os solos de comportamento laterítico dos de comportamento não-laterítico através da relação  $G_0/q_c$ . Conclui-se que o entendimento da história geológica é fundamental na interpretação dos ensaios de piezocone, principalmente na etapa de integração entre ensaios pontuais, para identificação da geometria e variabilidade dos solos. A quantidade de processos ou de variáveis independentes que contribuem para a formação do perfil de solo normalmente aumenta a variabilidade. Neste sentido, ensaios combinados, como o piezocone sísmico, onde vários parâmetros podem ser obtidos em um mesmo ponto, contribuem para minimizar os efeitos da variabilidade na estimativa de parâmetros de projeto.

Palavras-chave: piezocone, sísmica, resistividade, estratigrafia, história geológica, variabilidade.

## ABSTRACT

*De Mio, G. (2005): Geological conditioning aspects for piezocone test interpretation for stratigraphical identification in geotechnical and geo-environmental site investigation. PhD thesis – São Carlos Engineering School, University of São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brazil, 2005.*

In situ tests for geotechnical and geo-environmental site investigation embraces a variety of soundings and tests to map and define stratigraphic logging and specific design parameters for each kind of job. Stratigraphic logging and soil classification are a common stage to all investigation programs and frequently they are performed throughout logging tests which results in local vertical information. The main objective of this research is to evaluate the influence of geological history in the interpretation of piezocone tests for stratigraphic logging. Seismic piezocone tests were carried out to try to identify difference response between lateritic and non lateritic soils. Resistivity piezocone tests were carried out to evaluate salt-water intrusion within a shallow sedimentary aquifer. In this sense, nine sites with different geologic conditions, representing extensive areas from Brazil, were selected and investigated. They include quaternary sediment sequences on the Brazilian coast, tafrogenic sedimentary sequences and tropical soils originated from weathering of Paraná Basin sedimentary and igneous rocks. Piezocone tests were effective for stratigraphic logging, sediment classification as well as to estimate geotechnical design parameters based on correlations for sedimentary sediments. For these type of soils, the international experience developed for sedimentary soils from North America and Europe can be used. Resistivity piezocone tests were effectively useful to identify salt-water intrusion within a sedimentary aquifer and contributed to refine soil stratigraphy. Consistent relations between geologic history and geotechnical properties were established based on piezocone test results. In the other hand, the weathering process produces profile transformations in the tropical soils and imposes limitations to stratigraphy definition, soil classification and to estimate geotechnical soil parameters based on these correlations. For tropical soils, the resistivity piezocone test was not efficient to identify the groundwater level and to refine stratigraphic logging, probably due to the presence of iron oxides and deep groundwater. The seismic piezocone tests were effective to separate lateritic and non-lateritic soils throughout the relation between maximum shear modulus and poit resistance ( $G_0/q_c$ ). It is concluded that the geological information is fundamental for the interpretation of piezocone results, especially to integrate several logging test data, to identify spatial distribution and variability of soil layers. In this sense, combined tests, such as the seismic piezocone, where more than one parameter can be measured at the same location, contribute to minimize variability effects in the estimation of geotechnical soil parameters.

Key-words: piezocone, seismic, resistivity, stratigraphy, geological history, variability.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b>	v
<b>ABSTRACT</b>	vi
<b>SUMÁRIO</b>	vii
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	xi
<b>1 – INTRODUÇÃO</b>	1
1.1 - Considerações Gerais	1
1.2 - Organização e distribuição dos assuntos	6
<b>2 – OBJETIVOS</b>	7
<b>3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	8
3.1 – Descrição geral e breve histórico do ensaio de Piezocone (CPTU)	8
3.2 – Descrição dos sensores, princípios de funcionamento e aplicações	9
3.2.1 – Resistência de ponta ( $q_c$ ) e atrito lateral local ( $f_s$ )	12
3.2.2 – Poro-pressão ( $u$ )	14
3.2.3 – Piezocone de resistividade elétrica (RCPTU)	17
3.2.3.1 – Considerações gerais	17
3.2.3.2 – Princípio de funcionamento e medida	18
3.2.3.3 – Geometria do RCPTU	18
3.2.3.4 – Interpretação e aplicação das medidas de resistividade no solo	21
3.2.4 – Piezocone sísmico (SCPTU)	22
3.3 – Tratamento dos dados e apresentação dos resultados	29
3.4 – Uso e interpretação dos resultados dos ensaios de piezocone	33
3.4.1 – As bases teóricas para interpretação do ensaio de piezocone	33
3.4.2 – Correlações em câmaras de calibração	35
3.4.3 - Correlações entre ensaios de campo e laboratório	37
3.4.4 – Estimativa de parâmetros de projeto	40
3.4.4.1 – Parâmetros de estado inicial	42
3.4.4.2 – Parâmetros de deformabilidade	52
3.4.4.3 – Parâmetros de adensamento e permeabilidade	57
3.5 – Identificação do perfil estratigráfico	70
3.5.1 – Considerações gerais	70
3.5.2 – Influência da história geológica	72
3.5.3 – Perfil geotécnico com base nos resultados dos ensaios de piezocone	75
3.5.4 – Identificação do limite entre as camadas	77
3.5.5 – Ábacos de classificação indireta	78
3.6 – Solos tropicais	89
3.6.1 – Considerações gerais	89
3.6.2 – Investigação em solos tropicais	92
3.7 – Variabilidade e fontes de incertezas nos resultados dos ensaios	96
3.8 – Tratamento estatístico de resultados de ensaios de piezocone	107
<b>4 – MATERIAIS E MÉTODOS</b>	112
4.1 – Considerações gerais	112
4.2 - Sítios estudados	112
4.3 – Ensaio realizados	113
4.3.1 – Sistema de reação	114
4.3.2 – Ensaio com piezocone	114

4.3.3 – Ensaio com piezocone de resistividade	115
4.3.4 – Ensaio com piezocone sísmico	117
4.3.5 – O filtro de cavidade preenchido com graxa para registro de poro-pressão	122
4.4 – Procedimentos de tratamento dos dados e interpretação dos resultados	123
4.4.1 – Organização digital dos dados	123
4.4.2 Identificação do perfil estratigráfico	123
4.4.2.1 – Considerações gerais	123
4.4.2.2 – Identificação estatística das transições	124
4.4.2.3 – Análises estatísticas para estudos de variabilidade	129
4.4.2.4 – Função variância	130
4.4.3 – Classificação de solos baseada na lógica “fuzzy” e nos resultados do piezocone	132
4.4.4 – Correlações entre ensaios e parâmetros	135
4.4.4.1 – Relação $q_c/N_{SPT}$	136
4.4.4.2 – Relação $G_0/q_c$	137
<b>5 – RESULTADOS</b>	138
5.1 – Considerações gerais	138
5.2 – Sítios com sedimentos cenozóicos de bacias tafrogênicas	138
5.2.1 – Sítio Curitiba	138
5.2.1.1 – Considerações gerais	138
5.2.1.2 – Caracterização geológica	139
5.2.1.3 – Identificação do perfil estratigráfico	144
5.2.1.4 – Análise estatística	146
5.2.1.5 – Correlações entre parâmetros	148
5.2.1.6 – Ensaio com piezocone de resistividade e com uso de filtro de cavidade preenchido com graxa	150
5.2.2 – Sítio São Paulo	154
5.2.2.1 – Considerações gerais	154
5.2.2.2 – Caracterização geológica	155
5.2.2.3 – Identificação do perfil estratigráfico	157
5.2.2.4 – Análise estatística	166
5.2.2.5 – Correlações entre parâmetros	169
5.2.2.6 – Ensaio com piezocone de resistividade elétrica	170
5.2.2.7 – Ensaio com filtro de cavidade preenchido com graxa	171
5.3 – Sítios com sedimentos quaternários de planícies costeiras	175
5.3.1 – Considerações gerais	175
5.3.2 – Sítio Paranaguá	175
5.3.2.1 – Localização e abrangência da pesquisa	175
5.3.2.2 – Caracterização geológica	180
5.3.2.3 – Caracterização da contaminação	183
5.3.3 – Sítio Guarujá	186
5.3.3.1 – Considerações gerais	186
5.3.3.2 – Caracterização geológica	186
5.3.3.3 – Identificação do perfil estratigráfico	188
5.3.3.4 – Correlações entre parâmetros	191
5.3.3.5 – Classificação estratigráfica do perfil	192
5.3.4 – Sítio Caravelas	194
5.3.4.1 – Considerações gerais	194

5.3.4.2 – Caracterização geológica	195
5.3.4.3 – Identificação da estratigrafia	196
5.3.4.4 – Descrição estratigráfica com base nos resultados do ensaio de piezocone	197
5.3.4.5 - Relações entre mapeamento geológico e resultados de ensaios de piezocone	201
5.4 – Sítios com predominância de solos tropicais	203
5.4.1 – Considerações gerais	203
5.4.2 – Sítio São Carlos	203
5.4.2.1 – Considerações gerais	203
5.4.2.2 – Caracterização geológica	204
5.4.2.3 – Identificação do perfil estratigráfico	207
5.4.2.4 – Análise estatística	216
5.4.2.5 – Ensaio com piezocone sísmico	218
5.4.2.6 – Ensaio com piezocone de resistividade	220
5.4.2.7 – Ensaio de piezocone com filtro de cavidade preenchido com graxa	221
5.4.2.8 – Correlações entre parâmetros	222
5.4.2.8.1 – Relação $q_c/N_{SPT}$	222
5.4.2.8.2 – Relação $G_0/q_c$	224
5.4.3 – Sítio Campinas	226
5.4.3.1 – Considerações gerais	226
5.4.3.2 – Caracterização geológica	227
5.4.3.3 – Identificação do perfil estratigráfico	228
5.4.3.4 – Análise estatística	234
5.4.3.5 – Ensaio com piezocone sísmico	237
5.4.3.6 – Ensaio de piezocone com filtro de cavidade preenchido com graxa	239
5.4.3.7 – Correlações entre parâmetros	240
5.4.3.7.1 – Relação $q_c/N_{SPT}$	240
5.4.3.7.2 – Relação $G_0/q_c$	242
5.4.4 – Sítio Londrina	244
5.4.4.1 Considerações gerais	244
5.4.4.2 – Caracterização geológica	244
5.4.4.3 – Identificação do perfil estratigráfico	246
5.4.4.4 – Correlações entre parâmetros	251
5.4.5 – Sítio Bauru	254
5.4.5.1 – Considerações gerais	254
5.4.5.2 – Caracterização geológica	255
5.4.5.3 – Identificação do perfil estratigráfico	256
5.4.5.4 – Ensaio com piezocone sísmico	263
5.4.5.5 – Correlações entre parâmetros	265
5.4.5.5.1 – Relação $q_c/N_{SPT}$	265
5.4.5.5.2 – Relação $G_0/q_c$	267
<b>6 – DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	270
6.1 Considerações gerais	270
6.2 – Estudos geológicos e gênese dos perfis estratigráficos	271
6.2.1 – Sedimentos quaternários de planícies litorâneas	272
6.2.2 – Sedimentos cenozóicos de bacias tafrogênicas	273
6.2.3 – Solos tropicais	274
6.2.3.1 – Sítio São Carlos	275

6.2.3.2 – Sítios Campinas e Londrina	277
6.2.3.3 – Sítio Bauru	278
6.3 – Identificação das superfícies de transição	278
6.3.1 – Sedimentos quaternários de planícies litorâneas	279
6.3.2 – Sedimentos cenozóicos de bacias tafrogênicas	281
6.3.3 – Solos tropicais	283
6.4 – Classificação dos materiais inconsolidados	286
6.4.1 – Considerações gerais	286
6.4.2 – Sedimentos quaternários de planícies litorâneas	288
6.4.3 – Sedimentos cenozóicos de bacias tafrogênicas	290
6.4.4 – Solos tropicais	292
6.5 – Integração das informações	298
6.6 – Análises estatísticas das variabilidades	302
6.7 – Estimativa de parâmetros geotécnicos	305
6.8 – Ensaio de piezocone sísmico (SCPTU)	314
6.9 – Ensaio de piezocone de resistividade (RCPTU)	316
6.10 – Ensaio de piezocone utilizando filtro de cavidade preenchido com graxa	318
6.11 – Importância da história geológica	321
<b>7 – CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES</b>	<b>323</b>
<b>8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>331</b>

## Lista de símbolos

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGS	“Association of Geoenvironmental Scientists”
ASTM	“American Association of Testing Materials”
BTEX	Benzeno, tolueno, etileno e xileno
CPT	Ensaio de penetração de cone (“Cone penetration test”)
CPTu	Ensaio de penetração de cone com medida da poro-pressão
DMT	Dilatômetro de Marchetti
DPSH	Ensaio de penetração dinâmica – (“Dynamic penetration super-heavy”)
$f_s$	Atrito lateral local
$G_0$	Módulo de cisalhamento máximo
HRB	“Highway research board”
IP	Índice de plasticidade
$K_0$	Empuxo horizontal
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
MCT	Miniatura compactado tropical
NAPL	Fase líquida não-aquosa (“Non aqueous liquid phase”)
$N_{SPT}$	Resistência a penetração do ensaio de penetração padrão
OCR	Razão de sobreadensamento (“Overconsolidation ratio”)
PCPTu	Ensaio de penetração de cone com medição de poro-pressão e pressiométrico
$q_c$	Resistência de ponta
RCPTu	Ensaio de penetração de cone com medição de poro-pressão e de resistividade
$R_f$	Razão de atrito
SCPTu	Ensaio de penetração de cone com medição de poro-pressão e velocidade sísmica
SIG	Swedish Geotechnical Institute
$u$	Poro-pressão
$u_0$	Poro-pressão inicial
$u_1$	Poro-pressão na posição 1 do piezocone
$u_2$	Poro-pressão na posição 2 do piezocone
$u_3$	Poro-pressão na posição 3 do piezocone
UBC	University of British Columbia”
$u_n$	Poro-pressão normalizada
USCS	“Unified soil classification system”

## 1 INTRODUÇÃO

### **1.1 Considerações Gerais**

As campanhas de investigação para os estudos geotécnicos e geoambientais utilizam diversos tipos de sondagens e ensaios com objetivo de mapear a distribuição espacial dos materiais e definir os parâmetros de projeto específicos para cada tipo de intervenção. A etapa de identificação da distribuição e da constituição dos materiais é comum a maioria dos projetos, e normalmente é conduzida através de sondagens em campo que produzem uma perfilagem vertical do terreno. Os vários pontos investigados são interligados formando seções que integram as informações das sondagens e ensaios. Os resultados das sondagens de simples reconhecimento para identificação do perfil predominam na prática geotécnica brasileira, pois apresentam informações sobre o nível d'água, constituição e resistência dos materiais, a custos reduzidos. Os resultados de ensaios de piezocone são utilizados para obtenção de parâmetros de projeto, porém seu potencial para identificação da estratigráfica é pouco utilizado (Douglas & Olsen, 1981; Amorosi & Marchi, 1999; Scheneider et al, 2001), principalmente em os *solos tropicais*.

A crescente necessidade de parâmetros mais precisos tem levado à automação de processos de aquisição e de processamento de dados. O piezocone é uma ponteira cônica metálica instrumentada com sensores, sendo os principais os de resistência, de poro-pressão, de inclinação, de velocidade da onda sísmica e de resistividade. A automação na aquisição destas informações traz mais precisão e rapidez nos resultados, que são fornecidos em tempo real, suprimindo uma lacuna na área de ensaios de campo, com qualidade.

Na programação e interpretação dos resultados das campanhas de investigação as informações geológicas nem sempre são utilizados de forma adequada. Entende-se por informação geológica aquelas ligadas às dinâmicas interna e externa do planeta, que contribuem nas características dos materiais presentes na superfície da Terra, com sensíveis variações espaciais e temporais dos processos e produtos. Abrangem desde a



formação das rochas, as transformações por metamorfismo ou intemperismo, até a erosão, morfogênese e pedogênese, que podem mostrar comportamentos cíclicos, com superposição de eventos (Morrison, 1995). A combinação dos diversos processos normalmente aumenta a complexidade do perfil e pode permanecer registrada, interferindo na interpretação dos ensaios. A integração entre os resultados e análises dos ensaios nos diversos locais estudados mostra que sempre existe incerteza, que pode estar ligada aos equipamentos e procedimentos, às condições ambientais e às variabilidades naturais do solo. Desta forma as variabilidades dos materiais inconsolidados são função das condições de formação, e as variáveis investigadas são consideradas aleatórias com um grau de correlação espacial imposto pela estabilidade e continuidade do meio ou agente formador do solo. Isto significa que a informação obtida em cada ensaio é estritamente válida somente para o local onde foi obtida e é aleatória onde se pretende estimá-la (Isaaks & Srivastava, 1989).

Na compreensão da estratigrafia dos denominados “solos” para a engenharia (Na prática o “solo” em engenharia civil refere-se a material pouco resistente, independente da origem, incluindo solos, sedimentos, regolitos, etc.), são utilizados conhecimentos interdisciplinares da geologia, pedologia, geomorfologia e geotecnia, ressaltando as variações no conceito de solo. Na interpretação para análise estratigráfica, o termo *solo* pode referir-se às alterações intempéricas das rochas, segundo os conceitos da geologia, apresentando vários estágios de alteração. O termo *sedimento* refere-se a material proveniente de processo sedimentar, podendo, para a engenharia civil, ser diferenciado em consolidado e não consolidado. O conceito de *solo* conforme utilizado *na engenharia civil*, como um material desagregável manual ou mecanicamente, que perde sua resistência em contato com a água, é útil na seleção de modelos de análise, porém deve ser evitado na interpretação estratigráfica dos terrenos. O termo *material inconsolidado* deve ser utilizado quando existem dúvidas sobre a gênese ou quando são feitas referências genéricas,.

Para avaliar a influência das características geológicas na interpretação dos ensaios de piezocone, foram selecionados nove sítios de pesquisa situados em locais com diferentes condições geológicas. Os sítios estão classificados em três grupos: sedimentos de regiões litorâneas quaternárias, sedimentos de regiões interiores terciárias (também denominadas bacias terciárias tafrogênicas) e os solos tropicais. Além dos ensaios de piezocone cada sítio tem disponível informações adicionais relacionadas ao mapeamento geológico, sondagens de simples reconhecimento, poços de inspeção, ensaios de caracterização em laboratório, ensaios de caminhamento elétrico, perfilagem da

condutividade elétrica e perfilagem sísmica. A partir destas informações foram aplicados procedimentos razoavelmente padronizados, que abrangem a descrição geológica, a comparação entre diferentes classificações dos materiais inconsolidados, a identificação da posição das superfícies de transição utilizando diferentes métodos, análises de variabilidade do solo, análises das relações  $q_c/N_{SPT}$  e  $G_0/q_c$  e a interpretação baseada no modelo geológico de cada sítio. São também analisados os resultados de ensaios de resistividade e sísmicos, como acessórios do ensaio de piezocone. Os ensaios sísmicos são concentrados em solos tropicais e tem o objetivo de identificar diferenças nos graus de cimentação, de alteração e de estruturação, que são aspectos importantes na caracterização e muitas vezes não são identificados pelas sondagens convencionais e por inspeções tácteis e visuais.

A análise dos resultados é feita com base na interpretação dos perfis individuais, identificando as variações indicadas por cada um dos sensores em relação ao contexto geológico e em relação aos demais ensaios. As análises de variabilidade são unidirecionais no sentido da perfilagem do solo, e fornecem a média, o desvio padrão, o coeficiente de variação e a distância de correlação, com base no resultado de resistência de ponta ( $q_c$ ) dos ensaios de piezocone. A análise destes parâmetros permite estimar a variabilidade do solo e orientar a definição dos critérios e posições das amostragens, bem como a seleção dos parâmetros mecânicos de projeto através de correlações convencionais.

Os resultados mostram que existem dois grupos de processos responsáveis pelas principais características dos materiais inconsolidados. O primeiro relaciona-se aos processos de sedimentação, à natureza da rocha fonte e da energia do ambiente de sedimentação. Espessura, tamanho, composição, relações de contato entre camadas e outras, são definidas pela interpretação dos ambientes de sedimentação, feitas com base em conceitos básicos de geologia. O segundo grupo de processos engloba os fatores que modelam a superfície da Terra, através de um balanço espacial e temporal entre pedogênese e erosão, com forte influência das mudanças climáticas ocorridas no Terciário e no Quaternário (Bigarella et al., 1994; Morrison, 1995). Neste grupo estão incluídos diversos fatores ligados à gênese dos solos tropicais, como formação dos colúvios, desenvolvimento de espessos mantos de intemperismo e formação dos solos porosos e colapsíveis.

A interpretação dos resultados dos ensaios de piezocone depende dos processos que originaram o solo. Nos *sedimentos*, onde o comportamento geotécnico está em grande

parte ligado à granulometria e ao grau de compactação, existe sensível correspondência entre as classificações obtidas da interpretação dos ensaios de piezocone e as descrições tácteis e visuais e laboratoriais de amostras, conforme pesquisas de diversos autores (Robertson et al, 1986; Lune et al, 1997). A identificação das superfícies de transição, com base nos diferentes métodos empregados, coincide em parte, porém existem locais onde os resultados são contrastantes devidos ao maior detalhamento propiciado pelo ensaio de piezocone, às imprecisões comuns nos resultados de sondagens de simples reconhecimento ou à variabilidade natural dos solos. Nos testes estatísticos que utilizam o critério de janela móvel para identificação das transições Wickremesinghe (1989), as respostas sofrem influência direta do tamanho da janela e da espessura e quantidade de camadas na sequência de sedimento. Nestes materiais, o conceito de camada com continuidade lateral entre os vários pontos de investigação é consistente desde que interpretado segundo critérios geológicos. Correlações entre ensaios realizados em diferentes posições, porém no interior de uma mesma camada, são coerentes desde que considerem o nível de variabilidade interna da camada. Correlações entre resultados de ensaios de piezocone sísmico e SPT ( $q_c/N_{SPT}$  e  $G_0/q_c$ ) sofrem influência da escala de variabilidade do maciço, pois diferentes ensaios solicitam volumes distintos do maciço. Ensaio para determinação de  $N_{SPT}$  executados na região da transição não são representativos de nenhuma das camadas. No entanto, muitas das pequenas variabilidades detectadas pela interpretação dos resultados dos ensaios de piezocone auxiliam na caracterização detalhada das camadas e nas análises de variabilidade do solo. Nos sedimentos inconsolidados ou pouco consolidados (sedimentos quaternários e terciários) o resultado dos ensaios de piezocone mostra-se muito adequado, pois fornece elevado detalhamento da sequência estratigráfica que, quando adequadamente calibrado com a interpretação geológica, pode ser utilizado para diversos estudos de estratigrafia de alta resolução (Hegazy, 1998; Sins, 2002), estudos arqueológicos e estudos paleoambientais (Amorosi & Marchi, 1999). O uso de sensores adicionais ao piezocone, como o de resistividade elétrica, mostra boas respostas na detecção de plumas de água salgada em aquíferos litorâneos, onde são mais frequentes as ocorrências de areias limpas.

Os resultados mostram situação oposta para os *solos tropicais*, com perfis desenvolvidos pela alteração intempérica de rochas cristalinas, onde a intensa pedogênese atuou sobre basaltos e diabásios, formando um solo residual com espessuras de até 30 metros nos locais estudados. O desenvolvimento do solo é controlado pela presença de fraturas e por diferenças composicionais (químicas, físicas ou mineralógicas), em função

da infiltração de água. A superfície de transição rocha/solo é muito irregular, normalmente sendo gradual pelo aumento, em profundidade, da relação blocos de rocha/solo no perfil de intemperismo. É comum a ocorrência de blocos de rocha pouco alterada ou sã em meio ao solo, tornando a geometria dos diferentes materiais muito heterogênea e de difícil caracterização. Nos arredores do sítio São Carlos, foi encontrado basalto com estrutura acamadada e intercalação de nível horizontal de solo na rocha sã. Nestes materiais a integração entre os vários pontos de investigação não pode utilizar o conceito de camada, podendo alternativamente utilizar o conceito de zona de transição, com variabilidade sensivelmente maior que as demais. Correlações entre ensaios realizados em diferentes posições do maciço podem ser irreais e podem estar considerando homogêneos materiais com diferentes graus de alteração e conseqüentemente diferentes propriedades geotécnicas. Os ensaios de piezocone fornecem as espessuras dos solos tropicais porosos superficiais, seja em função do resultado da razão de atrito ( $R_f$ ) muito baixa ou da relação  $G_0/q_c$  mais elevada que os solos mais profundos. No entanto, a identificação e delimitação dos solos tropicais, englobando os que sofreram pedogênese e morfogênese durante o Quaternário, dependem de adequada integração de técnicas de mapeamento geológico, geomorfológico e pedológico, e de interpretação geotécnica. Os resultados das medições de resistividade pelo método do piezocone de resistividade são de difícil interpretação nestes tipos de solo provavelmente devido à presença de óxidos de ferro e alumínio provenientes dos processos de intemperismo tropical. Os ensaios de piezocone sísmico fornecem o módulo de cisalhamento máximo ( $G_0$ ), que auxilia na interpretação do perfil geotécnico, principalmente em locais onde os níveis d'água são profundos e o registro da poro-presão no ensaio de piezocone é inexistente.

Conclui-se que para a obtenção do perfil ou modelo geotécnico de um terreno é necessária uma etapa prévia de reconhecimento geológico quando são idealizadas possíveis seqüências estratigráficas utilizando os conceitos mais adequados para cada situação. Este modelo geológico é confrontado com as necessidades de cada tipo de projeto, e é então produzido o modelo ou seção geotécnica que caracteriza os materiais para os dimensionamentos das estruturas geotécnicas ou das intervenções geoambientais.

## **1.2 Organização e distribuição dos assuntos**

Esta pesquisa aborda diversos aspectos da investigação de materiais inconsolidados que, em diferentes capítulos, enfatiza os aspectos geológicos importantes na interpretação dos ensaios de campo.

Na introdução é ressaltada a importância do conhecimento geológico na interpretação dos resultados dos ensaios de campo, principalmente quando amostras não são disponíveis, como em ensaios de piezocone. Os sítios pesquisados são organizados por critérios geológicos e são aplicados aos dados tratamentos adequados para as análises pretendidas. São mostradas as importâncias da precisão e integração de conhecimentos geológicos, pedológicos, geomorfológicos e geotécnicos na obtenção de perfil geotécnico mais adequado.

No capítulo de revisão bibliográfica são abordados trabalhos prévios pela tecnologia dos piezocones convencionais, com maiores detalhes sobre o piezocone de resistividade e o sísmico, aqui utilizados. Abrangem obtenção e tratamentos estatísticos de parâmetros de projetos, além da interpretação dos resultados dos ensaios de piezocone. São também apresentadas correlações entre os parâmetros de projeto e as informações prévias necessárias. A elevada precisão e frequência de registro dos sensores tornam o piezocone um ensaio adequado a estudos de variabilidade dos materiais inconsolidados. São abordados, ao final, as principais características dos solos tropicais, como elevada porosidade ou variabilidade) que devem ser identificadas em uma campanha de investigação, quando os conhecimentos de pedologia, geologia e geomorfologia somam-se aos de ensaios de campo para propiciar adequada caracterização do perfil geotécnico.

No capítulo de materiais e métodos são descritos os locais de pesquisa, com localização, ensaios utilizados e características geológicas. Descrições detalhadas da geologia e dos ensaios são apresentadas no capítulo de resultados. São descritos os equipamentos e os procedimentos de ensaios, principalmente os da tecnologia do piezocone, sendo detalhados os procedimentos de integração dos dados obtidos em cada sítio de pesquisa.

O capítulo de resultados é subdividido por local de pesquisa, onde são detalhadas as características geológicas e pedológicas, necessárias na produção de um modelo geotécnico adequado.

No capítulo de discussão a análise dos resultados, são analisados de forma integrada os resultados obtidos em cada local de pesquisa. As discussões são agrupadas por procedimento de análise aplicado. Com base nestas análises é proposto um procedimento adequado para investigação geotécnica de materiais inconsolidados com o uso do piezocone.

Em conclusões e recomendações são apresentadas as principais constatações da pesquisa e sugestões para pesquisas futuras visando o aprimoramento dos conhecimentos abordados.

## 2. OBJETIVOS

### **2.1 Objetivo Geral**

A pesquisa tem o objetivo de demonstrar a importância dos conhecimentos geológicos na adequada interpretação dos ensaios de piezocone, com finalidades geotécnicas e geoambientais.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Comparar classificações de materiais inconsolidados a partir de resultados e ábacos do ensaio de piezocone, com as de sondagens expeditas de simples reconhecimento, inclusive a identificação das superfícies de transição;
- Analisar a influência da gênese dos diferentes tipos de materiais inconsolidados, na interpretação das seções estratigráficas e na identificação da geometria dos materiais;
- Analisar a possibilidade de distinção entre zonas de solos lateríticos e não-lateríticos pelo ensaio de piezocone sísmico;
- Analisar a influência da gênese na interpretação dos registros de resistividade dos ensaios de piezocone;
- Analisar a influência da gênese na determinação das correlações entre ensaios de piezocone e SPT ( $q_c/N_{SPT}$  e  $G_0/q_c$ );
- Analisar a influência da gênese na resposta do sensor de poro-pressão utilizando filtro de cavidade preenchido com graxa;
- Realizar uma revisão bibliográfica sobre a interpretação dos resultados dos ensaios de piezocone, visando a definição dos parâmetros de projeto.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### **3.1 - Descrição geral e breve histórico do ensaio de piezocone (CPTU)**

O ensaio de penetração de piezocone é executado em solos e consiste na cravação vertical de uma ponteira cônica de aço, instrumentada com diversos tipos de sensores, com informações coletadas digitalmente e visualizadas em tempo real na tela de um computador. A cravação depende de um sistema de reação, que pode ser um lastro ou uma ancoragem no solo. A capacidade de penetração da ponteira depende da resistência total do conjunto: capacidade do sistema de reação + resistência do solo. Existem dois tipos principais de aplicação dos esforços estáticos, que são caminhões com peso variável de 10 ton. a 40 ton. e outro que são os penetrômetros de pequeno e médio porte ancorados com trados mecânicos no solo. Os primeiros tem a capacidade de reação independente do tipo de solo superficial, já os sistemas ancoráveis tem sua capacidade vinculada às características de resistência de ancoragem nos solos superficiais.

Os primeiros ensaios de penetração estática foram realizados pela Ferrovia Estatal da Suécia, em 1917, e pelas Ferrovias Dinamarquesas, em 1927 (Cestari, 1990). Estes primeiros equipamentos eram mecânicos e apresentavam uma célula de carga posicionada no topo das hastes, medindo a força necessária para a cravação da ponteira. Em 1934 surgiram os primeiros cones, denominados Delft, na Holanda (Lunne et al, 1997). A introdução da medida do atrito lateral através de uma luva metálica foi feita por Beggemann (1953) seguidos dos primeiros cones elétricos, propiciando grande incremento no uso a partir da década de 60, em função da precisão e rapidez na obtenção dos resultados. A introdução da medição da poro-pressão ocorreu em etapas, inicialmente só com a com medição da poro-pressão nas sondas piezométricas (Wissa et al. 1975; Torstensson, 1975) e posteriormente com o surgimento do piezocone, para medir simultaneamente resistência de ponta, atrito lateral local e poro-pressão (De Ruyter, 1971). A partir deste período as medições tornaram-se mais precisas e foram sucessivamente sendo acrescentados novos sensores ao piezocone padrão, aumentando sensivelmente o potencial como ferramenta de investigação geotécnica e geoambiental (Campanella et al., 1998).

O desenvolvimento e uso da tecnologia do piezocone teve forte impulso devido a sua grande aplicabilidade na avaliação de áreas sujeitas a sismos e com riscos de liquefação de solos arenosos finos. O desenvolvimento de módulo sísmico permitiu

associar a análise estratigráfica e a obtenção do módulo de cisalhamento máximo ( $G_0$ ) em um mesmo ensaio (Davies & Campanella, 1995). Estudos em grandes áreas objetivando mapeamentos estratigráficos e avaliações de risco têm sido realizados com sucesso utilizando os ensaios de piezocone (Schneider et al., 2001; Amorosi & Marchi, 1999).

### **3.2 - Descrição dos sensores, princípios de funcionamento e aplicações**

O piezocone, pelas próprias características de concepção, permite o acoplamento de diversos tipos de sensores, e desta forma pode permitir a perfilagem com a obtenção de parâmetros específicos em posições específicas. São aqui evidenciadas algumas características principais dos sensores básicos de resistência de ponta ( $q_c$ ), atrito lateral ( $f_s$ ) e poro-pressão ( $u$ ), do sensor de resistividade elétrica e do sensor sísmico, utilizados nesta pesquisa. Na Tabela 3.1 são listados os principais sensores que podem ser acoplados ao piezocone, especialmente aqueles para aplicação ambiental, conforme compilado por Burns & Mayne (1998).

A geometria básica do piezocone é indicada na Figura 3.1, onde são mostrados os principais sensores: resistência de ponta ( $q_c$ ), resistência ao atrito lateral local ( $f_s$ ) e a poro-pressão ( $u$ ), que pode estar posicionado simultaneamente ou não em cada uma das posições indicadas ( $u_1, u_2, u_3$ ).

Além disso existe ainda piezocone com medição da poro-pressão na extremidade da ponta cônica (não indicada na figura) e também denominada  $u_l$ , o que pode causar certa confusão quando da comparação de resultados de diferentes piezocones (Sully et al., 1988).



Tabela 3.1 - Relação dos sensores geoambientais usados nos ensaios de piezocone, conforme Burns &amp; Mayne (1998b).

Sensor	Medidas	Aplicações	Referência
<b>Resistividade</b>	Mobilidade de íons nos fluídos dos poros usando eletrodos eletricamente isolados.	Intrusão de água salina Derramamento de ácido Nível d'água em barragens rejeitos	Horsnell(1988); Campanella & Weemees(1989); Strutytsky <i>et al.</i> (1991); Woeller <i>et al.</i> (1991a) Malone <i>et al.</i> (1992)
<b>Temperatura</b>	Temperatura do corpo do cone	Atividade endotérmica e exotérmica	Horsnell(1988); Mitchell(1988); Woeller <i>et al.</i> (1991b)
<b>SCAPS</b>	Indução de laser fluorescente de combustíveis contaminantes; N <sub>2</sub> laser em $\lambda = 337$ nm	Combustível, óleo e lubrificante, contaminação suscetível a fluorescência	Lieberman <i>et al.</i> (1991); Apitz <i>et al.</i> (1992a); Apitz <i>et al.</i> (1992b) Theriault <i>et al.</i> (1992); Lambson & Jacobs(1995)
<b>Potencial redox</b>	Potencial de Oxidação e Redução	Monitoramento das condições de bio-remediação	Olie <i>et al.</i> (1992); Plumgraaf <i>et al.</i> (1995)
<b>pH</b>	Concentração do íon H <sup>+</sup>	Derramamento de ácido Derramamento de base	Brylawski(1994)
<b>Constante Dielétrica</b>	Constante dielétrica da mistura solo/fluído dos poros como uma função da frequência	Contaminantes de NAPL	Arulmoli(1994); Stienstra & Van Deen(1994)
<b>Espectroscopia Raman</b>	Espectrógrafo Raman fluorescência induzido	Contaminantes de NAPL Hidrocarbonetos clorados	Carrabba(1995); Bratton & Timian(1995)
<b>ROST™</b>	Fluorescência por indução a laser neodímio e por ítrio alumínio em $\lambda = 280 - 300$ nm	Combustível, óleo, lubrificante ou suscetível a fluorescência	Naval Command(1995)
<b>Radiação gamma</b>	Detecção de Urânio por produtos usando um detector com cristal de NaI(Tl).	Identificação de contaminantes radioativos	Brodzinski(1995); Lightner & Purdy(1995)
<b>Integrado optoeletrônico</b>	Medidas de concentração química em campo por interferências de ondas	Amônia pH BTEX	Hartman <i>et al.</i> (1988) Hartman (1990)
<b>Inclinômetro</b>	Verticalidade do cone	Prevenir dano no cone	Campanella <i>et al.</i> (1986);
<b>Resistividade</b>	Mobilidade de íons nos fluídos dos poros usando eletrodos isolado eletricamente	Porosidade de areias Arranjo estrutural Cond. = 1/Resist.	Bellotti <i>et al.</i> (1994); Campanella & Weemees (1989);
<b>Módulo vibratório</b>	Vibração do cone durante a cravação	Taxa do potencial de liquefação do solo	Sasaki & Koga (1982); Sasaki <i>et al.</i> (1985); Mitchell (1988)
<b>Acelerômetro geofone</b>	Velocidade da onda cisalhante	Medição de G <sub>0</sub> Velocidade da partícula Razão de amortecimento	Robertson <i>et al.</i> (1986);
<b>Radiação neutron gamma</b>	Teor de umidade	Densidade, umidade Correlação com liquefação	Marton <i>et al.</i> (1988); Mitchell (1988); Sully & Echezuria (1988); Mimura <i>et al.</i> (1995)
<b>Tensão lateral</b>	Tensão lateral no fuste do cone	Avaliação do estado de tensão no campo	Mitchell (1988); Sully (1991)
<b>Acústico</b>	Emissão acústica	Tipo de solo, arranjo e compressibilidade do solo	Villet <i>et al.</i> (1981) Tringale & Mitchell(1982); Menge & Van Impe(1995)
<b>Módulo pressiométrico</b>	Deformação radial	Resist. ao cisalhamento Esforços horizontais Deformabilidade	Houlsby & Withers (1988); Housby & Hitchman(1988); Ghionna <i>et al.</i> (1995)
<b>Refletometria no domínio tempo</b>	Constante dielétrica através de pulsações de ondas eletromagnéticas	Correlação com teor de umidade	Lightner & Purdy(1995)
<b>Vídeo</b>	Imagens em vídeo do solo durante a penetração	Medida do tamanho do grão Estratigrafia do solo	Hryciw & Raschke (1996); Raschke & Hryciw(1997)

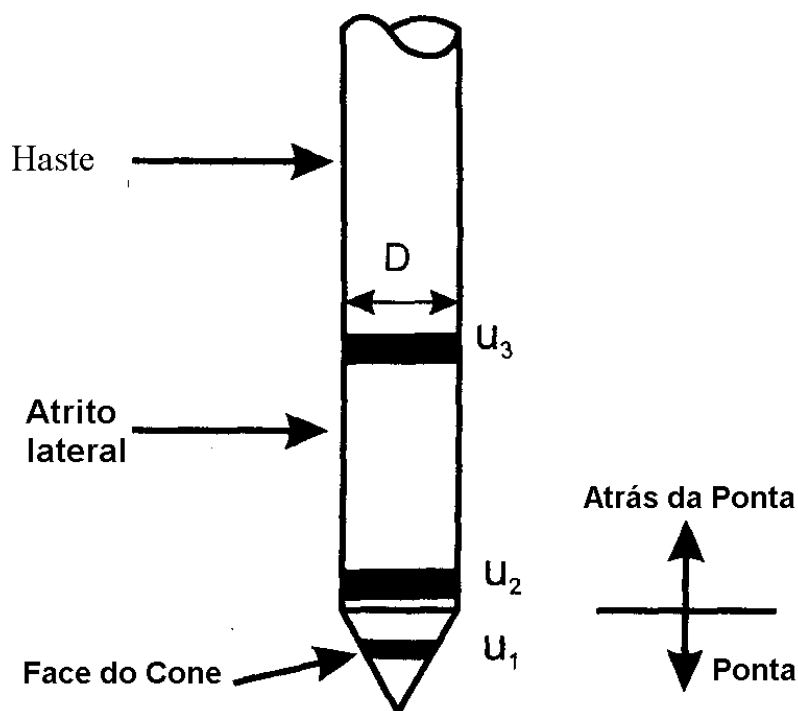


Figura 3.1 – Desenho esquemático do piezocone, com indicação das diversas posições de medição da poro-pressão

A posição de medição da poro-pressão tem forte influência nos resultados, conforme foi observado por Sully et al (1988a,b) e está representada na Figura 3.2. A posição considerada padrão é a  $u_2$ , atrás da base do cone, principalmente devido a necessidade de correção da resistência de ponta devido ao efeito de áreas desiguais, conforme indicado em Senneset et al (1989). No entanto, esta posição é criticada por alguns autores por estar localizada em uma região de intensa redistribuição de tensões e deformações, o que prejudica a interpretação do ensaio em certas condições de solo (Burns & Mayne, 2002). Existe consenso entre diversos pesquisadores de que não existe posição única que permita a interpretação de todo potencial deste parâmetro (Baligh, 1986a; Gillespie, 1990; Burns & Mayne, 2002). Os sistemas de piezocone mais comuns possuem ainda um sensor que controla a inclinação durante a cravação. Os resultados de resistência de ponta ( $q_c$ ) e atrito lateral local ( $f_s$ ) normalmente são tratados em conjunto (Lunne et al, 1997) e indicam a resistência oferecida pelo solo à penetração de uma ponteira de aço padrão com  $10 \text{ cm}^2$  de área, e ao atrito lateral de uma luva metálica com  $150 \text{ cm}^2$  de área.

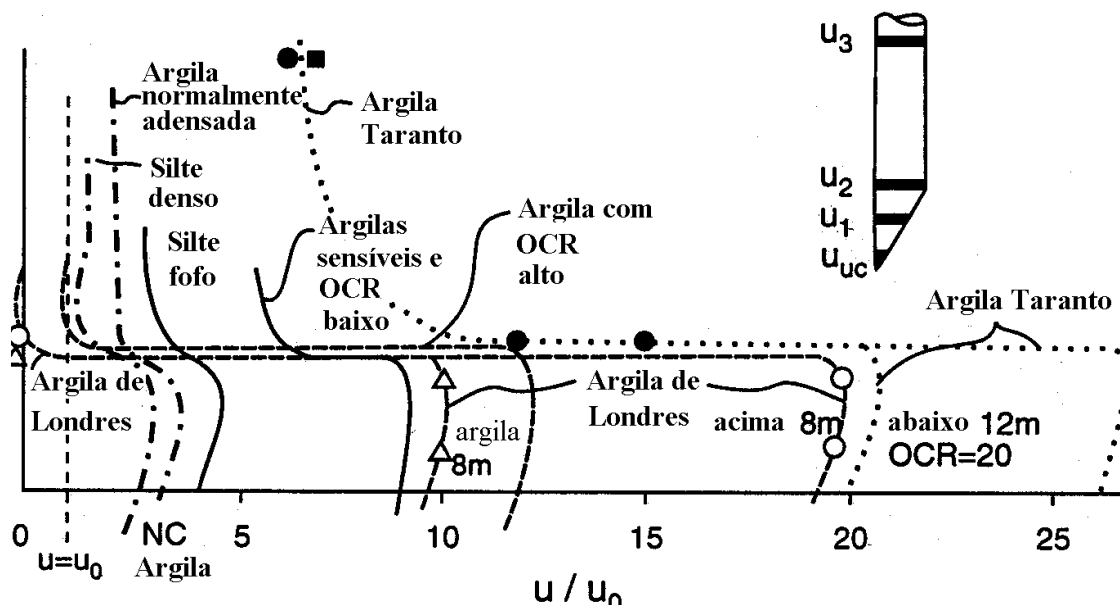


Figura 3.2 – Distribuição da poro-pressão nas diversas posições do piezocone, devido a redistribuição de tensões devidas à cravação (Sully et al, 1988)

A padronização das dimensões, velocidade de cravação, geometria, entre outros, é de fundamental importância para permitir a comparação e correlação entre os diversos ensaios de piezocone. Os procedimentos de checagem e calibração, descritos em detalhe por Lunne et al (1997), devem ser sempre seguidos, de forma a garantir erros mínimos e confiabilidade, viabilizados através da precisão e acurácia propiciadas pelos resultados dos ensaios de piezocone, quando devidamente calibrados e executados.

### 3.2.1 - Resistência de ponta ( $q_c$ ) e atrito lateral local ( $f_s$ )

A Resistência de Ponta ( $q_c$ ) é a resistência oferecida pelo solo a penetração quasi-estática de um conjunto de hastes com uma ponteira cônica, com área de  $10 \text{ cm}^2$  e frequência de leitura que varia de 1 a 5 cm, resultando em um perfil de resistência praticamente contínuo. O modelo do ensaio simula a cravação de uma estaca e os parâmetros geotécnicos podem ser obtidos por correlações e o tipo de solo obtido interpretando sistemas de classificação em geral apresentados em ábaco. Os valores da resistência de ponta, em solos saturados, sofrem forte influência da pressão neutra gerada durante o processo de cravação. Os valores devem ser corrigidos para o efeito da poro-pressão, através do registro de  $u_2$  medida na base do cone. A Figura 3.3 mostra diversos

exemplos de cones mecânicos e elétricos, sendo os dois primeiros da esquerda para direita mecânicos e os demais elétricos.

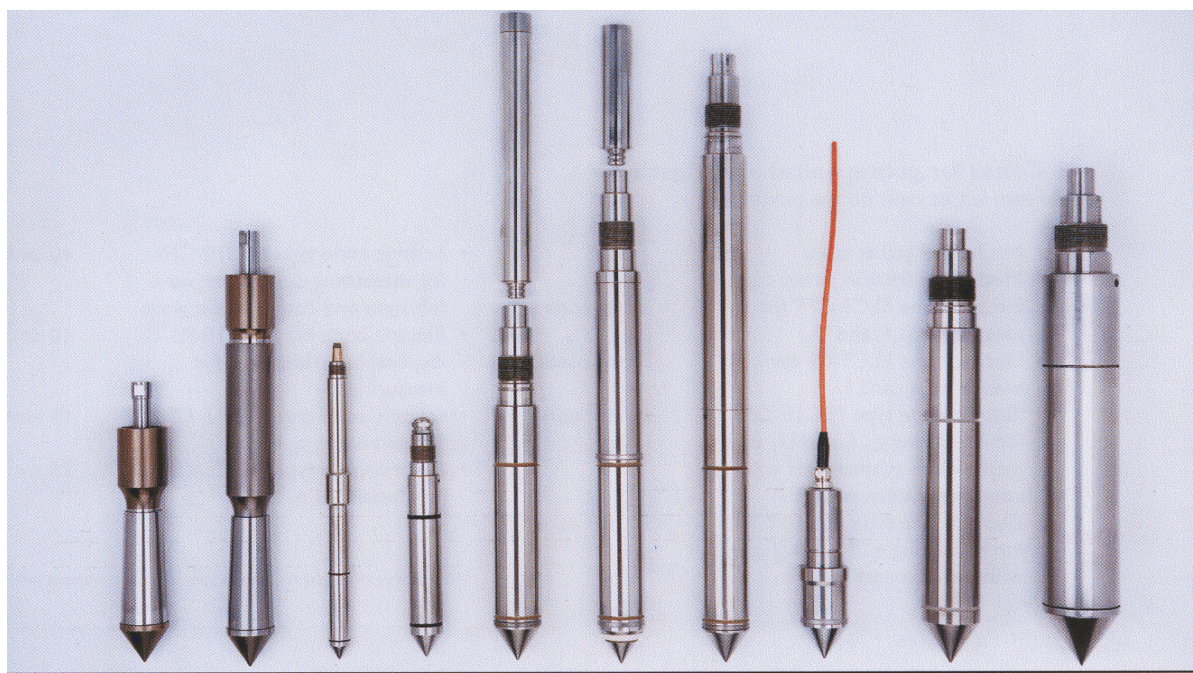


Figura 3.3 – Exemplos de Cones e Piezocones

A resistência de ponta é o parâmetro básico dos ensaios de cone (CPT) e de piezocone (CPTU), pois fornece um parâmetro de resistência quase contínuo. Diversas pesquisas enfocando resistência ao cisalhamento e propriedades de deformação procuram correlacionar os parâmetros com a resistência de ponta ( $q_c$ ) (Wroth, 1984; Jamiolkowski et al, 1988; Lunne et al, 1997; De Beer, 1963). A previsão de parâmetros de deformação está sujeita a grandes incertezas em função dos níveis de deformação provocados pela inserção do cone no solo, devido às características do próprio solo e do diâmetro do instrumento (Wroth, 1984; Lunne et al, 1997). Maiores detalhes sobre o uso dos resultados de  $q_c$  na estimativa de parâmetros de projeto serão apresentados no capítulo 3.4.

O atrito lateral ( $f_s$ ) é medido através de uma luva com área de  $150 \text{ cm}^2$  posicionada acima da ponteira cônica. Os resultados do atrito lateral local são considerados imprecisos por diversos autores (Bandini & Salgado, 1998; Eslami & Fellenius, 1997) devido a variações de projeto dos diversos cones e do nível de deformação do solo elevado na posição de medida do atrito. Outro aspecto que torna impreciso o uso dos resultados de  $f_s$

é a freqüente ausência de correção de posição devido a simultaneidade de medição no sensor da luva de atrito em relação ao sensor de resistência de ponta do cone.

Jaksa et al. (1997) estudando o efeito das correções de posição, concordam com Campanella et al. (1983), que para a maioria dos tipos de solos uma correção de 100 mm para a posição da luva de atrito é recomendada. Estes mesmos autores concluem que ignorar a correção dos resultados de  $f_s$  com relação a posição implica em erros significativos na razão de atrito ( $R_f$ ) e conseqüentemente na identificação do perfil estratigráfico.

Em tratamento estatístico de resultados de ensaios de piezocone, Wickemesighe (1989) concluiu que os resultados de  $q_c$  e de  $f_s$  representam parâmetros médios de uma determinada porção de solo penetrada pelo cone. No resultado de  $q_c$  a média advém do efeito de bulbo provocado pela penetração do cone, e no  $f_s$  advém da geometria e tamanho da luva aliada a freqüência de medidas.

### 3.2.2 - Poro-pressão

A medida da poro-pressão é um parâmetro que efetivamente diferencia o piezocone como ferramenta de investigação, por fornecer informações sobre o desenvolvimento de pressão e conseqüentemente de migração dos fluídos nos poros do solo (Baligh & Levadoux, 1980; Robertson et al., 1986; Houlsby & Teh, 1988; Robertson, 1990). Parâmetros de resistência e compressibilidade dos solos argilosos estão diretamente influenciados pelas características de fluxo da água nos poros, de forma que as avaliações de parâmetros tornaram-se mais precisas e o entendimento do comportamento do solo frente a uma solicitação de carga é melhor compreendida e modelada através do uso do resultado das medidas de poro-pressão (Burns & Mayne, 2002). Modelos compostos que combinam teoria do estado crítico com expansão de cavidades (Burns & Mayne, 1998a) fornecem base teórica para previsão de comportamento da dissipação da poro-pressão, conforme detalhado no item 3.4.3.

A poro-pressão pode ser avaliada sob dois enfoques distintos. O primeiro com relação ao perfil de poro-pressão desenvolvido durante a cravação do piezocone, que fornece indicações claras da drenabilidade dos solos investigados quando ocorre a penetração do piezocone. O segundo enfoque é a realização dos ensaios de dissipação, que permitem a determinação de parâmetros do solo como coeficiente de adensamento e

permeabilidade nos solos argilosos, além do nível d'água e de indicações sobre a direção de fluxo da água subterrânea nos solos mais arenosos. O perfil de poro-pressão desenvolvido durante a cravação do piezocone, tem por base o conceito de que o excesso de poro-pressão gerado na cravação do piezocone, em solos com granulação fina saturados, tende a ser elevado e se dissipa lentamente; e em solos de granulação grossa saturados tende a ser baixo ou nulo, refletindo a alta permeabilidade. O sensor de poro-pressão apresenta elevada sensibilidade para detecção de camadas muito delgadas e muito permeáveis de comportamento drenado (areias), em meio a solos pouco permeáveis de comportamento não-drenado (argilas), e também camadas delgadas de argila em meio a pacotes arenosos (Robertson et al. 1986). Os resultados da medida da poro-pressão são fortemente influenciados pela posição do sensor ( $u_1$ ,  $u_2$  ou  $u_3$ ), conforme já mostrado na Figura 3.2, e os valores têm sido correlacionados com o histórico de tensões (Kulhawy et al, 1989), permeabilidade, entre outros, conforme algumas correlações que serão mostradas a seguir no item 3.4. Detalhes sobre a medição e interpretação dos parâmetros do ensaio de dissipação são apresentados no item 3.4.3.

O funcionamento e a resposta do sensor de poro-pressão estão intimamente ligados às características do fluido e às condições de saturação do elemento filtrante (Larson 1995; Elmgren, 1995). Segundo Lunne et al. (1997) o fluido de saturação deve ser incompressível e respostas deficientes da poro-pressão estão freqüentemente associadas a problemas de saturação da cavidade filtrante.

#### *Fluidos de saturação alternativos*

Em perfis de solos tropicais, muitas vezes o nível d'água é profundo, sendo necessário a realização de pré-furos até atingi-lo, para que se consiga um registro confiável de poro-pressões durante a cravação do piezocone e no ensaio de dissipação. Isso reduz as vantagens do emprego dessa ferramenta, uma vez que os ensaios tornam-se mais demorados e caros. Para contornar esse problema alguns pesquisadores (Larson, 1995; Elmgren, 1995; Mulabidic, 1998) têm estudado o uso de um filtro tipo cavidade preenchido com graxa automotiva, em substituição ao processo convencional de saturação do piezo-elemento.

Larson (1995) cita diversos exemplos de perfis onde as técnicas convencionais falharam e a técnica de filtro de cavidade preenchido com graxa produziu resultados

interessantes de perfil de poro-pressão. O autor considera que existem variações nos resultados da poro-pressão com a variação dos fluídos, no entanto, o tipo de graxa deve ser padronizado. Considera ainda que esta técnica é apropriada para locais agressivos ao elemento poroso convencional, como argilas rijas com cascalhos.

O uso da graxa resulta em um processo de preparação mais fácil e menos suscetível a erros, e mesmo durante a penetração Larson (1995) identificou que este sistema garante melhores medidas mesmo quando atravessa zonas e camadas com poro-pressão negativa. Este mesmo autor, em ensaios laboratoriais aplicando pressão no filtro de cavidade preenchido com graxa, identificou que existe um atraso no início da leitura até um certo limite, a partir do qual as leituras respondem. Respostas semelhantes foram identificadas em estudos laboratoriais, relatados preliminarmente em Mondelli (2001). Larson (1995) avaliou resultados de ensaios de piezocone com graxa e identificou que existe uma diferença de pressão entre o interior e o exterior do cone, necessária para a transmissão da pressão da graxa ao sensor, sugerindo que este valor é da ordem de 20 kPa para as graxas universais a temperatura ambiente. Este autor indica ainda que o uso da graxa pode reduzir o nível de detalhamento do resultado dos perfis de poro-pressão. O mesmo autor considerou ainda que as correções dos resultados de  $q_c$  e  $f_s$  para o efeito das áreas desiguais não são afetados pelo uso da graxa. Diversos fluidos já foram usados e testados para saturação do elemento filtrante e, entre os principais, Elmgren (1995) cita água, silicone, graxa, gelatina e óleo hidráulico. O autor conclui que o filtro de cavidade preenchido com graxa pode ser utilizado em ensaios que não exijam elevada precisão. Se a precisão for necessária água, gelatina ou glicerina devem ser utilizadas.

Em estudo comparando resultados de ensaios de piezocone, vane test e DMT, Mulabidic (1998) utilizou filtro de cavidade preenchido com graxa comparando-os com ensaios realizados com filtro convencional saturado com glicerina, com resultados apresentados na Figura 3.4. O autor identifica variações nos resultados, com alguns picos positivos elevados nas crostas ferruginosas mais superficiais, atribuindo também possíveis diferenças a heterogeneidades locais em função da posição das sondagens. Conclui que o uso corrente do filtro de cavidade preenchido com graxa depende de pesquisas adicionais.

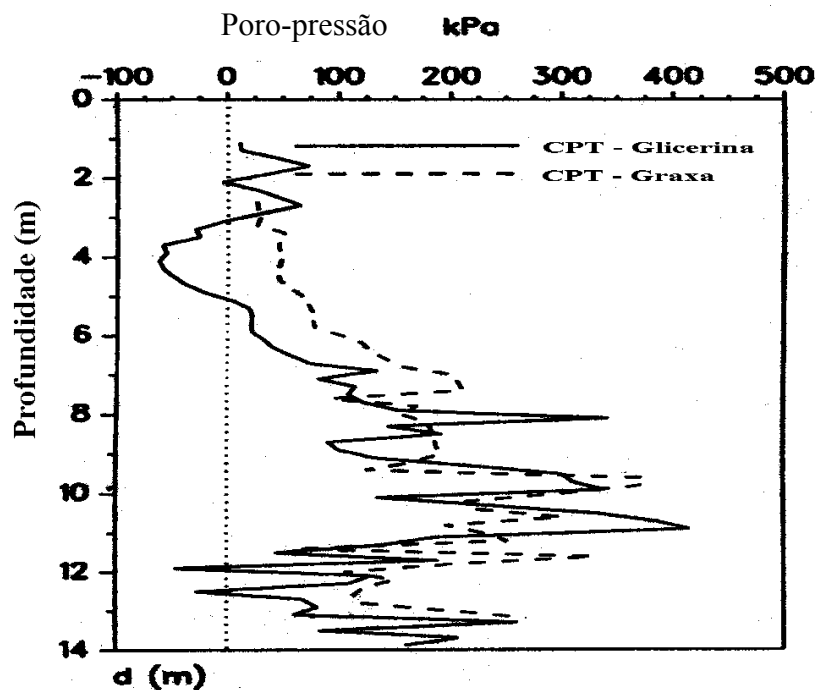


Figura 3.4 – Resultado de perfil de poro-pressão, comparando o uso da graxa e glicerina, como elementos de saturação, em dois ensaios contíguos. (Mulabidic, 1998)

### 3.2.3 – Piezocone de resistividade elétrica (RCPTU)

#### 3.2.3.1 – Considerações gerais

O uso do ensaio de piezocone de resistividade (RCPTU) nas investigações foi introduzido em 1977 no Delft Soil Mechanics para avaliar a densidade do solo em campo e a porosidade de areias e siltes (de Graff & Zuidberg, 1985). A empresa americana Fugro-McClelland utiliza um sistema de dois eletrodos para avaliar o potencial de corrosão do solo e para detecções de contaminações da água subterrânea. Existem diversos sistemas com geometria de eletrodos distintos, descritos a seguir.

Strutynsky et al. (1992) avaliam criticamente o uso do ensaio RCPTU na detecção de hidrocarbonetos em solos granulares saturados, mostrando a importância da coleta de amostras de água e solo para validação dos resultados, e a complementação com outros ensaios de campo, principalmente em locais com estratigrafia com geometria complexa. O mesmo autor, em outro trabalho (Strutynsky et al 1992) mostra os benefícios do uso dos



métodos geofísicos elétricos de superfície, da perfilagem com ensaio RCPTU e das coletas nas zonas anômalas, para os estudos de plumas de contaminação.

### 3.2.3.2 Princípio de funcionamento e medida

A medida da resistividade do solo, utilizando o piezocone de resistividade, inicia com a obtenção da resistência elétrica do solo, conforme eq. (1).

$$R=V/I, \text{ onde } V= \text{vtagem e } I= \text{corrente elétrica} \quad (1)$$

Para um mesmo arranjo de eletrodos existe uma relação linear, obtida em laboratório, que relaciona resistência (R) e resistividade ( $\rho$ ), que segundo Campanella & Weemeees, (1990) pode ser obtida pela eq. (2).

$$\rho = K. R \quad (2)$$

### 3.2.3.3 Geometria do RCPTU

A medida da resistividade elétrica do solo, deve considerar as diversas variáveis que interferem na medição do parâmetro. No caso dos piezocones de resistividade, a geometria dos eletrodos é de fundamental importância na avaliação e entendimento dos resultados. Sistemas com 2 eletrodos (corrente contínua) resultam em problemas com a polarização do sistema que pode interferir nos resultados. Os sistemas com 4 eletrodos podem operar a baixas frequências sem o efeito da polarização. A ASTM (1982) sugere que a frequência de medição de resistividade situe-se na faixa de 25 a 3000 Hz. Pequenas distâncias entre eletrodos permitem a detecção de camadas mais finas, porém a corrente elétrica circula na área que sofreu maior perturbação, mostrando que a o adensamento do solo produzida pela penetração do cone afeta as medidas de resistividade (Campanella & Weemes, 1990). Para maiores espaçamentos dos eletrodos a resolução vertical diminui, porém os resultados da resistividade são mais precisos porque a corrente elétrica circula na região menos perturbada do solo. O cone utilizado pela UBC (Davies & Campanella, 1995) é construído com 4 eletrodos, conforme indicado na Figura 3.5. Este sistema funciona com cabo, que

além de receber as informações dos diversos sensores do RCPTU, alimenta o sistema de resistividade, sendo possível controlar a intensidade e a frequência da corrente elétrica.

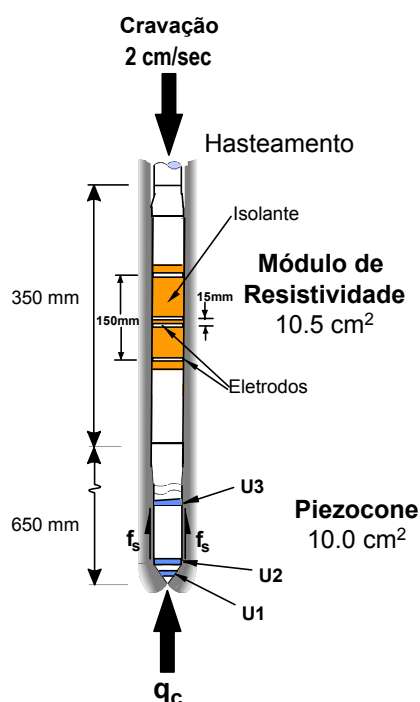


Figura 3.5 – Exemplo de Piezocone de Resistividade (Davies & Campanella, 1995).

Os ensaios normalmente são conduzidos a frequência 1000 Hz, para evitar polarização e permitir a avaliação da constante dielétrica. A corrente aplicada normalmente é pequena, da ordem de 150  $\mu\text{A}$ , e o potencial medido entre os eletrodos deve ser amplificado para transmissão até a superfície do terreno. Em solos de resistividades muito altas deve-se utilizar intensidade de corrente mais baixa que em solos com resistividades mais baixas.

Outro sistema que mede a resistividade do solo através da penetração de cone foi desenvolvido pela empresa Geoprobe (Christy et al, 1994). O sistema utiliza uma ponteira cônica com 4 eletrodos, mostrado na Figura 3.6. Estes podem ser utilizados em dois diferentes tipos de arranjo, conforme indicado na Figura 3.7. O primeiro, tipo Schlumberger, similar ao arranjo Wenner, porém com espaçamento entre os eletrodos diferente. A corrente é transmitida para o solo entre os eletrodos extremos superior e inferior, e é medida através da diferença de voltagem entre os dois eletrodos centrais,

sendo que o resultado é simplesmente uma constante multiplicada pela razão entre a corrente e a voltagem.

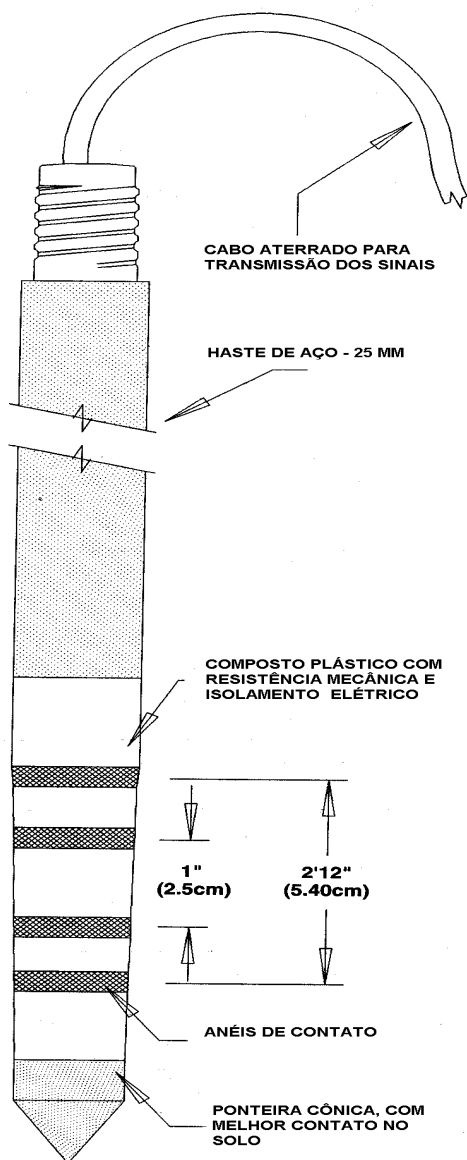


Figura 3.6 - Sistema Geoprobe de medição da resistividade elétrica do solo, que utiliza uma ponteira cônica com 4 eletrodos (Christy et al., 1994).

O sistema utiliza a relação entre a constante dielétrica do solo e o teor de umidade, que é conhecida como equação de Topp e não é muito influenciada pelo tipo de solo e resistividade, desde que as medições da dieletricidade sejam feitas acima de uma frequência típica. O teor de umidade do solo, ou percentagem volumétrica de água no solo, é determinada através do deslocamento da frequência de um sinal de excitação de alta

Na segunda alternativa de medição, o arranjo é do tipo dipolo utilizando somente os dois eletrodos superiores, por onde passa a corrente elétrica e onde é medida a voltagem. De forma oposta ao arranjo Schlumberger, o arranjo dipolo não responde linearmente às variações da condutividade do solo. O arranjo dipolo fornece melhor detalhamento do perfil porém exige um perfeito contato dos eletrodos com o solo. O sistema da Geoprobe é de excelente qualidade, porém mais restrito que os demais em função de não estar acoplado a um piezocone, medindo somente as características elétricas do solo.

Outro sistema que conjuga o piezocone com medições de resistividade é denominado de SMP (Soil Moisture Probe), desenvolvido por empresas privadas e pelo exército norte-americano, hoje comercializado pelas empresas Vertek (USA) e Geomil (Holanda).

freqüência, quando ele passa através do solo. São utilizadas normalmente freqüências de 100 MHz, e as medidas de resistividade e de dieletricidade aparente são feitas simultaneamente.

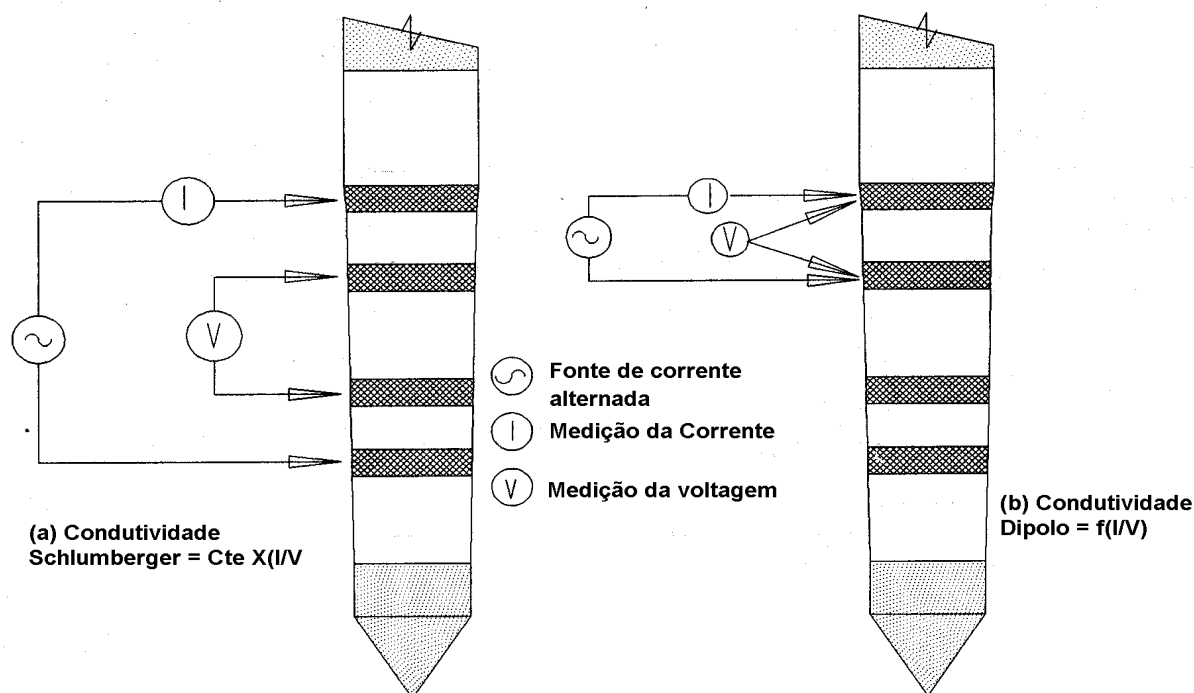


Figura 3.7 – Diferentes arranjos de eletrodos em uma mesma ponteira – Schlumberger e Dipolo (Christy et al., 1994).

#### 3.2.3.4 Interpretação e aplicação das medidas de resistividade no solo

A resistividade do solo em campo é influenciada por diversos fatores, como a geometria dos estratos, resistividade das partículas sólidas, resistividade do fluido capilar, porosidade, grau de saturação, temperatura e tortuosidade. O uso da fórmula de Archie (1942) citada em Daniel et al. (1999) e Campanella and Weemees (1990) é uma simplificação que procura relacionar a resistividade do solo aos seus diversos componentes. Ela é válida na situação em que a resistividade dos fluidos seja baixa e que exista uma pequena quantidade de argila no solo.

Ainda Campanella e Weemees (1990) afirmam que os métodos de geofísica de superfície requerem entre 5 e 10% de contraste entre os meios para mapear uma pluma

adequadamente, e o uso do RCPTU pode medir contrastes de resistividade de até 1%, fornecendo simultaneamente indicações sobre a mudança de camadas. Neste sentido, o uso combinado dos dois métodos permitiria um detalhamento das plumas de contaminação, sendo a geofísica de superfície responsável por delimitar a extensão areal de uma determinada contaminação e o RCPTU responsável por definir a estratigrafia e a posição mais precisa dos estratos efetivamente contaminados.

### 3.2.4 – Piezocone sísmico (SCPTU)

O piezocone sísmico conforme utilizado atualmente, foi idealizado inicialmente por Campanella et al. (1986) com um sensor adicional a ser utilizado na Tecnologia do Piezocone. Os sistemas podem apresentar variações locais, como o uso de geofones, acelerômetros, diferentes fontes de aplicação de energia, entre outros, porém mantendo os princípios básicos (Butcher & Powell, 1996). A obtenção do Módulo de Cisalhamento Máximo ( $G_0$ ) é feita com base na Teoria da Elasticidade, conforme a equação (3).

$$G_0 = \rho V_s^2, \quad (3)$$

onde  $\rho$  = massa específica natural,  $V_s$  = velocidade da onda cisalhante.

A rigidez é útil em projetos de fundações com cargas vibrantes, fundações em áreas sujeitas a sismos e problemas estáticos de fundações rasas e profundas (Mayne, 2001). Pesquisas recentes (Giacheti, 2001) mostram que a rigidez a baixa amplitude pode ser um critério para identificar solos estruturados ou cimentados típicos das regiões tropicais.

A utilização de medidas geofísicas na obtenção de parâmetros geotécnicos cresceu sensivelmente em função de duas constatações, conforme mostradas por Matthews et al (1996): o comportamento tensão-deformação de muitos solos é significativamente não linear, com elevados valores de rigidez para pequenos níveis de deformação e as deformações do terreno, no entorno de estruturas em campo, são previstas satisfatoriamente utilizando formulações não-lineares e elevada rigidez inicial.

A propagação de ondas sísmicas ocorre a níveis de deformações cisalhantes muito baixos, menores do que 0,001%, tornando-as adequadas para obter o Módulo de Cisalhamento Máximo ( $G_0$ ) através da interpretação das ondas sísmicas. A Figura 3.8

mostra a faixa de variação do módulo de cisalhamento para diferentes níveis de deformação. Segundo Butcher & Powell (1996) estimativas da rigidez do terreno podem ser obtidas por três técnicas de campo distintas. A primeira é a interpretação das ondas Rayleigh, que migram próximo à superfície a partir de uma fonte vibratória contínua ou por impactos no solo. As duas outras técnicas se utilizam da interpretação da componente cisalhante das ondas sísmicas em arranjos denominados de “cross-hole” e “down-hole”, conforme o posicionamento dos geradores e receptores de ondas. Técnicas convencionais utilizadas para obtenção da rigidez são os ensaios de campo em placas, os ensaios triaxiais e de coluna ressonante, em laboratório. Os ensaios sísmicos em campo mostram sensíveis vantagens por trabalharem a baixos níveis de deformação, obterem parâmetros médios que reduzem os efeitos da variabilidade do maciço e por evitarem os inconvenientes dos processos de amostragem necessários aos ensaios laboratoriais. A Figura 3.9 mostra alguns exemplos das alternativas de disposição da fonte e dos geofones para determinação do módulo de cisalhamento máximo.

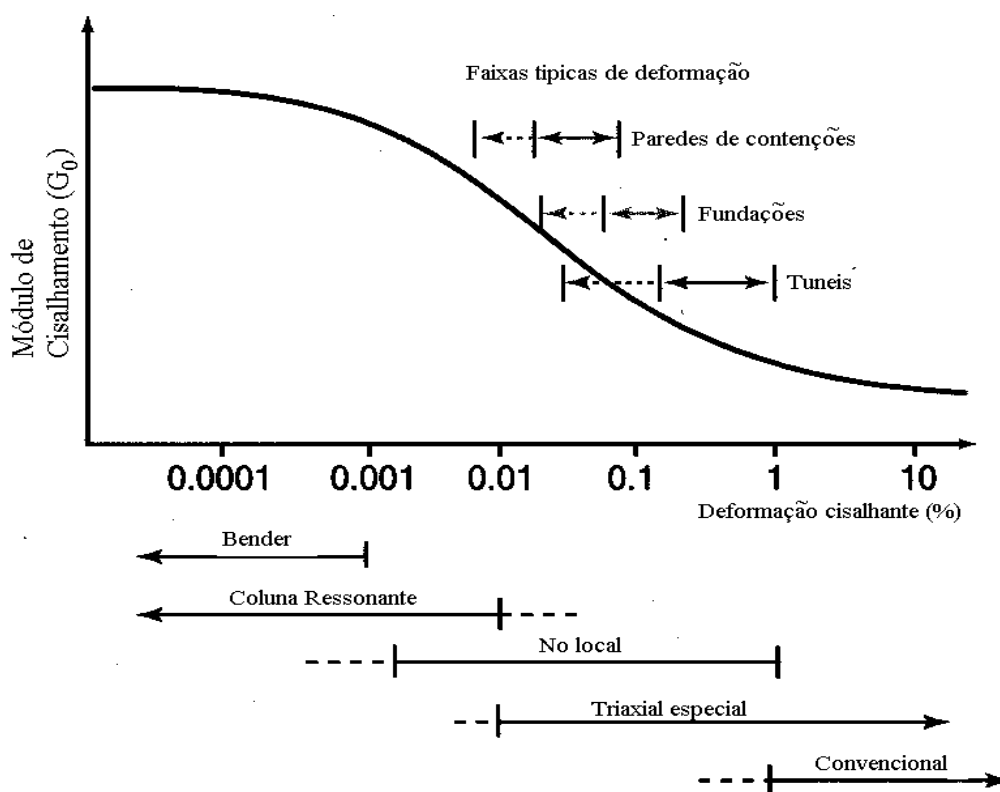
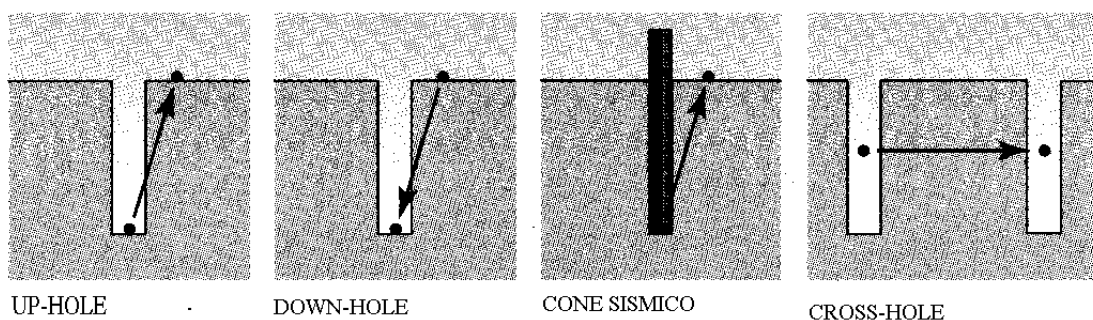


Figura 3.8 – Variação da rigidez do solo em função da deformação (Butcher & Powell, 1996)

O piezocone sísmico combina o resultado da medida da velocidade sísmica do ensaio de “down-hole” com os resultados de  $q_c$ ,  $f_s$  e  $u$ , reduzindo desta forma os custos,

aumentando a eficácia e a qualidade da investigação. A Figura 3.10 mostra o diagrama dos acessórios necessários a execução do ensaio de piezocone sísmico, mostrando um sistema com dois geofones. Conforme descrevem Campanella et al. (1986) as medidas das velocidades sísmicas devem ser feitas em intervalos de 1 m com precisão suficiente para identificar a diferença de velocidade da onda em dois metros sucessivos, no método denominado de pseudo-intervalos de tempo, que exige equipamento de alta resolução, elevada taxa de amostragem e um “trigger” rápido e repetitivo.

#### MÉTODOS INTRUSIVOS



#### MÉTODOS DE SUPERFÍCIE

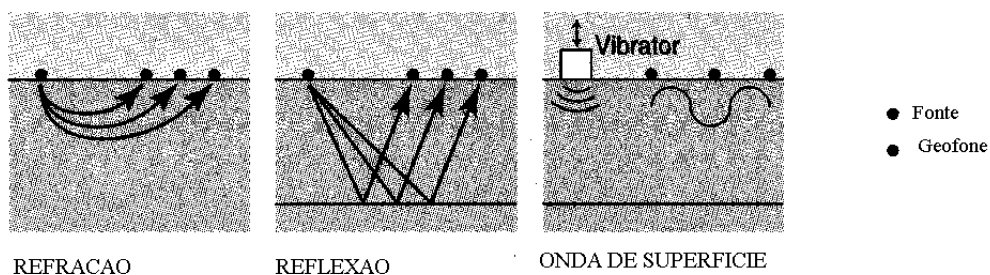


Figura 3.9 - Métodos sísmicos para determinação do módulo de cisalhamento do solo (Matthews et al, 1996):

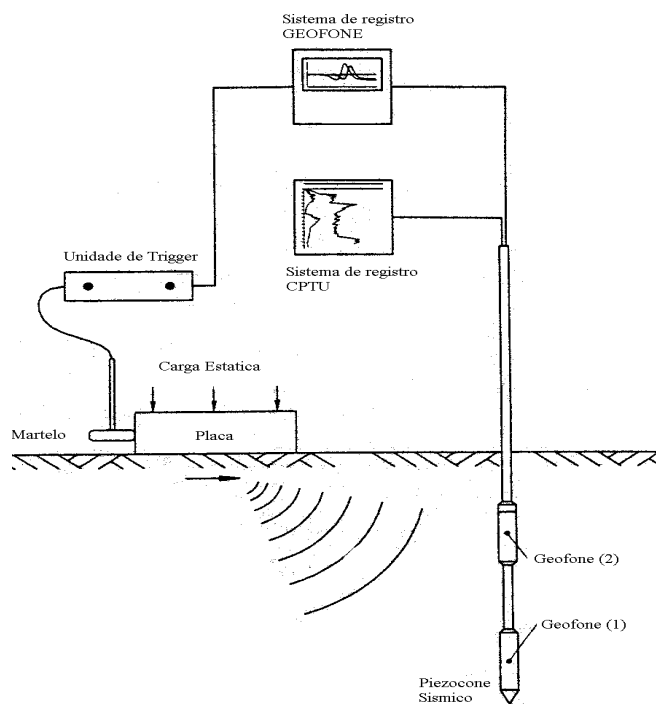


Figura 3.10 – Representação dos componentes e seus posicionamentos, necessários para aquisição dos dados no ensaio de piezocone sísmico. (Jacobs & Butcher, 1996)

Jacobs & Butcher (1996) utilizam um sistema com dois geofones e espaçamento de 1 m, tornando as determinações mais precisas, pois utilizam a mesma onda para a medida de dois intervalos de solo distintos. A onda cisalhante tem a característica importante de ser polarizável, o que permite a geração de ondas com polarização oposta variando somente a direção do impacto do martelo na placa. Como resultado se tem dois registros opostos para uma mesma posição do geofone, o que facilita a identificação do tempo de chegada das ondas no receptor (Figura 3.11). Outro aspecto que interfere na qualidade do dado sísmico é a posição de geração da onda cisalhante. Butcher & Powell (1996) mostram que a posição ideal é de cerca de 0,40 m afastado do eixo do cone, distância suficiente para evitar a migração da onda pelas hastes e próxima o suficiente para não provocar amortecimento ou refração. A Figura 3.12 compara resultados de medidas de velocidades sísmicas para diferentes distâncias de afastamento.



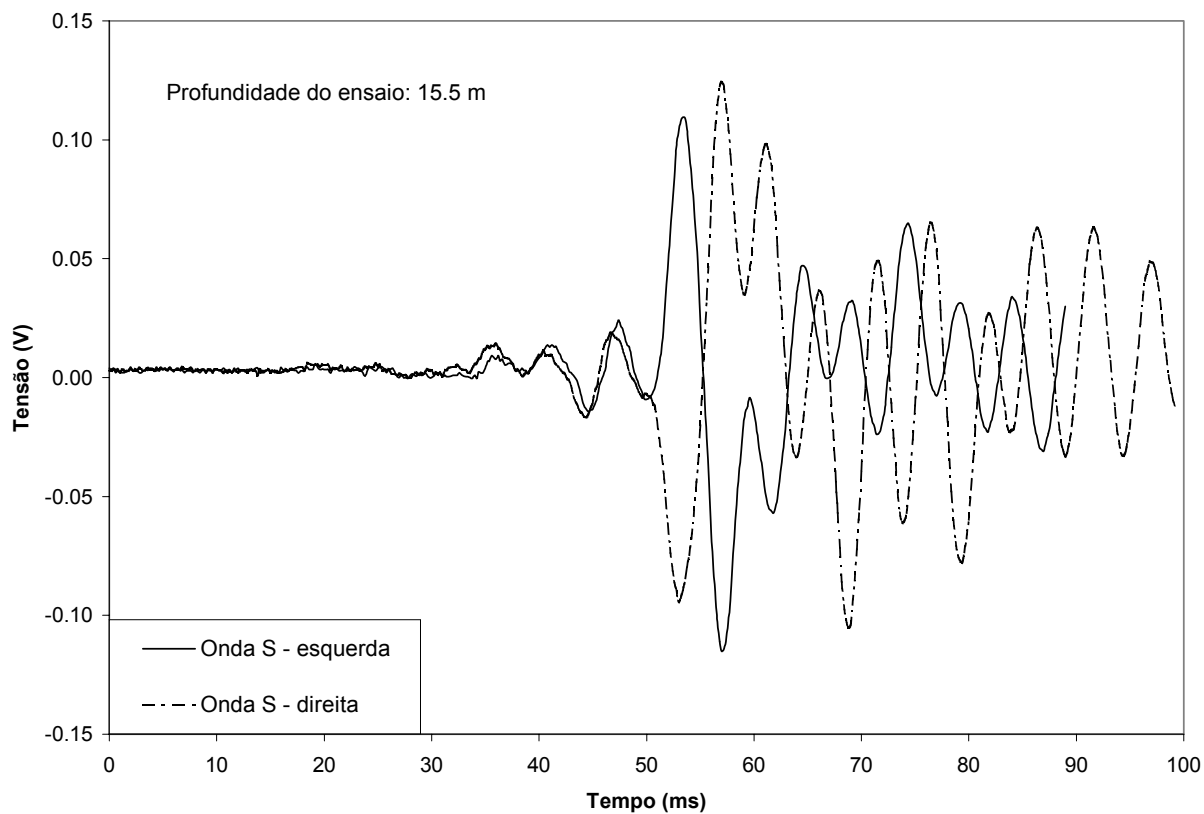


Figura 3.11 – Registro de ondas cisalhantes (S), indicando polarização e primeiro cruzamento (Giacheti, 2005).

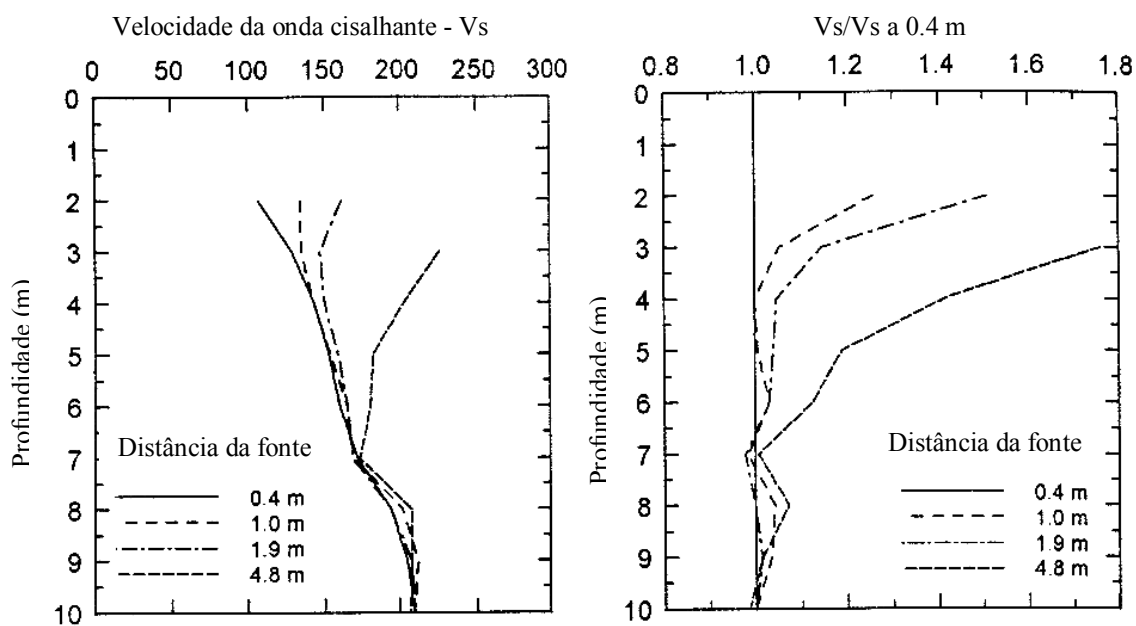


Figura 3.12 – Comparação de velocidades sísmicas em ensaios “down-hole”, com diferentes afastamentos da fonte (Butcher & Powell, 1996).

Para Matthews et al (1996) os vários modos de propagação da energia sísmica (cisalhante, compressional e rayleigh) induzem diferentes níveis de deformação no terreno. Nos solos que exibem comportamento anisotrópico os parâmetros derivados dos dados sísmicos dependerão do modo e direção de propagação das ondas. A Figura 3.13 mostra o resultado de ensaios sísmicos em três perfis distintos, indicando a amplitude de variação dos resultados em função do método de obtenção da velocidade sísmica. Na Figura 3.14 são mostrados resultados de ensaios de “cross-hole” (CBT), coluna ressonante (RC) e cone sísmico (SCPT), indicando a equação do modelo proposto por Owsianka (1988, apud Jacobs & Butcher , 1996) para previsão de movimentos verticais de fundações na argila de Londres.

Aspecto de grande importância na interpretação dos ensaios sísmicos são os métodos de tratamento dos dados para obtenção da velocidade da primeira onda. Campanella et al (1986) recomendam o uso do método denominado de pseudo-intervalos de tempo, que exige equipamento de alta resolução, elevada taxa de amostragem e um “trigger” rápido e repetitivo. As medidas das velocidades sísmicas devem ser feitas em intervalos de 1 m com precisão suficiente para identificar a diferença de velocidade da onda em dois metros sucessivos.

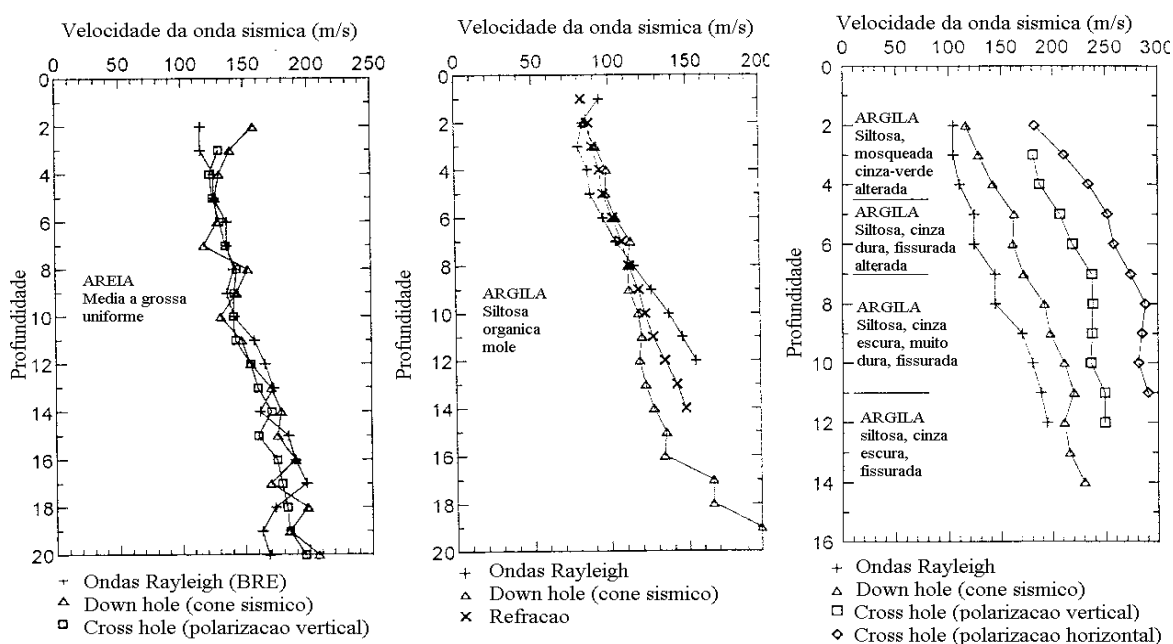


Figura 3.13 – Resultados de ensaios sísmicos em diferentes perfis e com diferentes métodos (Butcher & Powell, 1996)

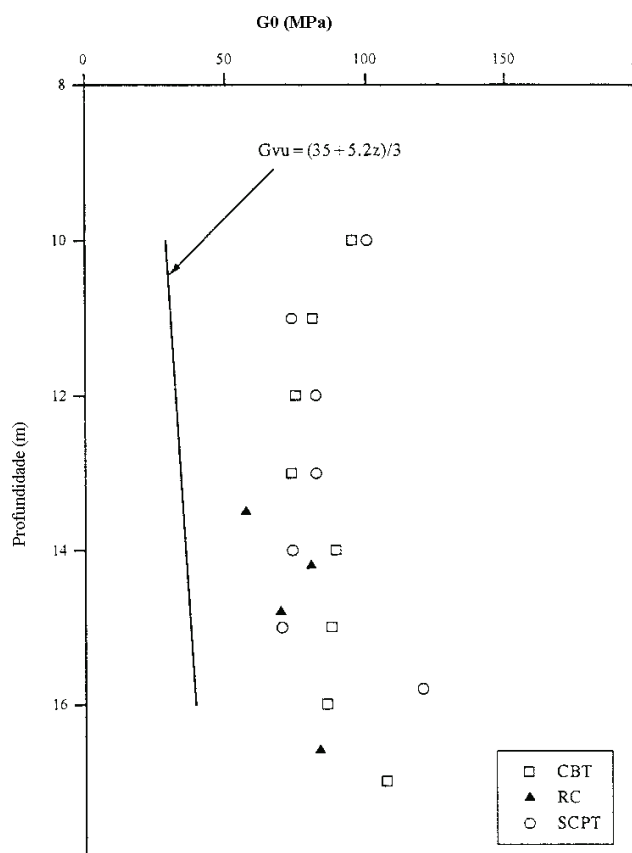


Figura 3.14 – Comparação entre resultados de ensaios de campo e laboratório para determinação dos valores do Módulo de Cisalhamento Máximo (Jacobs & Butcher, 1996).

Kim et al. (2004) avaliam diversos métodos de tratamento das medições de velocidade sísmica em ensaios “down-hole”, para obtenção de perfis confiáveis da velocidade da onda cisalhante ( $V_s$ ). Analisam o método direto, o método dos intervalos, o método dos intervalos modificados e o método do caminho do raio (Lei de Snell) proposto pelos autores. Os resultados mostram que nas situações onde exista uma interface de um material mole (de baixa velocidade sísmica) e um material duro (de alta velocidade sísmica) a onda refrata, e a falta de correção pelos princípios da Lei de Snell, implica em erros substanciais na identificação dos tempos de primeiras chegadas das ondas S. Este fator ganha importância com o aumento da distância horizontal entre fonte e geofone, que normalmente varia de 0.4 a 4.0 m, sendo mais frequente as próximas a 1 m.

### 3.3- Tratamento dos dados e apresentação dos resultados

Os resultados do ensaio de piezocone são obtidos digitalmente a partir da leitura dos diversos sensores disponíveis. A confiabilidade e precisão dos dados dependem, entre outros, das correções que devem ser efetuadas nos resultados obtidos no ensaio. Segundo Senneset et al (1989) as correções podem ser dividida em três tipos principais:

- correções devidas à calibração dos sensores,
- correções devidas à posição relativa dos sensores,
- correções devidas à normalização dos resultados.

Todos os sensores do piezocone devem ser calibrados quando novos ou quando recuperados, e conferidos periodicamente para verificação da acurácia e precisão das leituras. Segundo Lunne et al (1997) as calibrações dos sensores de resistência de ponta, atrito lateral local e poro-pressão, são feitas tendo como referência dispositivos precisos e aferidos. A calibração dos sensores consiste em aplicar um esforço e medir as forças ou as pressões simultaneamente na leitora do sensor e em um sistema independente de referência. Os resultados das calibrações, quando dentro das faixas especificadas pelas normas, devem ser aplicados aos resultados dos ensaios realizados no campo. Lunne et al (1997) indica os detalhes e as periodicidades das calibrações e aferições, bem como os limites de aceitabilidade dos resultados. Além da calibração dos sensores, devem ser obtidas as características geométricas do cone que incluem diâmetro, ângulo da ponta, rugosidade, entre outros. Um parâmetro de grande importância no ensaio de piezocone, principalmente em solos moles, é a relação de áreas desiguais de cada piezocone. É indicado pela letra  $a$  e representa a relação das diferentes áreas entre a porção interna e externa do piezocone, mostradas na Figura 3.15, e indicadas como  $A_N$  e  $A_f$ . A correção para o efeito das áreas desiguais é aplicada ao resultado da resistência de ponta ( $q_c$ ), resultando na resistência de ponta corrigida ( $q_t$ ), dada pela eq. (4).

$$q_t = q_c + u_2 (1-a), \quad (4)$$

$q_c$  = Resistência de ponta medida

$u_2$  = Poro-pressão medida na base do cone

$a$  = relação de áreas desiguais

A correção para a relação de áreas desiguais torna-se muito importante em solos que apresentam  $q_c$  baixo e  $u_2$  alto, principalmente argilas moles saturadas.

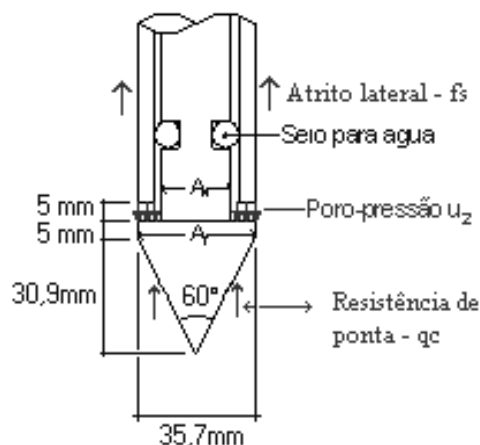


Figura 3.15 – Geometria da ponta do piezocone, com indicação das áreas desiguais  $A_N$  e  $A_T$ .

As correções com relação a posição dos sensores são necessárias devido a própria geometria do piezocone, pois dados registrados simultaneamente durante o ensaio não representam informações provenientes de uma mesma posição. Os valores a serem aplicados a estas correções dependem da geometria e da interpretação teórica do ensaio (Robertson et al. 1986). O sensor de ponta ( $q_c$ ) é considerado posição de referência. O sensor de poro-pressão, apesar de estar um pouco deslocado da ponta, cerca de 5 mm, também não é convencionalmente corrigido. Já, para o sensor de atrito lateral ( $f_s$ ) são necessárias correções de posição, que segundo Robertson et al.(1986) e Jaksa et al. (1997), devem considerar 100 mm de deslocamento.

As correções devidas à normalização são geralmente executadas com objetivo de comparar resultados em diferentes condições de profundidade, identificando propriedades com forte controle e tendência marcante, normalmente sob efeito da tensão vertical efetiva, produzida pelo solo acima da profundidade de ensaio. A identificação e retirada das tendências dos dados, é importante quando da aplicação de tratamentos estatísticos aos resultados do ensaio de piezocone, de forma a garantir a estacionaridade dos dados.

Os principais parâmetros para interpretação dos ensaios de piezocone são indicados abaixo, com base na proposta de Senneset et al (1989). A Figura 3.16 indica a notação gráfica dos elementos básicos do resultado do ensaio.

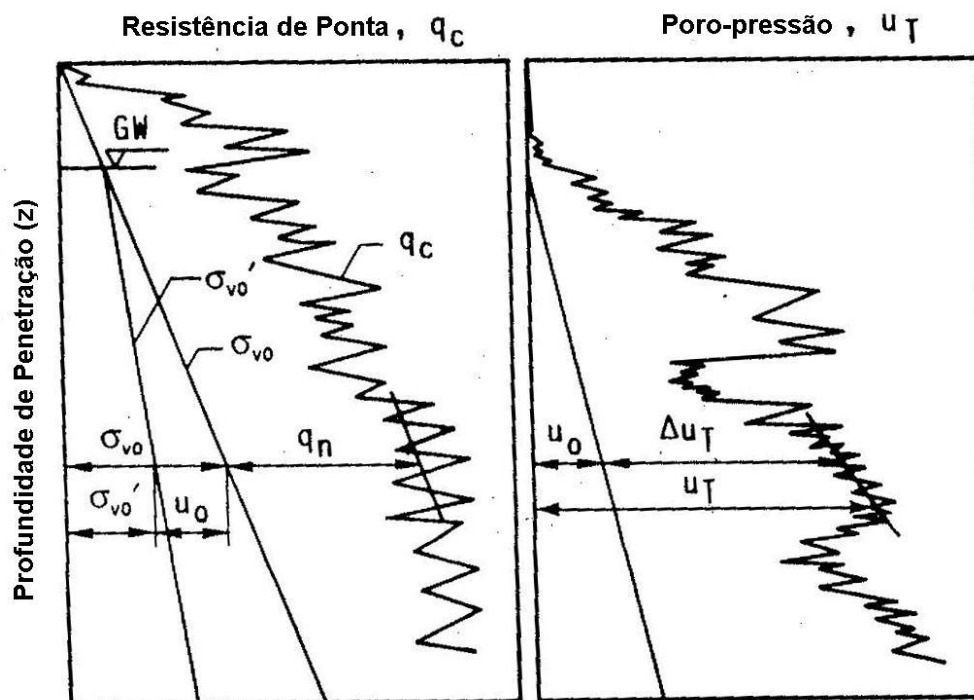


Figura 3.16 – Notação gráfica dos elementos básicos do resultado de um ensaio de piezocone, conforme Senneset et al. (1989)

São definidos, a seguir, outros importantes parâmetros que ajudam na interpretação do resultado do ensaio de piezocone.

#### *Razão de Atrito*

A razão de atrito é definida como a razão entre o atrito lateral ( $f_s$  ou  $f_t$ ) e a resistência de ponta ( $q_t$  ou  $q_c$ ) corrigida, em %, conforme as equações (5a,b,c)

$$R_f = \frac{f_s}{q_c} \cdot 100, \quad R_f = \frac{f_t}{q_t} \cdot 100 \quad \text{ou} \quad \frac{f_s}{q_t} \cdot 100 \quad (5a,b,c)$$

#### *Poro-pressão de campo - $u_0$ (kPa)*

Também conhecida como poro-pressão hidrostática, em um determinado nível do solo, que é integrada no valor da medição do sensor de poro-pressão durante o processo de penetração do piezocone. Em condições de ausência de fluxo ou confinamento, este valor pode ser obtido através do ensaio de dissipação aguardando-se a dissipação total do excesso de poro-pressão. Neste ponto, o valor medido deve equivar a coluna d'água existente acima do ponto investigado.

### *Registro da Poro-Pressão - $u$ (kPa)*

É a poro-pressão medida durante a penetração, dada pela eq. (6).

$$u = u_0 + \Delta u \quad (6)$$

sendo  $u$  a poro-pressão correspondente a área do filtro que se localiza na base do piezocone.

### *Excesso de Poro-Pressão - $\Delta u$*

É dada pela diferença entre  $u$  e  $u_0$ , que pode ser negativa ou positiva, dependendo das propriedades do solo e também é muito dependente da posição em que o filtro se encontra no piezocone.

### *Razão Diferencial da Poro-Pressão (DPPR e $B_q$ )*

É definida como a razão entre o excesso de poro-pressão ( $\Delta U$ ) e a resistência de ponta do cone corrigida para os efeitos de áreas desiguais ( $q_t$ ) ou apenas pela resistência de ponta do cone ( $q_c$ ), conforme eq. (7).

$$DPPR = \frac{\Delta u}{q_t} \quad \text{ou} \quad DPPR = \frac{\Delta u}{q_c} \quad (7)$$

Segundo Lunne et al (1997), a *Razão de Poro-Pressão* ( $B_q$ ) pode ser escrita conforme eq. (8), quando utilizada para a normalização dos dados com relação a tensão vertical total ( $\sigma_{vo}$ ).

$$B_q = \frac{\Delta u}{q_c - \sigma_{vo}} \quad \text{ou} \quad B_q = \frac{\Delta u}{q_t - \sigma_{vo}} \quad (8)$$

A apresentação dos resultados das leituras dos diversos sensores segue a forma de gráficos da profundidade contra o parâmetro avaliado. Para os sensores convencionais ( $q_c$ ,  $f_s$  e  $u$ ) Robertson et al. (1983) e Lunne et al. (1997), indicam que a forma de apresentação deve ser semelhante aquela indicada na Figura 3.17, onde também é apresentada a classificação dos solos e a subdivisão do perfil. Os resultados, na forma de gráficos devem sempre estar acompanhados dos dados numéricos e do certificado de calibração e aferição do piezocone.

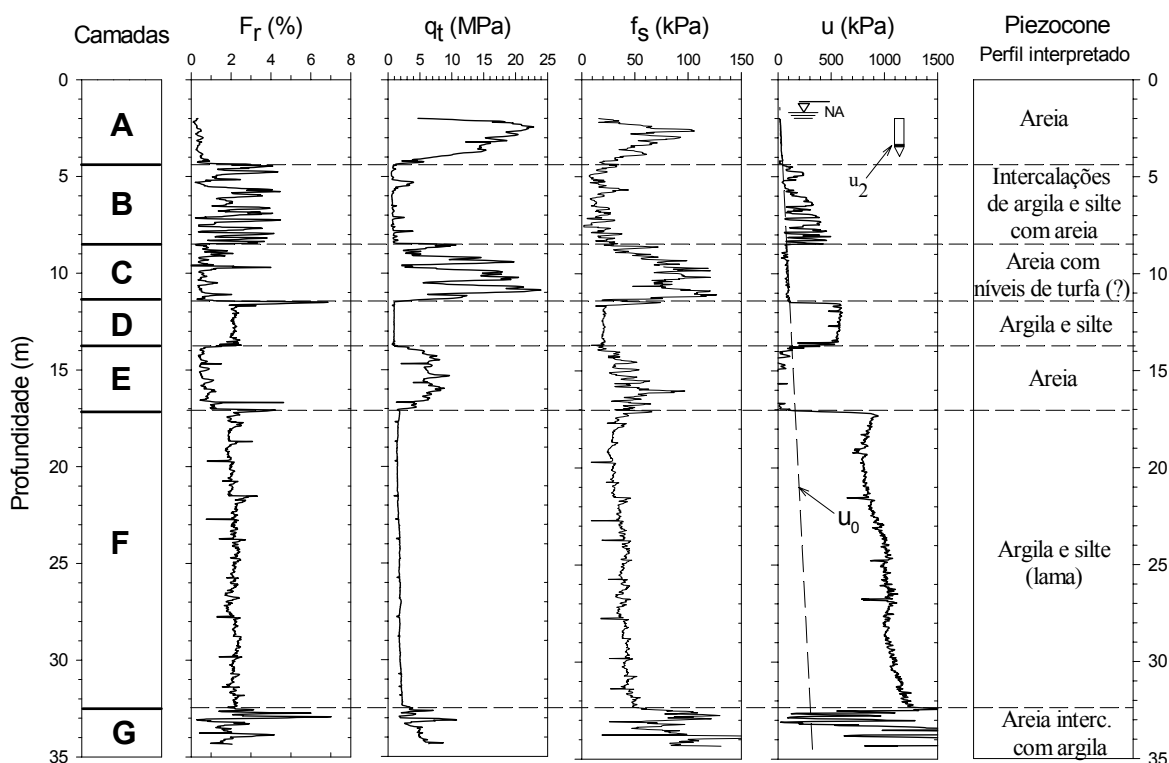


Figura 3.17 – Apresentação de resultado do Ensaio de Piezocone, com os parâmetros:  $R_f$ ,  $q_t$ ,  $f_s$  e  $u$ , com indicação da classificação do solo segundo a proposta de Robertson et al. (1986).

### 3.4 -Uso e interpretação dos resultados do ensaio de piezocone

#### 3.4.1 - As bases teóricas para interpretação do ensaio de piezocone

A introdução de ponteira metálica cônica no solo a velocidade constante provoca mudança sensível no estado de tensões, nas deformações e pressões de água dos poros do maciço no entorno do cone (Baligh,1986b). Esta penetração no solo resulta em um processo combinado de expulsão de um material instantaneamente incompressível e de um decréscimo de volume pela modificação estrutural de solo compressível (De Beer, 1963). A forma e intensidade destes processos dependem das características de deformação de cada tipo de solo. A complexidade destas deformações e da distribuição da pressão da água dos poros tornam as soluções teóricas de difícil aplicação, não existindo até o momento uma solução que modele perfeitamente parâmetros geotécnicos a partir do resultado do ensaio de piezocone (Robertson et al., 1986; Schnaid, 2000). Desta forma, a interpretação do ensaio de piezocone normalmente é feita a partir de calibrações e correlações com



ensaios em laboratório e campo (Wroth, 1984). Considerando os princípios básicos da mecânica dos solos, as interpretações podem ser feitas de forma consistente para, os solos onde a penetração do cone é completamente drenada e para os solos onde essa penetração é completamente não-drenada (Lunne et al, 1996). Os solos intermediários, de comportamento parcialmente drenado, impõem dificuldades adicionais a interpretação dos resultados do ensaio de piezocone. As soluções teóricas também foram desenvolvidas para as condições extremas de comportamento do solo, completamente drenado ou completamente não-drenado, os quais na natureza normalmente aparecem como uma mistura de diversas frações granulométricas.

Os principais métodos teóricos de abordagem do processo de penetração do cone abrangem os métodos de capacidade de carga (Terzaghi, 1943; De Beer, 1977), os métodos de expansão de cavidades (Vesic, 1972), e os métodos das trajetórias de deformação (Baligh, 1985; Baligh, 1986a,b). Existem ainda soluções baseadas no método dos elementos finitos e os métodos de tensão característica, porém ainda pouco desenvolvidos (Campanella & Roberston, 1988). A modelagem do fenômeno da penetração do piezocone no solo, com objetivo de parametrizar o processo, pode ser feita utilizando soluções teóricas, a partir das quais podem ser obtidos os parâmetros de projeto, porém a complexidade das deformações no entorno do cone tem limitado a aplicação dos modelos teóricos na previsão de parâmetros. Informações detalhadas sobre cada um dos modelos teóricos podem ser obtidas em Esquível (1995), Baligh (1986a,b) e Lunne et al (1997).

Houlsby & Teh (1988) consideram a penetração do cone em material homogêneo, como um fluxo estacionário de solo passando por um penetrômetro estático, o que caracteriza uma análise utilizando a trajetória das deformações. Os mesmos autores propõem um novo método de avaliação da consolidação dos solos a partir do ensaio de piezocone, considerando o índice de rigidez do solo. Consideram que as teorias de expansão de cavidades são válidas quando o material deslocado se acomoda por deformação elástica, normalmente a grandes profundidades. Na hipótese de Baligh (1985) devido as severas restrições cinemáticas nas penetrações profundas, as deformações produzidas pela penetração do cone são independentes da resistência ao cisalhamento do solo. Este autor considera que o método de expansão das cavidades falha em não considerar dois aspectos essenciais da penetração vertical: a dependência das deformações na coordenada vertical, pois não se pode identificar a direção precisa de penetração e a condição de penetração estática contínua. O autor considera ainda que os problemas de fundações rasas são controlados pela tensão e os problemas de fundações profundas são

controlados pelas deformações, o que indica que cada método teórico é melhor aplicável a situações específicas de cada projeto e tipo de solo.

Chang et al (2001) aplicando a teoria de expansão de cavidades aos ensaios de piezocone, consideram que os resultados do ensaios são afetados por parâmetros chave, como a resistência ao cisalhamento não-drenada, a razão de sobreadensamento (OCR) e o índice de rigidez (Ir). Desta forma, o resultado do ensaio CPTU pode ser teoricamente utilizado para avaliar estes parâmetros.

Gill & Lehanne (2000) analisam as deformações no entorno de um piezocone com base no método da trajetória das deformações. O conceito fundamental do método é que os campos de deformação produzidos durante o processo de penetração apresentam uma restrição cinemática intensa. Os autores analisam numericamente a variação da viscosidade do fluido, variando também as condições de limite impostas pela penetração do piezocone. Concluem que a elevação da viscosidade aumenta muito a área de influencia da ponteira no solo e acentua os efeitos das condições de contorno, aumentando o volume de solo que influencia o resultado do ensaio de piezocone.

Recentemente Mayne & Burns (2000) propuseram uma solução teórica que combina os métodos de expansão de cavidades com os métodos de capacidade de carga da mecânica dos solos dos estados críticos, para prever e interpretar o comportamento da dissipação da poro-pressão em solos com diversos tipos de argilas, normalmente adensadas e sobre-adensadas. Consideram que as alterações na poro-pressão durante a cravação do piezocone se devem a mudanças na tensão normal octaédrica provocada pelo deslocamento de solo e fluídos, e pela tensão cisalhante octaédrica causada pela deformação cisalhante do solo próximo ao corpo do cone. O modelo apresenta resultados consistentes, com previsão de comportamento da poro-pressão para solos normalmente adensados e também para os solos sobre-adensados, que apresentam comportamento dilatante. Maiores detalhes do modelo e da sua aplicação prática encontram-se no item 3.4.4.3, a seguir.

### 3.4.2 – Correlações em Câmaras de Calibração

A obtenção de parâmetros de projeto, a partir do ensaio de piezocone é normalmente feita com base em experimentos realizados em câmaras de calibração, principalmente com areias (Bellotti et al, 1982; Baldi et al, 1982). Parkin & Lunne (1982) afirmam que as correlações para areias finas, areias siltsas e aquelas com densidade relativa maior que 85 % não fornecem dados confiáveis em ensaios com câmaras de

calibração, com os resultados fortemente influenciados pelas condições de contorno da câmara. Para os solos argilosos, as correlações são feitas com base em outros ensaios, principalmente o ensaio de palheta em campo e os ensaios triaxiais em laboratório.

A partir dos ensaios em câmaras de calibração os principais parâmetros obtidos são a densidade relativa ( $D_r$ ) o ângulo de atrito ( $\phi$ ) e o módulo de deformabilidade confinado ( $M$ ).

Os registros de  $q_c$ , são influenciados pela razão de sobreadensamento (OCR) e da tensão vertical total ( $\sigma_{v0}$ ), porém análises mais detalhadas indicam que o  $q_c$  é uma função da tensão horizontal total ( $\sigma_{H0}$ ), pelo menos até valores de OCR próximos 8 (Parkin & Lunne, 1982; Chapman & Donald, 1981). O aumento na resistência a penetração com o aumento do OCR é essencialmente função do aumento na tensão horizontal, ou proporcional ao seu efeito na tensão total. Parkin & Lunne (1982) concluem que em areias a resistência de ponta pode ser usada para prever a densidade relativa ( $D_r$ ), o ângulo de atrito interno ( $\phi$ ) ou o módulo de deformabilidade confinado ( $M$ ), desde que seja conhecido o OCR (ou a tensão horizontal). Sugere ainda a possibilidade de efeitos de escala em função do diâmetro do cone utilizado na câmara de calibração. A efetiva influência do diâmetro do cone foi detalhada por De Beer (1973) e Gui & Bolton (1998), mostrando que existe uma relação entre diâmetro do cone, diâmetro das partículas e fator escala, que não é linear, porém interfere na definição dos parâmetros de projeto a partir das correlações com os resultados dos ensaios.

As diversas correlações para obtenção de parâmetros geotécnicos, a partir de câmaras de calibração (Baldi et al, 1982; Jamiolkowski et al, 1988), mostraram que não existe uma única e simples relação entre densidade relativa, tensão efetiva e resistência de ponta para as areias. Parkin & Lunne (1982) mostra que esta relação é influenciada pelas condições de contorno das câmaras de calibração. Os diversos estudos em câmaras de calibração fornecem informações sobre a importância relativa dos diversos fatores que influenciam na penetração do cone nas areias, sendo que os dois principais parâmetros que controlam a resistência à penetração em areias quartzosas são a resistência ao cisalhamento e a compressibilidade (Roberston & Campanella, 1983). Os ensaios em câmaras de calibração podem ainda ser executados em modelos de centrífugas onde avaliações de parâmetros, considerando tensões efetivas, podem ser realizadas com maior precisão (Esquivel, 1995). Estes modelos podem ainda ser utilizados para avaliação de protótipos, estudos paramétricos e validação de métodos numéricos.

### 3.4.3 - Correlações entre ensaios de campo e laboratório

A obtenção de propriedades do solo por correlações entre os ensaios de campo e de laboratório tem sido utilizada em larga escala e domina o processo de obtenção de parâmetros de projeto (Parkin & Lunne, 1982; Senneset et al., 1989; Jamiolkowski et al., 1982; Wroth, 1984; Jamiolkowski et al., 1988). No entanto, a obtenção de parâmetros geotécnicos a partir destas correlações embutem incertezas nem sempre conhecidas ou consideradas adequadamente. O primeiro aspecto a se observar é que uma determinada porção de solo só pode ser ensaiada uma única vez e por um único instrumento (Campanella & Wickremesinghe, 1988). Para tornar as correlações entre ensaios mais eficazes é necessário conhecer o grau de variabilidade interno do solo e os erros de modelo das correlações entre ensaios. A obtenção das propriedades do solo, exatamente na condição em que ele se encontra no campo, sem nenhuma perturbação, é praticamente impossível, pois a própria penetração do instrumento de medição ou de amostragem modifica a condição natural do solo. As correlações entre ensaios devem considerar fortemente a modelagem teórica do ensaio e verificar se é coerente com o contexto geotécnico. A obtenção de parâmetros geotécnicos para os diversos tipos de obras exige um conhecimento adequado das características do terreno, do tipo e intensidade das solicitações que cada estrutura provoca e das ferramentas disponíveis para obter estes parâmetros, seja em campo ou laboratório.

A abordagem tradicional da investigação tem sido a perfuração do solo e a obtenção de amostras para ensaios em laboratório. Dificuldades de penetração de amostradores de parede fina, perturbação, transporte e extração da amostra, perda de umidade e modificação no estado de tensão, resultam em amostras de baixa qualidade, que fornecem resultados não confiáveis. Além disto, os ensaios de laboratório são caros e demorados, produzindo informações pontuais.

O entendimento das correlações entre ensaios deve considerar a variabilidade do solo, a posição de cada ensaio e o volume de solo solicitado em cada tipo de ensaio em função das características de deformação de cada tipo de solo. As diferentes variabilidades, em função do volume de solo solicitado, interferem no resultado dos ensaios e em parte são responsáveis pelas diferenças de valores entre resultados de ensaios que pretendem medir um mesmo parâmetro a partir de diferentes processos. Ensaios que solicitam menor volume de solo, como é caso do CPT, registram a micro variabilidade do solo, enquanto

ensaios que solicitam maiores volumes de solo, como os ensaios sísmicos “cross-hole” e “down-hole”, tendem a apresentar menores variabilidades. A Figura 3.18 mostra o resultado de análise de variabilidade utilizando ensaios SCPTU realizados no Kidd2 site, em Vancouver, no Canadá, comparando o coeficiente de variação da resistência de ponta ( $q_c$ ), do atrito lateral ( $f_s$ ) e da velocidade da onda cisalhante ( $V_s$ ) obtida em ensaio down-hole, em 5 ensaios CPTu e 40 determinações de  $V_s$ . Os resultados mostram que a variabilidade do onda cisalhante é muito menor do que em  $q_c$  e  $f_s$ , provavelmente devido às diferenças de volume de solo solicitado, que minimiza o efeito da micro variabilidade do solo. Estes resultados mostram que efetivamente o resultado do piezocone ( $q_c$ ,  $f_s$  e  $u$ ) medem variabilidade das propriedades mecânicas dos solos, com elevado nível de detalhe.

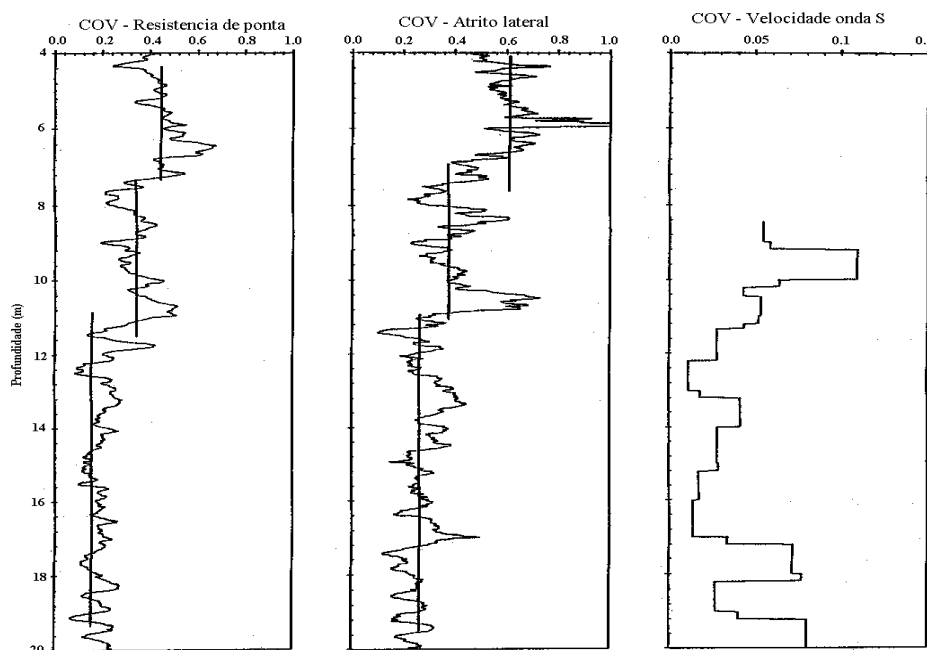


Figura 3.18 – Coeficiente de Variação dos resultados do ensaio de piezocone sísmico, obtidos a partir do resultado de 8 ensaios de SCPTU, Kidd2 Site, em Vancouver, no Canadá (Wilson, 2001).

Assim, o uso dos ensaios de campo, cujos aprimoramentos devem-se a diversos desenvolvimentos tecnológicos recentes, tem crescido substancialmente. No entanto, a prática da engenharia muitas vezes superestima o valor de um único ensaio, como é o caso do SPT, para a avaliação de todos os parâmetros geotécnicos necessários. Isto é irreal e resulta em projetos não-econômicos e pouco eficazes (Mayne & Dumas, 1998). A Figura 3.19 mostra a concepção desejada, porém irreal, de obtenção de diversos parâmetros em um único ensaio. Em oposição, a Figura 3.20 mostra a possibilidade de obtenção de

diversos parâmetros, utilizando diversos tipos de sensores acoplados ao piezocone, durante um único ensaio.

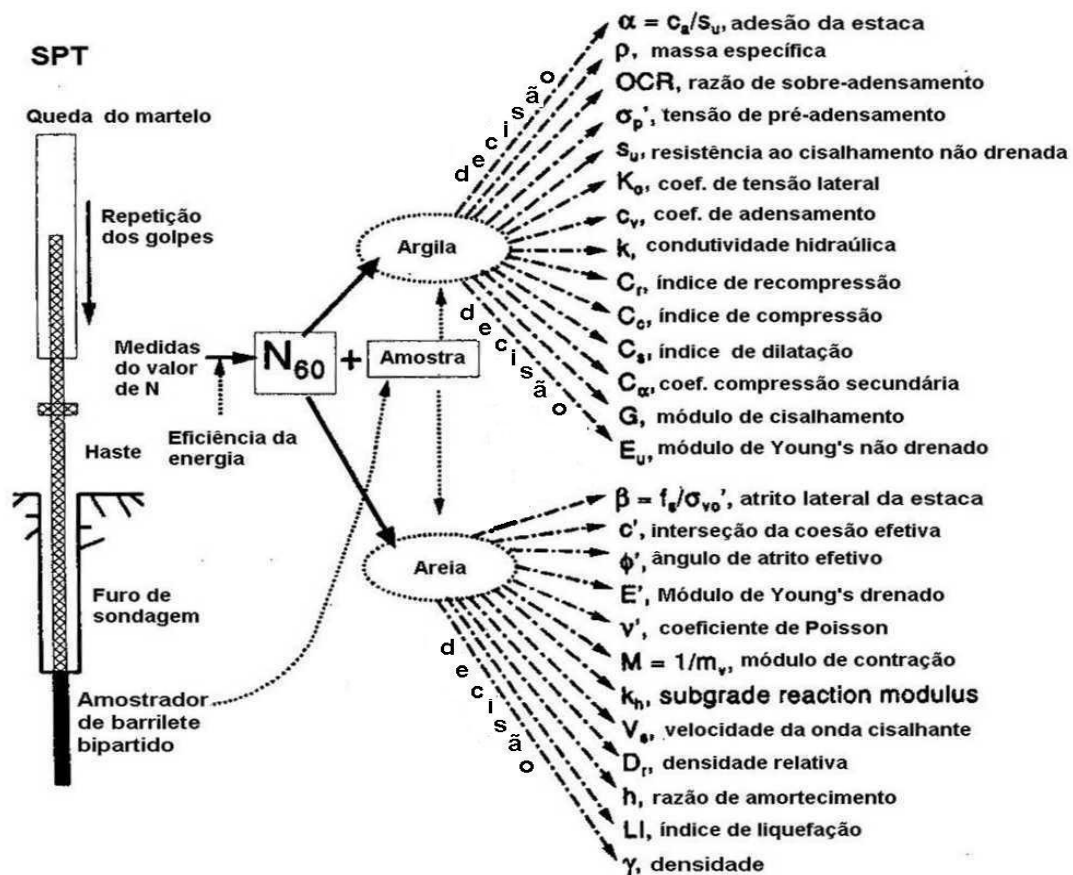


Figura 3.19 - Concepção desejada, porém irreal, de obtenção de diversos parâmetros em um único ensaio (Mayne & Dumas, 1998)

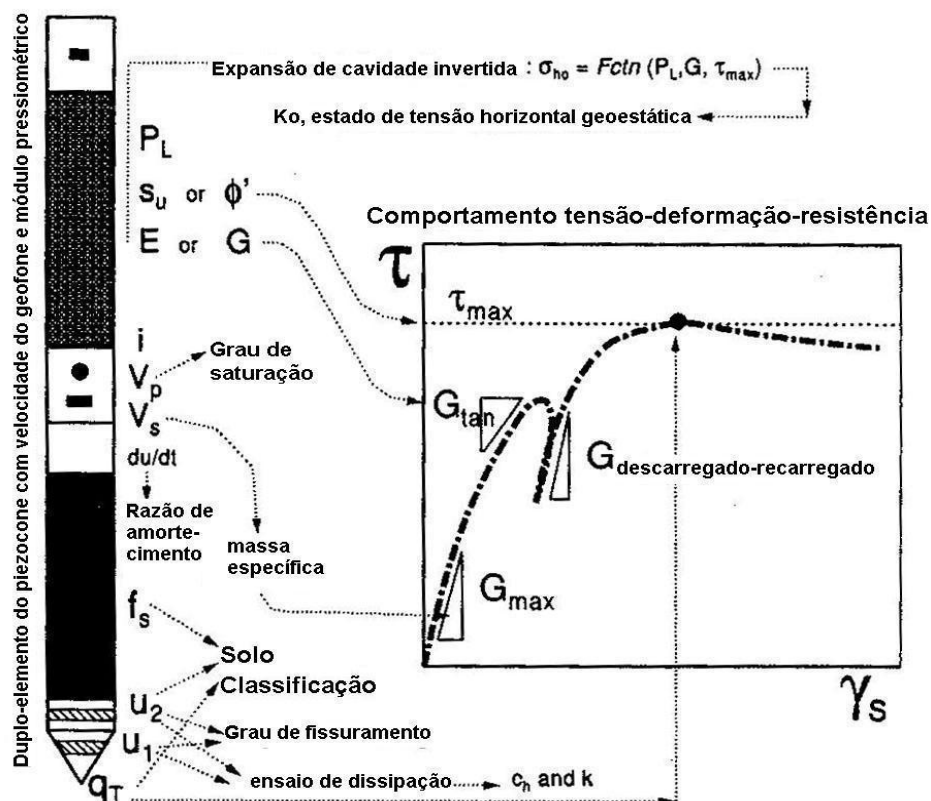


Figura 3.20 - Piezocone mesclando múltiplos sensores – SPCPMT – Mayne & Dumas (1998)

#### 3.4.4 - Estimativa de parâmetros de projeto

A seguir são detalhados os principais parâmetros que têm sido avaliados a partir do ensaio de piezocone, com indicação das correlações mais comuns. Os resultados das correlações devem ser considerados indicativos de comportamento e nunca utilizados para obtenção direta de parâmetros de projeto, o que deve ser feito com base em experiência prévia, características da obra, ensaios específicos e análises probabilísticas, conforme indica Duncan (1999).

A estimativa de parâmetros geotécnicos a partir do ensaio de piezocone se faz na prática através de correlações com dados de laboratório ou ensaios em campo (Jamiolkowski et al., 1988; Senneset et al., 1989; Wroth, 1984; Lunne et al., 1997). A aplicação e validação de determinada correlação, deve considerar a similaridade entre a base de dados ou experimento utilizado para estabelecer a correlação e a similaridade com a condição do solo no qual se pretende aplicar a correlação (Moss, 2003).

No estabelecimento de correlações entre os diversos ensaios é necessário considerar dois fatores básicos:

- a variabilidade interna do maciço de solo;
- grau de correlação entre as variáveis analisadas

O grau de correlação depende do nível de conhecimento do problema e do tamanho e qualidade da base de dados utilizada para definir a correlação. As correlações locais, para solos com mesma origem, história geológica semelhante e extensão areal restrita, tendem a ser mais precisas. O grau de correlação entre as variáveis depende de aprofundamento de pesquisas, enquanto a variabilidade do maciço depende da qualidade e intensidade da investigação.

A tensão vertical efetiva causa, segundo Baldi et al. (1982), uma forte influencia nos resultados do piezocone, tornando freqüente a apresentação de resultados normalizados na obtenção dos parâmetros de projeto. Em solos tropicais Ajayi & Palogun (1988) concluem que a resistência de ponta ( $q_c$ ) não é influenciada pela tensão vertical efetiva. Atribuem este comportamento à saturação parcial e às heterogeneidades estruturais e microestruturais reliquias.

Senneset et al. (1989) avaliam criticamente a obtenção de parâmetros do solo a partir do ensaio de piezocone. Concluem que o ensaio tem excelente capacidade para determinar a estratificação e o tipo de solo, apresentando bom potencial na obtenção de parâmetros de resistência e deformabilidade, porém a utilização corrente depende de uma maior padronização do ensaio e do desenvolvimento de modelos de interpretação mais precisos. Para interpretação de parâmetros os autores sugerem o uso do  $q_t$  e do  $\Delta U$ . É ainda necessário conhecer as condições iniciais de tensão do solo penetrado, representada pela tensão vertical total ( $\sigma_{v0}$ ), a distribuição da poro-pressão inicial ( $u_0$ ) e a tensão vertical efetiva ( $\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_0$ ), conforme já mostrado graficamente na Figura 3.16.

Considerando o nível de deformação provocado pela penetração do piezocone no solo, o estabelecimento de muitas das propriedades geotécnicas torna-se impreciso. Exemplos típicos são as correlações amplamente utilizadas entre módulos de deformabilidade e resistência à penetração estimada a partir do CPTU, que segundo Jamiolkowski et al. (1988) são puramente empíricas e estão sujeitas a limitações nem sempre reconhecidas pelos usuários potenciais, e muitas vezes mal interpretadas. Além



disto, as correlações são formuladas para condições completamente drenadas ou completamente não-drenadas, o que limita o uso extensivo em muitas condições práticas.

Estimativas de parâmetros geotécnicos a partir dos ensaios de penetração podem englobar três grupos distintos de propriedades (Jamiolkowski, et al., 1982; Wroth, 1984): Parâmetros de Estado Inicial, Parâmetros de Deformabilidade e Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento

#### *3.4.4.1 - Parâmetros de estado inicial*

Basicamente estes parâmetros podem ser descritos pelas seguintes informações: tensão inicial vertical ( $\sigma_{v0}$ ) e horizontal ( $\sigma_{H0}$ ), pressão de água nos poros, não necessariamente a hidrostática, índice de vazios inicial ou a densidade relativa, nos solos não-coesivos, pressão de pré-adensamento ( $\sigma'_p$ ) e a razão de sobreadensamento (OCR).

Serão abordados aspectos ligados a obtenção da densidade relativa ( $D_r$ ) e indicadas as limitações para obtenção do  $\sigma_{H0}$  e OCR a partir dos ensaios de penetração do piezocone. As deformações do solo provocadas pela penetração do piezocone se manifestam de forma distinta em função da condição de drenagem do solo (Jamiolkowski et al., 1988). No caso da penetração não-drenada, em solos coesivos moles e saturados, estas mudanças se refletem principalmente no aumento do excesso de poro-pressão, com pouca mudança na tensão efetiva horizontal. Após a dissipação, à tensão efetiva horizontal que atua sobre o cone, pode ser maior ou igual a tensão horizontal inicial, dependendo das características de tensão, deformação, resistência, sensibilidade e história de tensões do solo. Nos solos de comportamento drenado a penetração do piezocone eleva a tensão horizontal efetiva no entorno do piezocone para um valor superior a tensão horizontal efetiva inicial. A magnitude deste aumento depende da densidade relativa e da tensão confinante. Com isto, procura-se ressaltar as dificuldades e incertezas na inferência dos parâmetros de estado inicial ( $K_0$ ,  $\sigma_{H0}$  e OCR) a partir de qualquer ensaio de penetração, sendo que as diversas correlações são todas empíricas.

A pressão de água nos poros é indicativa da condição de drenagem e fluxo da água em subsuperfície. O piezocone, através do sensor de poro-pressão, mostra excelentes respostas na avaliação da pressão de água nos poros dos solos. Nos solos grossos e drenados é possível avaliar a pressão hidrostática e a existência ou não de pressão de confinamento ou fluxo no sentido da carga potenciométrica (Mayne, 2002); nos solos finos

e não-drenados, podem ser obtidos os mesmos parâmetros, porém em função do tempo necessário para dissipar a poro-pressão tornam-se inviáveis de serem obtidos na maioria das situações práticas. Maiores detalhes sobre a dissipação da poro-pressão são fornecidos no item 3.4.3.

### **Densidade Relativa ( $D_r$ ) e Ângulo de Atrito ( $\phi'$ )**

A densidade relativa é um parâmetro que mede a densidade do empacotamento dos grãos em solos não-coesivos. Diversas correlações (Baldi et al., 1986; Schmertmann, 1976; Belotti et al., 1982) foram obtidas em câmaras de calibração, utilizando areias não cimentadas, normalmente adensadas e sem efeitos do envelhecimento. A Figura 3.21 mostra correlação de  $q_c$  contra  $D_r$  em função da tensão vertical efetiva em areias frescas e limpas, segundo Robertson et al. (1986). Estas correlações normalmente conduzem a uma superestimativa da  $D_r$  quando aplicadas aos depósitos arenosos naturais (Baldi, et al., 1982). Quando aplicadas a areias mais friáveis e compressíveis que aquelas utilizadas nas câmaras de calibração, ou contendo mais que 5 a 10% de finos, podem subestimar sensivelmente esse parâmetro.

A densidade relativa fornece indiretamente o índice de vazios dos solos não coesivos granulares. O índice de vazios, junto com a cimentação entre grãos, tem forte influência na deformabilidade de um solo. Trabalhando com resultados de ensaios de piezocone sísmico, Mayne & Rix (1993) mostraram que as correlações de  $q_c$  com o Módulo de Cisalhamento Máximo ( $G_0$ ) são limitadas e com pouca validade, porém aquelas que utilizam ensaios de piezocone sísmico associados a amostras para determinação do índice de vazios, são bastante eficientes.

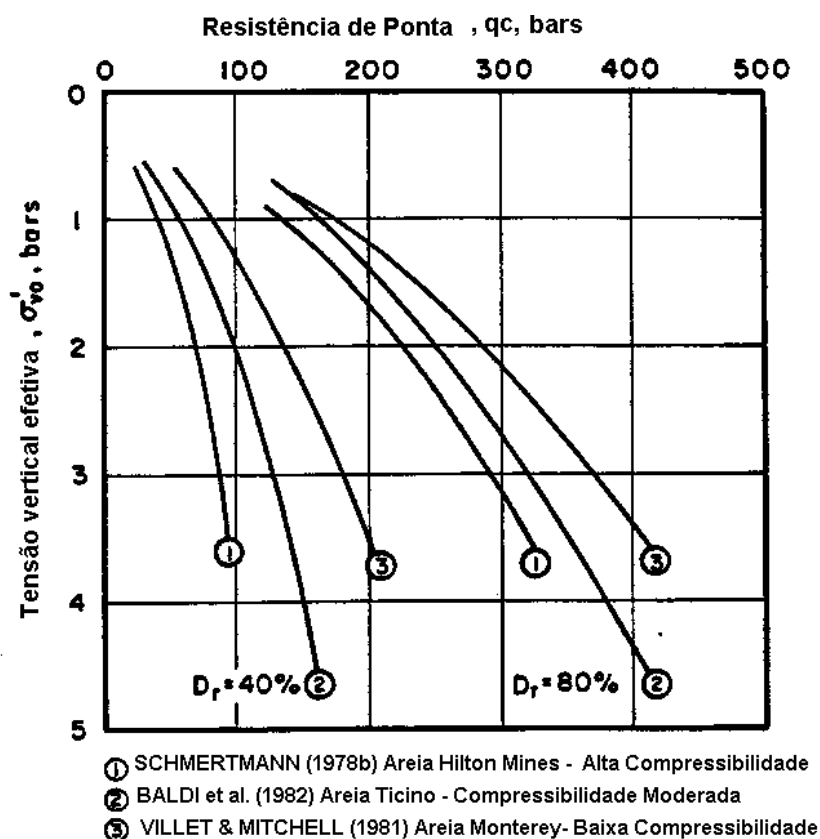


Figura 3.21 – Relação entre a resistência de ponta e densidade relativa, considerando a tensão vertical efetiva (Robertson & Campanella, 1983)

Na Figura 3.22, Mayne & Rix (1993) mostram que o  $q_c$  tem pouca relação com o índice de vazios inicial ( $e_0$ ) e não é possível obtê-lo para solos argilosos. Propõem desta forma, uma relação com melhor coeficiente de determinação, mostrada na eq. (9).

$$G_0 = 406(q_c)^{0,695}/e_0^{1,130} \quad r^2 = 0,901, \text{ para um } n= 418 \quad (9)$$

Esta mesma equação pode ser expressa em termos adimensionais pela eq. (10)

$$G_0 = 99.5 (p_a)^{0,305} (q_c)^{0,695}/e_0^{1,130} \quad (10)$$

onde  $p_a$  = pressão atmosférica na mesma unidade que  $G_0$  e  $q_c$ .

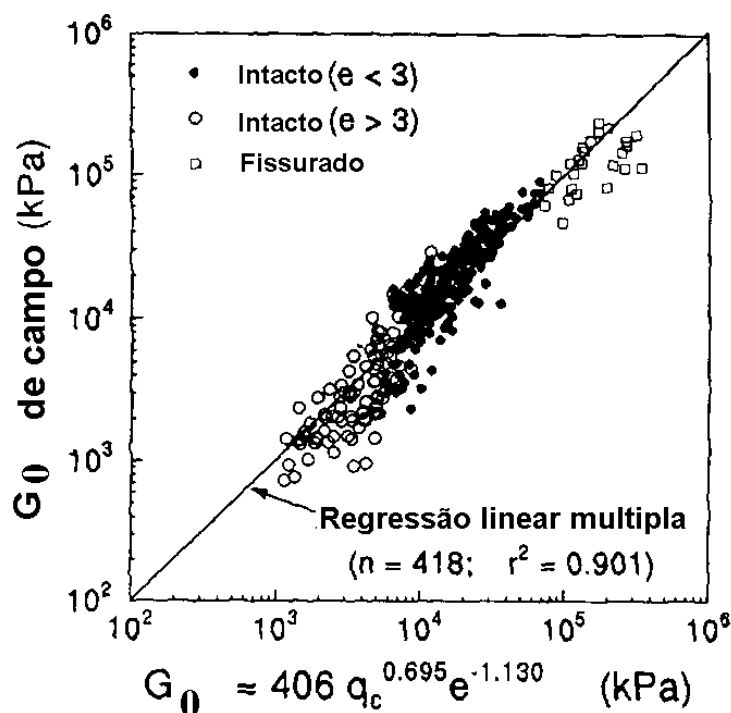


Figura 3.22 – Correlação entre  $G_0$  medido em campo e  $G_0$  obtido pela correlação proposta por Mayne & Rix (1993)

Isto mostra novamente a tendência de se utilizar resultados ensaio de piezocone para estimativas de parâmetros mecânicos dos solos. Ao interpretar os dados do ensaio de piezocone em areias, as estimativas ângulo de atrito são mais precisas do que aquelas feitas para caracterizar a densidade relativa e os módulos de deformabilidade (Jamiolkowski et al., 1988). Estes autores indicam a correlação expressa pela equação (11) para obtenção do ângulo de atrito interno de solos não-coesivos.

$$\tan \phi' = \frac{1}{2.68} \left[ \log \left( \frac{q_c}{\sigma'_{vo}} \right) + 0.29 \right] \quad (11)$$

A Figura 3.23 mostra a relação proposta por Robertson & Campanella (1983) entre a resistência de ponta ( $q_c$ ), o ângulo de atrito e a tensão vertical efetiva. Valores de ângulo de atrito elevado, são determinados para solos com grãos maiores, mais irregulares e com arranjo de partículas mais estável, podendo chegar a 46-48° mesmo em níveis de tensão confinante baixos.

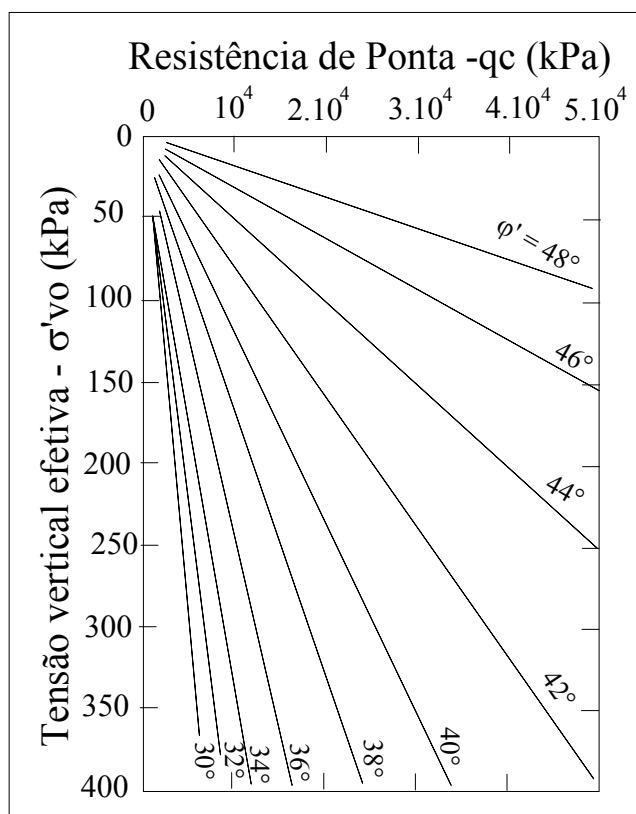


Figura 3.23 – Correlação entre resistência de ponta e ângulo de atrito de pico, para areias quartzosas não cimentadas (Robertson e Campanella, 1983)

Baldi et al. (1982) em extenso trabalho realizado em câmaras de calibração concluem que a relação entre o ângulo de atrito e a resistência de ponta do ensaio de cone é fortemente influenciada pela tensão horizontal efetiva e menos pela tensão vertical efetiva. No entanto, em função das dificuldades de medição, são normalmente utilizadas correlações com a tensão vertical, considerando solos normalmente adensados. A Figura 3.24 mostra a relação entre resistência de ponta e densidade relativa, obtidas por Baldi et al. (1982) com indicações da tensão vertical efetiva e da tensão horizontal efetiva.

A densidade relativa é fortemente influenciada pela compressibilidade das areias (Jamiolkowski et al., 1985). A compressibilidade é influenciada pela constituição mineralógica, forma dos grãos e tensão confinante. Areias carbonáticas com conchas são mais compressíveis que as areias quartzosas, enquanto que elevados teores de mica aumentam sensivelmente a compressibilidade dos solos.

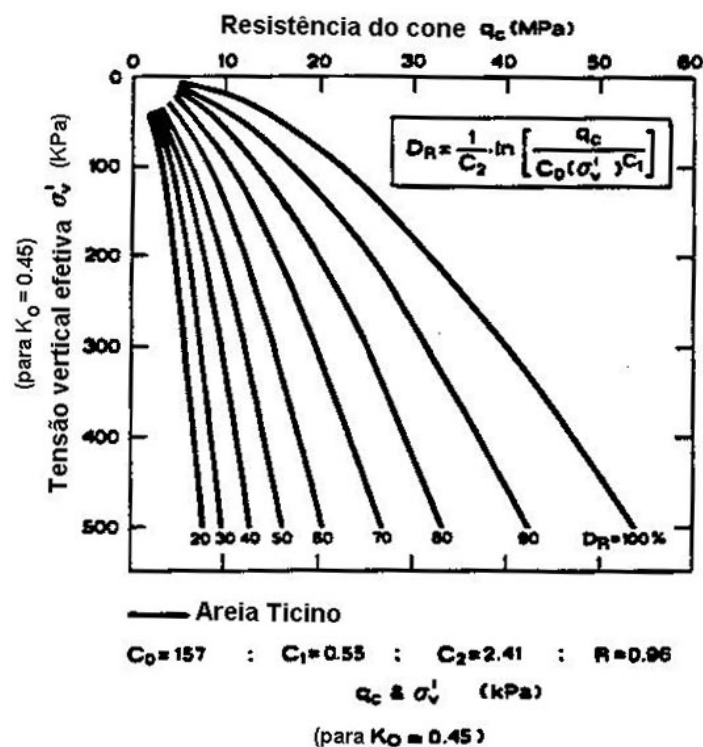


Figura 3.24 – Relação entre resistência de ponta, densidade relativa e tensão horizontal e vertical efetivas, em solos não-cimentados, de deposição recente (Baldi et al. 1982).

A Figura 3.25 mostra a relação entre a densidade relativa e a resistência de ponta considerando a compressibilidade dos solos analisados, para as quais Jamiolkowski et al. (1985) propõem uma correlação, considerando a tensão vertical efetiva.

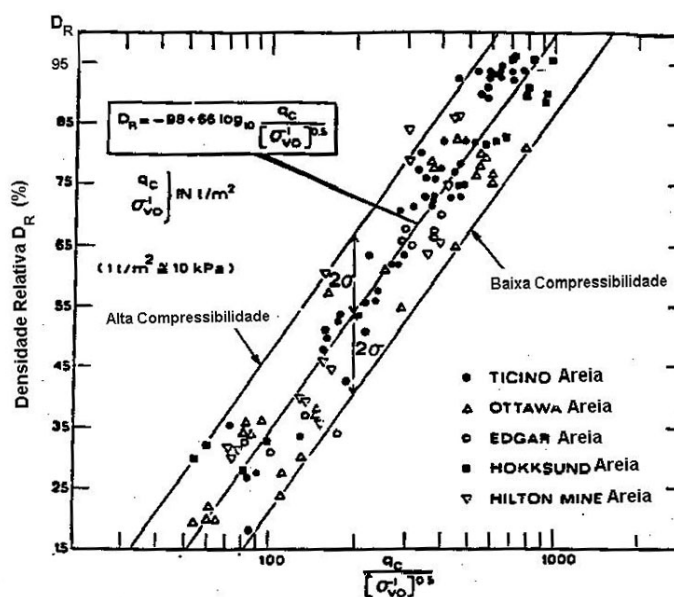


Figura 3.25 – Influência da compressibilidade na densidade relativa de areias quartzosas normalmente adensadas, não-cimentadas e não-envelhecidas (Jamiolkowski et al., 1985)

As diversas correlações disponíveis para estimar o ângulo de atrito associadas a variabilidade natural do solo, impõe uma dificuldade em selecionar um valor representativo para selecionar como parâmetros mecânicos de projeto. Conforme mostra Wilson (2001) esta dificuldade está mais vinculada à variabilidade do solo do que as incertezas impostas pelas várias correlações provenientes de vários tipos de ensaios e autores.

A Figura 3.26 mostra o resultado de análise de sensibilidade do ângulo de atrito frente às variações de ensaio e a correlações propostas por diferentes autores..

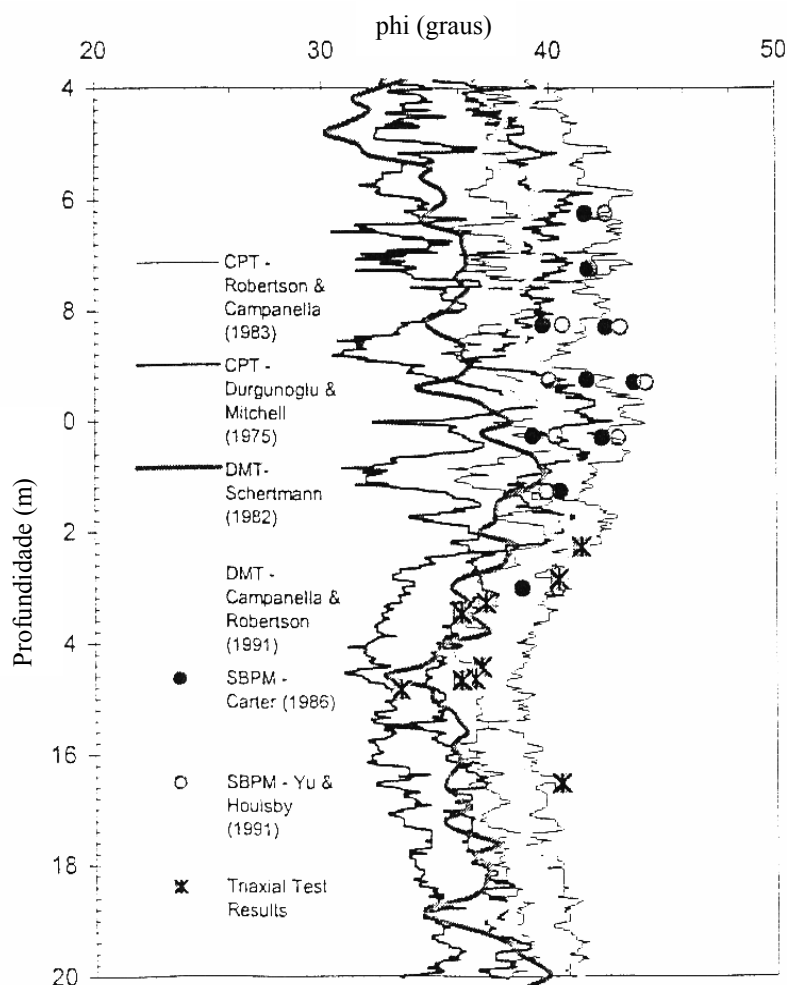


Figura 3.26 – Correlações e ensaios para estimar os ângulos de atrito de areias (Wilson, 2001)

### História de Tensões

A história de tensões refletida no perfil de pressão de pré-adensamento e da razão de sobre-adensamento, interfere sensivelmente na deformabilidade dos solos. Estas

características desenvolvem-se em função da história de deposição, processos diagenéticos e pedogenéticos, que são bastante distintos quando comparados os solos sedimentares de clima frio e os solos tropicais residuais (Robertson et al., 1986, Lunne et al., 1997). Conforme Schmertmann (1985) diversos problemas geotécnicos tem como variável de controle principal a tensão horizontal inicial (expressa em termos de  $K_0$ ), entre eles a capacidade de carga de fundações, a estabilidade de taludes, entre outros. A determinação do  $K_0$  é de difícil obtenção, pois a condição natural é perturbada pela inserção de qualquer instrumento e o resultado do  $K_0$  torna-se dependente do método empregado. Solos normalmente adensados (NC), tanto argilas quanto areias, apresentam uma faixa de variação de  $K_0$  estreita, e a equação (12) de Jaky (1944), fornece uma faixa de variação de 0,35 a 0,7 para  $\phi' = 17-40^\circ$

$$K_0 = (1 - \text{sen } \phi) \quad (12)$$

Uma expressão simples que caracteriza a Razão de Sobre-Adensamento (OCR), segundo Schmertmann (1985) é mostrada na eq. (13).

$$K_{0\text{OC}}/K_{0\text{NC}} = \text{OCR}^x, \text{ com } x \text{ variando de } 0,4 \text{ a } 0,5 \text{ em diversos solos} \quad (13)$$

Outra forma de expressar o  $K_0$  através do OCR é sugerida por Robertson (1998) e mostrada na eq. (14).

$$\text{OCR} = k \left( \frac{q_t - \sigma_{vo}}{\sigma_{vo}} \right) \quad \text{com } k \text{ variando de } 0,2 \text{ a } 0,5 \quad (14)$$

Com objetivo de entender as características de deformabilidade de um solo, foram propostas diversas correlações para estimativa da história de tensões através da determinação do OCR e da pressão de pré-adensamento (Chen & Mayne, 1996; Sully et al., 1988; Konrad & Law, 1987; Mayne & Kulhawy, 1982). O surgimento do sensor de poro-pressão com o piezocone, propiciou diversos estudos que indicaram existir boas correlações entre a poro-pressão e a tensão de pré-adensamento. Chen & Mayne (1996), em abrangente levantamento estatístico, procuram identificar uma relação entre os resultados dos ensaios de piezocone e a história de tensões de argilas. Concluíram que as



correlações com a  $\sigma'_p$  (pressão de pré-adensamento) em termos de diferença de tensão ( $q_t - \sigma_{v0}$  ou  $q_t - u$ ) apresenta uma melhor correlação estatística do que aquelas envolvendo o parâmetro  $B_q$ . As equações (14) e (15) são correlações semi-empíricas entre OCR e  $\sigma'_p$  com base nos resultados dos ensaios de piezocone. Na eq. (15) é incorporada informação sobre a plasticidade do solo, através do  $I_p$  (Índice de Plasticidade), que exige coleta de amostras e ensaios em laboratório e apresenta melhor coeficiente de correlação.

$$\text{OCR} = 0.317 \left( \frac{q_T - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) \quad n = 1208 \quad r^2 = 0.668 \quad (14)$$

$$\frac{\sigma'_p}{p_a} = 0.99 \left( \frac{q_T - u_2}{p_a} \right)^{1.05} I_p^{-0.2} \quad n = 820 \quad r^2 = 0.823 \quad (15)$$

Já, Konrad & Law (1987) concluem que o excesso de poro-pressão medido na cravação do piezocone não é sensível o suficiente para refletir mudanças no OCR, pelo menos na faixa de 1.3 a 4.5. Por outro lado, consideram que o perfil contínuo de medição da resistência de ponta e da poro-pressão resultam em um perfil contínuo da tensão vertical efetiva, que é aproximadamente paralela ao perfil de pressão de pré-adensamento obtido dos ensaios em laboratório.

Schmertmann (1985) afirma que a variabilidade do  $K_0$  é grande e portanto prever seu valor é difícil, sendo a determinação feita preferencialmente via métodos diretos em campo. A Tabela 3.2 mostra alguns dos métodos para determinação do  $K_0$ , cujos resultados devem ser adequadamente interpretados em função do nível de deformação que cada tipo de ensaio produz no solo. O perfil de  $K_0$  pode muitas vezes orientar o entendimento da história geológica, no entanto, tem que ser medido de forma independente para que os resultados dos ensaios penetrométricos, tipo SPT e CPT, possam ser adequadamente interpretados.

Método	Referência
1. PMT de Menard (MPMT)	Baguelin, et.al. (1978)
2. Geo-célula de Menard	Van Wanbeka & Renard (1972)
3. Tubo vertical instrumentado	Kenny(1967)
4. Célula de carga enterrada	D'Appolonia et al.(1969)
5. Fraturamento hidráulico	Bjerrum & Andersen (1972), Bjerrum (1972), Al Shaikh-Ali et al.(1981)
6. Pressiômetro auto-perfurante	Wroth(1975), Clark & Wroth(1984)
7. Penetrômetro de pressão de placa fina (Tipo Glotzl)	Massarsach(1975), Tedd & Charles(1981)
8. Dilatômetro de Marchetti (DMT)	Marchetti(1980), Schmertmann(1981)
9. Célula auto-perfurante (SE)	Jamiolkowski, et.al.(1985)
10. $K_0$ "Stepped blade"	Dalton & Hawkins(1982)
	Handy et al.(1982)

Tabela 3.2 – Métodos de campo para determinação do  $K_0$  (Schmertmann, 1985)

Sully et al. (1988) interpretando resultados de ensaios de piezocone, com medição simultânea da poro-pressão na posição  $u_1$  e na posição  $u_2$ , mostram que o parâmetro de diferença da poro-pressão entre uma posição e outra é sensível às variações de OCR, para faixa de variação de 1 a 10. Estabelecem uma correlação entre o diferencial de poro-pressão (DPP) e o OCR, mostrada na eq. (16).

$$\text{OCR} = 0,66 + 1,43 (\text{DPP}) \quad (16)$$

Estes mesmos autores sugerem que para avaliar a poro-pressão em solos muito sobre-adensados devem ser utilizadas as posições  $u_1$  e  $u_3$ . Isto devido ao elevado nível de deformação na base do cone (posição  $u_2$ ) e aos elevados gradientes de poro-pressão que podem ser medidos atrás da luva de atrito (posição  $u_3$ ). Neste sentido, Wroth (1984) afirma que apenas a poro-pressão produzida pelos esforços de cisalhamento durante a penetração do cone, refletem a história de tensões do solo.

Mayne & Kulhawy (1982) estudando diversos perfis de solos argilosos, moles a rijos, com uso de ensaios de piezocone sísmico, concluem que a perfilagem da pressão de pré-adensamento ( $\sigma'_p$ ) pela resistência de ponta normalizada, pode ser estimada pela eq. (17).

$$\sigma'_p = k_p (q_t - \sigma_{v0}) \quad (17)$$

onde  $k_p$  decresce de 0,5 a 0,1 com o aumento do índice de plasticidade e aumento do índice de vazios.

Os mesmos autores propõe a correlação indicada na eq. (18) para estimativa da pressão de pré-adensamento em argilas moles a rijas:

$$\frac{\sigma'_p}{p_a} = 0,99 \left( \frac{q_t - u_2}{p_a} \right)^{1,05} I_p^{-0,2} \quad n = 820 \quad r^2 = 0,823 \quad (18)$$

Lunne et al. (1996) sugerem que o parâmetro de poro-pressão  $B_q$  tende a decrescer com o aumento do OCR, porém existem outros fatores que influenciam, e provavelmente somente uma indicação de OCR pode ser obtida a partir dos ensaios de piezocone.

Com base em dados obtidos a partir de 170 diferentes tipos de solos, Mayne & Kulhawy (1982) avaliam as relações entre  $K_0$  e OCR. Concluem que, com base no ângulo

de atrito de tensão efetiva ( $\phi'$ ) e a história de tensões (OCR e  $OCR_{\max}$ ), é possível prever valores aproximados de  $K_0$ . Previsões de  $K_0$  podem ser obtidas com razoável precisão, como função da história de tensões, através da eq. (19), proposta por Mayne & Kulhawy (1982).

$$K_0 = (1 - \text{sen } \phi') \left[ \left( \frac{OCR}{OCR_{\max}^{(1 - \text{sen } \phi')}} \right) + \frac{3}{4} \left( 1 - \frac{OCR}{OCR_{\max}} \right) \right] \quad (19)$$

Kulhawy et al. (1991) mostram que o  $K_0$  interfere no comportamento geotécnico de solos, e que sua estimativa em solos argilosos é mais fácil e precisa, enquanto que estimativas para areias são mais complexas, dependendo de abordagens indiretas através da  $D_r$ , compressibilidade, tensão horizontal e vertical efetivas.

#### 3.4.4.2 – Parâmetros de deformabilidade

A identificação das características de deformabilidade do solo é normalmente definida usando as leis da mecânica do contínuo, e geralmente assumindo que o material se comporta de forma linear elástica e isotrópica (Jamiolkowshi et al., 1988). As correlações entre a resistência a penetração e as características de deformabilidade são puramente empíricas, em função da dificuldade em se estabelecer as condições de drenagem e os níveis de tensão e deformação. As características de deformabilidade de um determinado solo dependem basicamente dos seguintes fatores (Mayne & Dumas, 1998; Jamiolkowski, 1988; Wroth, 1984):

- história de tensão e deformação
- nível atual da tensão efetiva média
- nível de deformação induzido pelo cisalhamento
- trajetória de tensões efetivas, que reflete a anisotropia e a plasticidade do solo
- fator tempo como o envelhecimento (“aging”)

Desta forma, o uso seguro e correto das correlações entre resistência a penetração e módulos de deformabilidade, dependem qualitativamente da habilidade do usuário em entender todos estes fatores. Para uma mesma areia não existe uma correlação única entre a

resistência a penetração e o módulo de deformabilidade não-linear. A utilização dos resultados do ensaio de piezocone para estimativa de módulos de deformabilidade é incerta e confusa pois o solo não é linearmente elástico, pois o módulo varia com o nível de tensão e deformação, normalmente é considerada condição de carregamento unidirecional, e as correlações são obtidas a partir de diferentes métodos teóricos (Robertson et al., 1986). Com isto a dispersão dos resultados das correlações é grande.

As características de deformabilidade podem ser retratadas através dos seguintes parâmetros:

Módulo de compressão confinada (M) , sendo  $M=1/m_v$

Módulo de Elasticidade ou de Young (E)

Módulo de Cisalhamento (G)

Os gráficos da Figura 3.27, obtidos de Robertson et al. (1986), indicam o comportamento do módulo de elasticidade, em função da resistência de ponta e tensão vertical efetiva, porém com restrições na aplicação prática direta devido ao elevado grau de empirismo presente nesta correlação.

Existem diversas relações empíricas e diretas, conforme aquelas sugeridas por Jacobs (1996) e mostradas nas eqs (20), (21), (22) e (23).

$$M = 3 q_c \quad (20)$$

$$E = 2,5 q_c \text{ (para sapatas quadradas)} \quad (21)$$

$$E = 3,5 q_c \text{ (para sapatas corridas)} \quad (22)$$

$$G = E/2,5 \text{ (para grandes deformações)} \quad (23)$$

Na seleção do parâmetro de projeto mais adequado a variabilidade do solo e diversidade de correlações criam incertezas. Conforme Wilson (2001) as implicações da variabilidade do solo na seleção do módulo de elasticidade representativo parecem ser pequenas. A seleção do módulo de elasticidade mais apropriado para um determinado local depende mais do nível de deformação admissível do que da variabilidade do solo. A Figura 3.28 mostra uma análise de sensibilidade do módulo de elasticidade para várias correlações, com base em ensaios de piezocone e DMT realizados em campos experimentais de pesquisa do Canadá.

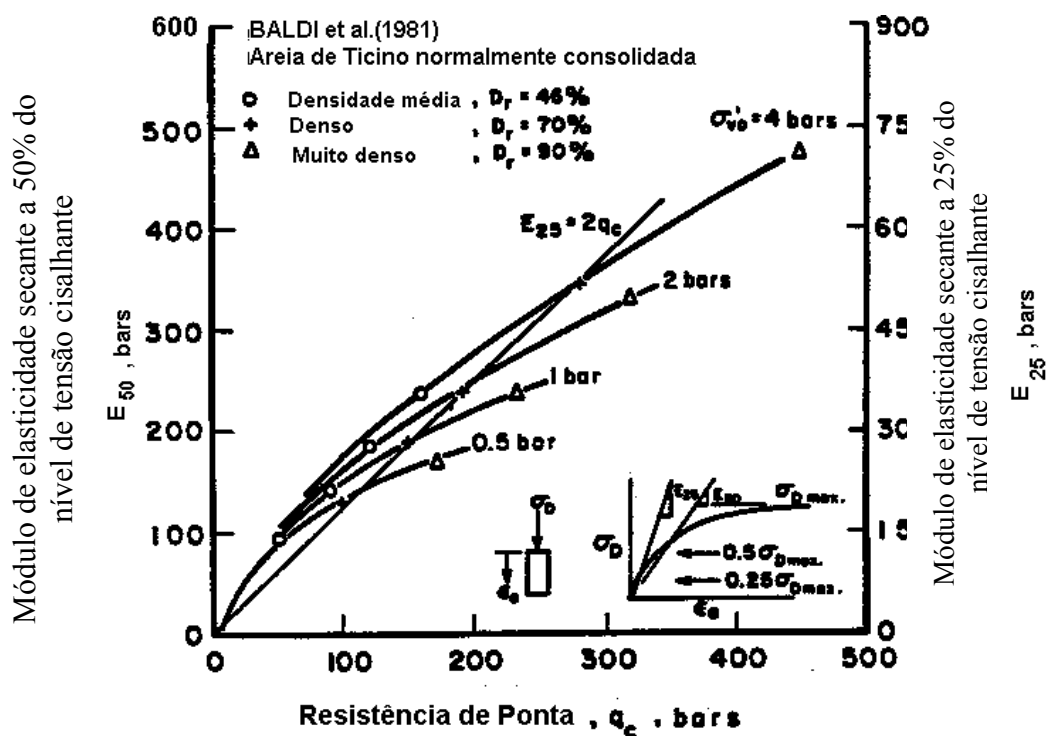


Figura 3.27 – Relação entre resistência de ponta e módulo de elasticidade a 25 e 50 % de deformação cisalhante (Robertson et al., 1986).

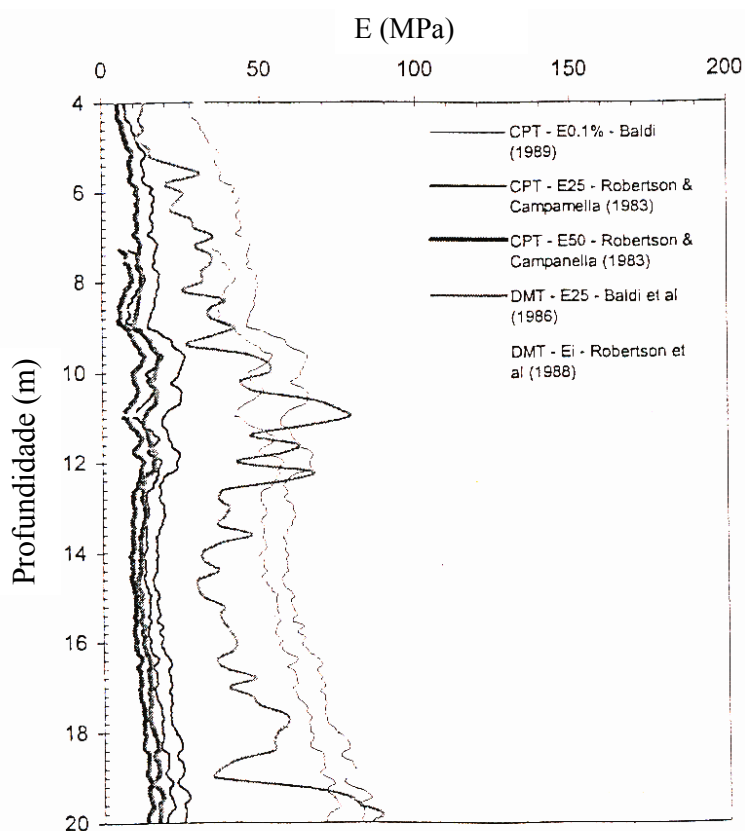


Figura 3.28 – Comparação entre resultados de diferentes correlações para estimativa de módulo de elasticidade (Wilson, 2001).

Dentre os parâmetros mecânicos do solo o módulo de cisalhamento máximo ( $G_0$ ) é fundamental para a compreensão do comportamento do solo no âmbito das micro-deformações. Comparando resultados de diversos ensaios para obtenção do parâmetro, Mayne & Rix (1993) concluem que a melhor opção é medir diretamente a velocidade da onda cisalhante, a partir da qual obtém-se o  $G_0$ , sugerindo que o piezocone sísmico seria a ferramenta mais adequada para este fim por fornecer diversas informações simultaneamente. Na Figura 3.29 os autores mostram correlação de  $q_c$  com  $G_0$ , considerando diferentes tensões verticais efetivas. As correlações utilizadas com base em resultados de ensaios de piezocone dependem da obtenção de amostras e ensaios em laboratório, para identificação de características como o índice de vazios, cimentação, OCR, entre outros.

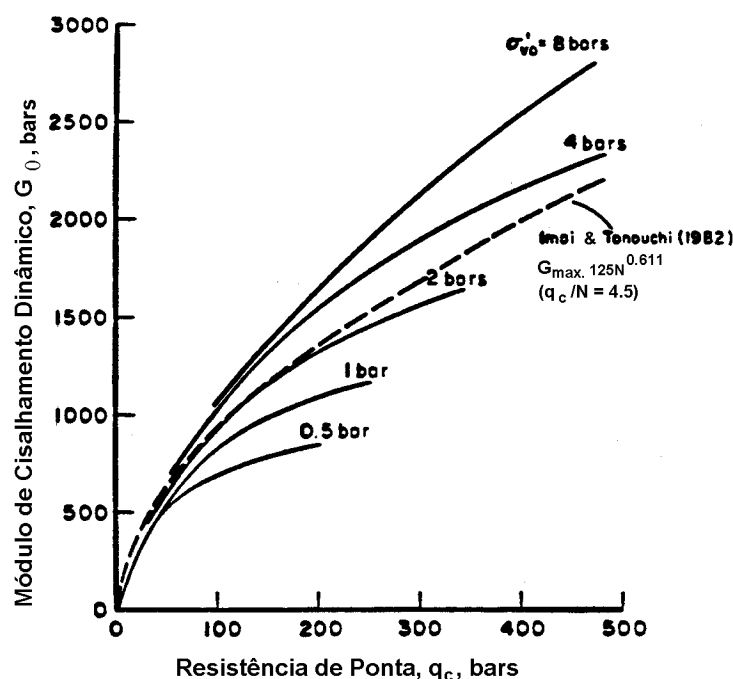


Figura 3.29 - Relação empírica entre Módulo de Cisalhamento máximo e Resistência de Ponta, considerando as variações na tensão efetiva vertical (Mayne & Rix, 1993).

O módulo de cisalhamento máximo ( $G_0$ ) pode ser obtido de diversas formas, tanto em laboratório quanto em campo (Mayne & Dumas, 1998). Os métodos de campo fazem uso dos princípios de propagação da onda no solo. A Figura 3.30 indica as várias técnicas de ensaios disponíveis para determinação deste parâmetro.

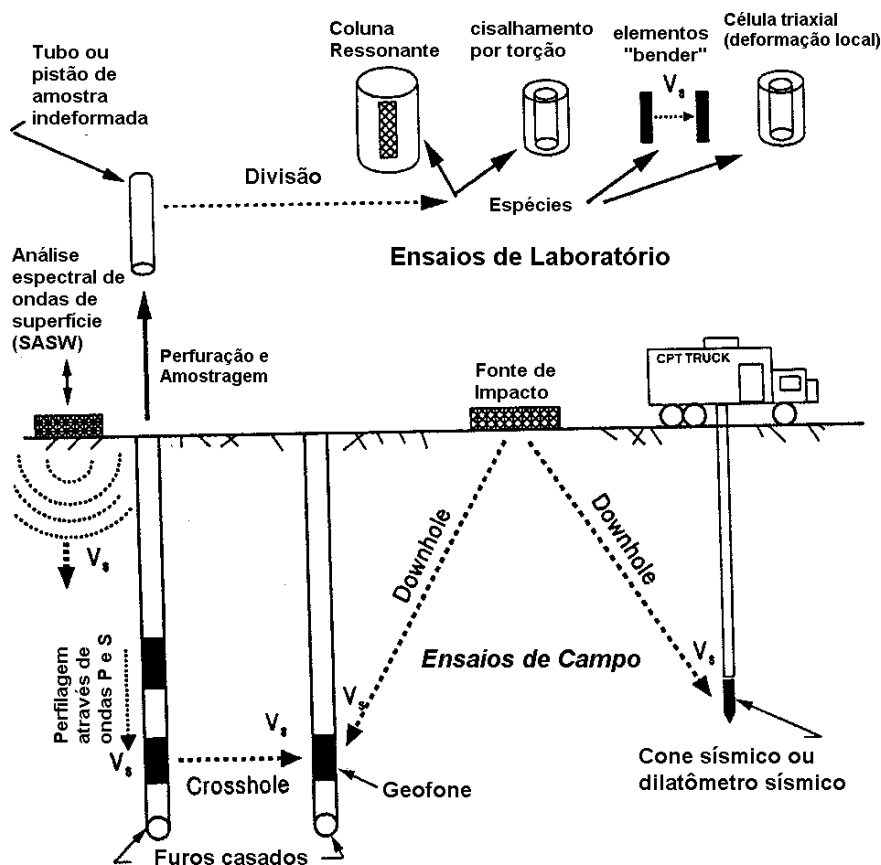


Figura 3.30 – Técnicas de ensaio para determinação do Módulo de Cisalhamento Máximo ( $G_0$ ), conforme Mayne & Dumas (1998)

Mayne & Rix (1993), analisaram estatisticamente resultados de diversos ensaios de piezocone sísmico e estabeleceram uma correlação entre  $q_c$  e  $G_0$  para argilas, onde se conhece o índice de vazios. A equação 24 indica esta correlação.

$$G_0 = 99.5(p_a)^{0.305} \frac{(q_c)^{0.695}}{e_0^{1.130}} \quad (r^2 = 0.901) \quad (24)$$

onde,  $p_a$  = pressão atmosférica nas mesmas unidades do  $G_0$  e  $q_c$ .

A estimativa de  $G_0$  a partir de correlações é muito incerta. Wilson (2001) em análise de sensibilidade mostrada na Figura 3.31, indica que em função da variabilidade de cada local e da ampla gama de valores fornecidas pelas diversas correlações, a melhor alternativa para a estimativa de  $G_0$  é a medida direta utilizando ensaio sísmico, com informações sobre o índice de vazios. Caso não exista experiência anterior, qualquer valor

de  $G_0$  pode ser justificado, o que torna a obtenção direta deste parâmetro de fundamental importância para a adequada caracterização do modelo geotécnico.

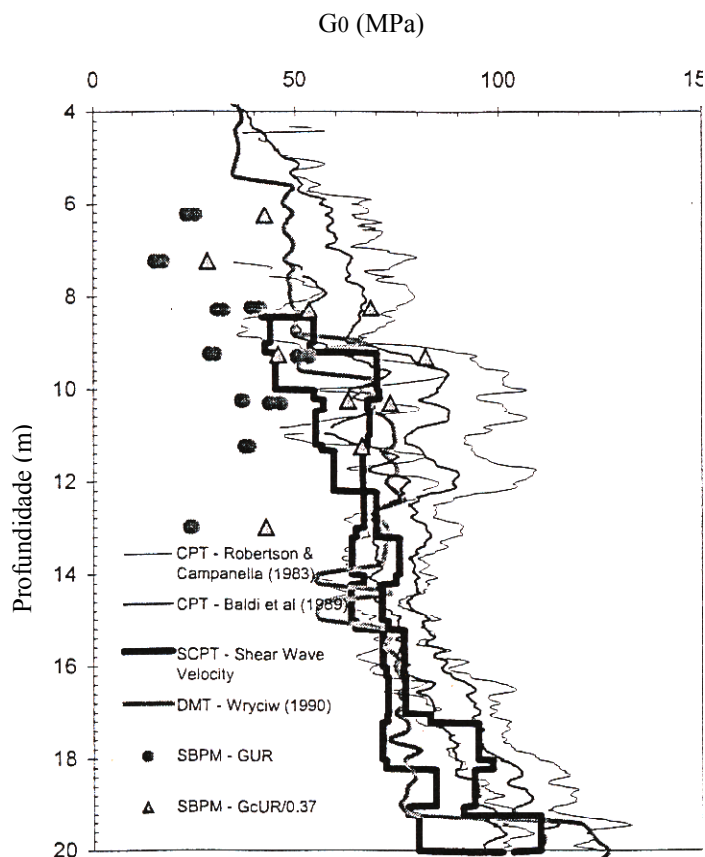


Figura 3.31 - Comparação entre resultados de diferentes correlações para estimativa de  $G_0$  em ensaios realizados no Kidd2 site, em Vancouver, no Canadá (Wilson,2001).

#### 3.4.4.3 Parâmetros de adensamento e permeabilidade

Os parâmetros de adensamento e permeabilidade estão agrupados num mesmo item por serem obtidos a partir de procedimentos de interpretação semelhantes com base nos resultados dos ensaios de piezocone, mais especificamente da interpretação dos registros de poro-pressão e da dissipação de seu excesso, quando da realização do ensaio de dissipação da poro-pressão. Os resultados de um ensaio de piezocone permitem estimar o coeficiente de adensamento ( $C_h$ ), a permeabilidade ( $k$ ) e o módulo de compressão volumétrica ( $m_v$ ). O ensaio de dissipação consiste na paralisação da penetração do piezocone e no registro das variações da poro-pressão ao longo do tempo. Geralmente a poro-pressão é medida em kPa, com precisão de 0,01 kPa, e o tempo em segundos, em



intervalos de 0,1 s. O ensaio é normalmente realizado em solos finos, onde o excesso de poro-pressão é elevado. Em geral, a aplicação dos vários métodos de estimativa de parâmetros consideram dissipação mínima de 50% do excesso de poro-pressão (Robertson *et al.*, 1992; Sills *et al.*, 1988). Em alguns casos específicos o ensaio é conduzido até a dissipação total do excesso de poro-pressão, atingindo-se a pressão hidrostática. A poro-pressão é medida através de sensor localizado na extremidade do cone. A posição mais utilizada e recomendada pelas normas ABNT MB-3406 e ASTM D-3441 é a  $u_2$ , na base do cone, por permitir a correção da resistência de ponta para o efeito das áreas desiguais. Em solos saturados a cravação do cone gera excesso de poro-pressão devido às deformações no solo e ao fluxo de água nos poros. O gráfico de poro-pressão do ensaio de piezocone registra a somatória do excesso de poro-pressão e da pressão hidrostática, já descritos anteriormente.

Os métodos para interpretação da curva de dissipação foram desenvolvidas inicialmente para solos normalmente adensados, a partir da posição  $u_1$  ou  $u_2$  de medição da poro-pressão. As duas posições apresentam respostas e aplicabilidades distintas em função da propriedade a ser avaliada. A posição  $u_1$ , na face do cone, mostra excelentes resultados na definição do perfil estratigráfico (Mayne & Burns; 2000; Robertson *et al.*, 1986; Robertson, 1990), porém a posição  $u_2$  foi estabelecida como padrão pelas normas da ASTM e ABNT, devido a necessidade de correção da resistência de ponta para o efeito de áreas desiguais, principalmente nos solos argilosos moles.

Os resultados dos ensaios de dissipação em solos sobreadensados, com medição da poro-pressão na posição  $u_2$  sistematicamente mostram uma elevação da poro-pressão após a paralisação do cone, com o início da redução após um certo tempo. Este comportamento foi interpretado inicialmente como falha na saturação do piezocone (Lunne *et al.*, 1997), porém os resultados obtidos por Sully & Campanella (1994) indicaram que este comportamento poderia estar ligado à redistribuição de pressão que ocorre no entorno do piezocone, devido aos elevados gradientes gerados em solos sobreadensados. A seguir são indicados os principais procedimentos para obtenção dos parâmetros provenientes da interpretação dos ensaios de dissipação da poro-pressão.

Diversos são os modelos teóricos que permitem a interpretação do ensaio de dissipação da poro-pressão (Tortensson, 1975; Baligh & Levadoux, 1980; Gupta & Davidson, 1986). Recentemente Burns & Mayne (1998a) e Burns & Mayne (2002) apresentaram fundamentação teórica que combina a teoria de expansão de cavidades e a mecânica dos solos dos estados críticos, resultando em solução analítica para as equações

de consolidação radial. As alterações na poro-pressão se devem a dois tipos de componentes, conforme mostrado na Figura 3.32. A primeira representa uma componente de tensão normal octaédrica ( $\Delta\sigma_{oct}$ ), produzida pelo deslocamento de solo e fluidos durante a penetração do cone; a outra representa a tensão cisalhante octaédrica ( $\Delta\tau_{oct}$ ), que é produzida pelas deformações cisalhantes do solo junto ao corpo do cone.

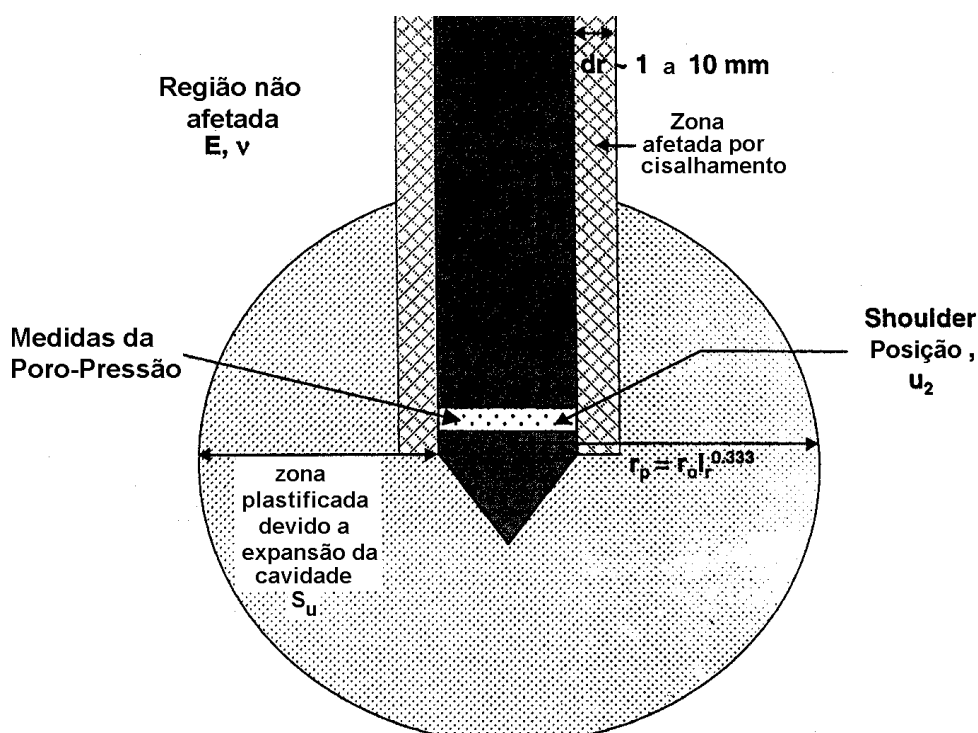


Figura 3.32 – Zonas afetadas pela penetração do piezocone.  $r_o$ , raio do cone,  $r_p$ , raio da zona plástica (Burns & Mayne, 1998a).

Estas duas componentes podem ser diferenciadas teoricamente, mas são medidas em conjunto, não sendo possível discriminá-las. A existência de uma componente de cisalhamento explicou o comportamento dilatante de solos sobre-adensados, e este entendimento permitiu a interpretação de curvas de dissipação em qualquer tipo de solo. Os principais parâmetros que interferem na dissipação do excesso de poro-pressão são: índice de rigidez, ( $I_r$ ) ângulo de atrito efetivo ( $\phi'$ ), OCR, tensão vertical efetiva, poro-pressão hidrostática e raio do cone. As Figuras 3.33, 3.34 e 3.35 mostram gráficos indicativos onde os parâmetros índice de rigidez ( $I_r$ ), coeficiente de adensamento horizontal ( $c_h$ ) e razão de sobre-adensamento (OCR) podem ser estimados, na ausência de ensaios específicos.

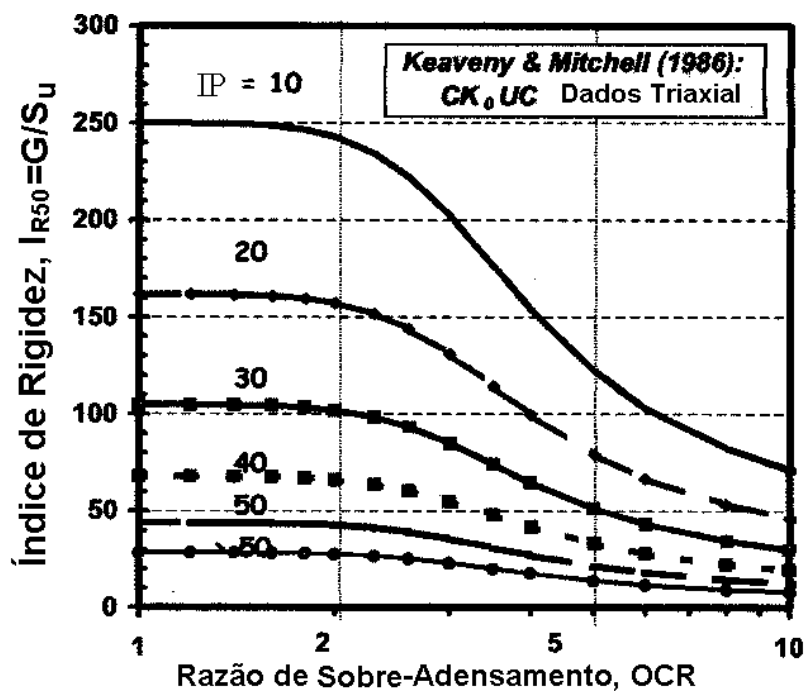


Figura 3.33 – Estimativa do índice de rigidez ( $I_r$ ) para solos argilosos e siltosos considerando OCR e IP (índice de plasticidade) (Keaveny & Mitchell, 1986).

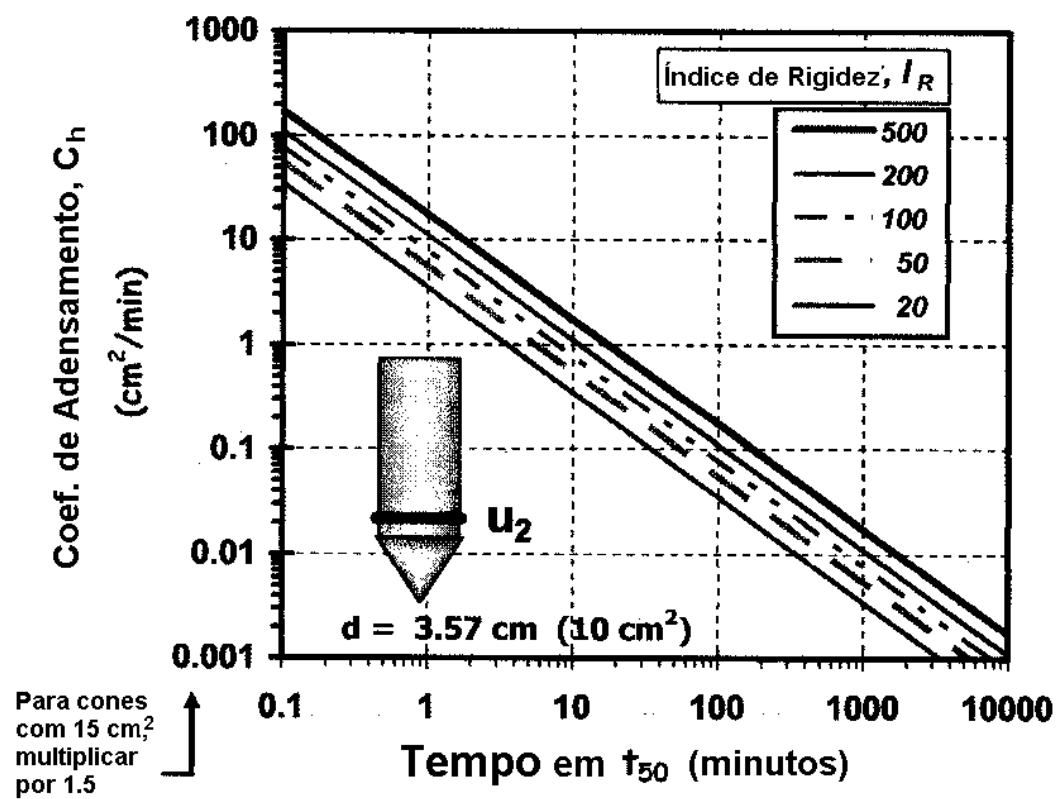


Figura 3.34 – Coeficiente de Adensamento ( $C_h$ ) em 50% da dissipação (Burns & Mayne, 2002)

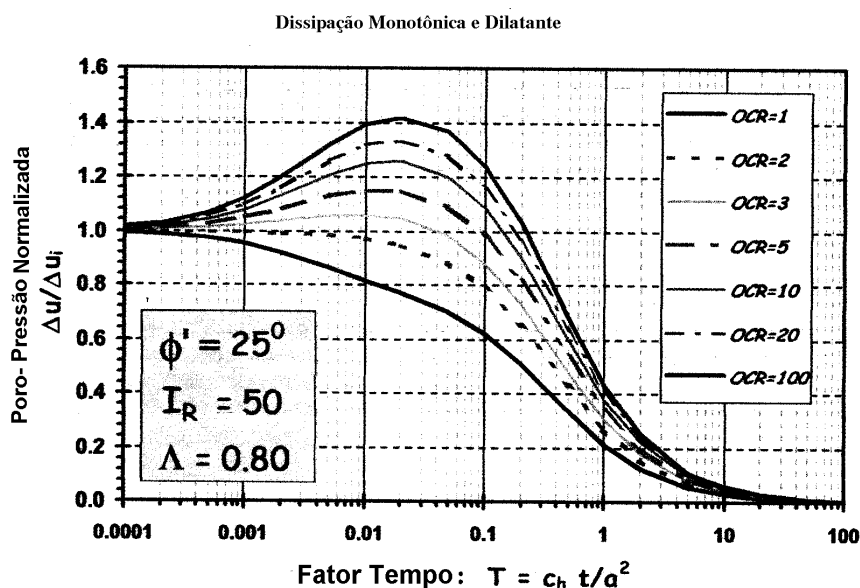


Figura 3.35 – Diferentes curvas de dissipação dilatantes em função de vários OCRs (Burns & Mayne, 1998b).

Os parâmetros estimados do resultado do ensaio de dissipação são coeficiente de adensamento horizontal ( $c_h$ ) e permeabilidade ( $k$ ). Mais recentemente, com o surgimento de modelos teóricos mais consistentes podem ser obtidas informações sobre OCR e história de tensões (Kabir & Lutenegeger, 1990). A partir da curva  $u$  versus  $\log t$  avalia-se o formato da curva para assim decidir pela necessidade ou não de aplicar correções à curva. Após corrigidas, o método de cálculo mais utilizado é o de Housby & Teh (1988). Até recentemente a estimativa de parâmetros a partir da curva de dissipação só podia ser aplicada a solos normalmente a pouco adensados, pois os modelos teóricos só consideravam comportamento monotônico, que é o decaimento progressivo da poro-pressão após a paralisação da penetração do cone. Nos solos sobreadensados, ocorre comportamento dilatante, que é a elevação da poro-pressão durante determinado tempo para posterior decaimento até poro-pressão de equilíbrio. Para esses casos, Sully et al. (1999) aplicaram método de correção das curvas dilatantes que permite a utilização das soluções teóricas convencionais para os solos sobreadensados, ampliando a quantidade de informações que podem ser obtidas a partir do ensaio de piezocone.

### Os tipos de curvas de dissipação do excesso da poro-pressão

Os ensaios de dissipação podem ser classificados de acordo com o tempo de dissipação e de acordo com a forma da curva. Sully et al. (1999) classificam as curvas de dissipação em 5 tipos descritos a seguir:

**Tipo I** – representa o comportamento de solos normalmente adensados e a resposta do ensaio implica em curva monotônica, ou seja, valores do excesso de poro-pressão ( $\Delta u$ ) decrescentes após a paralisação do cone. A Figura 3.36a mostra o formato da curva de dissipação para as posições  $u_1$ ,  $u_2$  e  $u_3$  de medição da poro-pressão. Na Figura 3.36b são mostradas as curvas normalizadas com relação a pressão inicial.

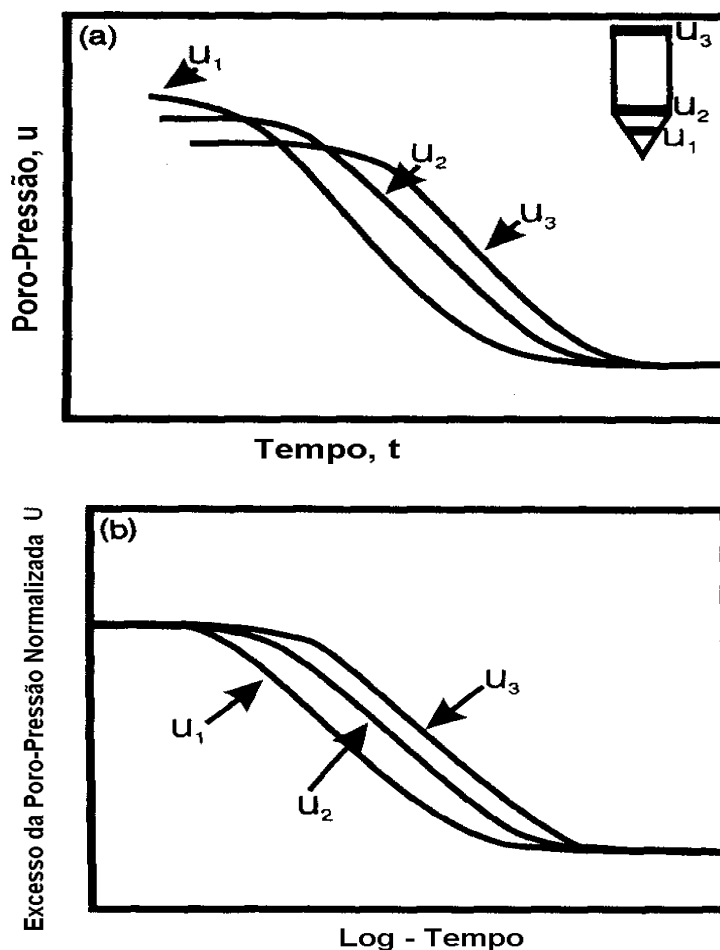


Figura 3.36 a,b – Curvas típicas de dissipação para solos finos normalmente adensados. (a) Corresponde às posições de medição  $u_1$ ,  $u_2$  e  $u_3$  no piezocone; (b) Correspondem às mesmas curvas normalizadas (Sully et al., 1999)

**Tipo II** – É típica de solos sobre-adensados quando a medição da poro-pressão é feita na posição  $u_1$ , ocorrendo um decréscimo inicial brusco devido ao efeito do descarregamento pela paralisação do cone. A Figura 3.37 mostra o formato típico destas curvas.

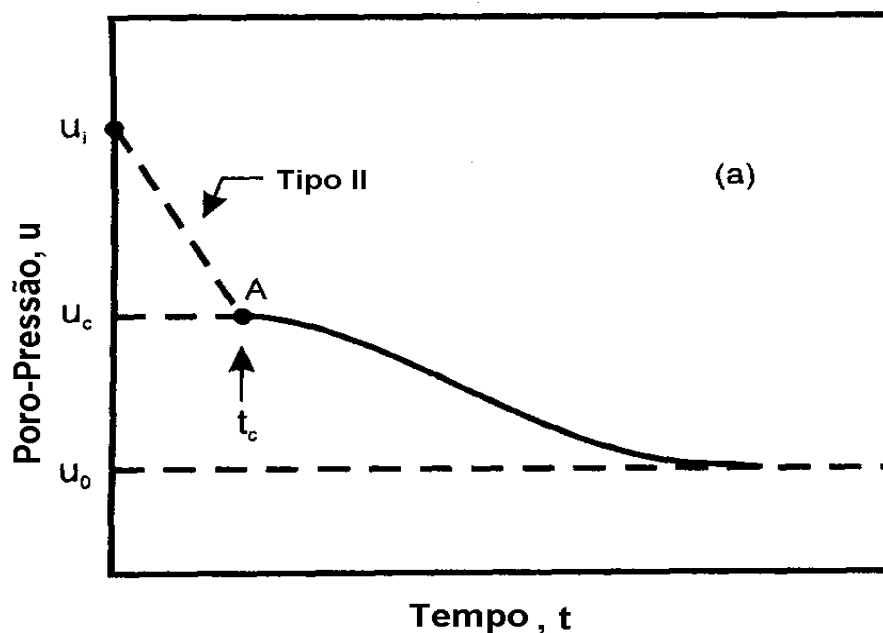


Figura 3.37 – Curva de dissipação tipo II, característica de solos finos sobre-adensados. Notar a queda brusca de  $u_i$  até atingir  $u(A)$  (Sully et al., 1999)

**Tipo III** – Característica de solos sobre-adensados quando a poro-pressão é medida na posição  $u_2$ . O excesso de poro-pressão é superior à pressão hidrostática de equilíbrio ( $u_0$ ), tendo-se aumento da poro-pressão após a paralisação da penetração do cone e o decréscimo depois de atingir um determinado tempo  $t$ . A Figura 3.38 mostra o formato típico destas curvas.

**Tipo IV** – Típica de solos moderadamente a muito adensados, quando a poro-pressão é medida na posição  $u_2$ , podendo apresentar valores menores que da pressão hidrostática. A poro-pressão eleva-se acima da pressão de equilíbrio ( $u_0$ ) com posterior dissipação até  $u_0$ . Isto ocorre quando a taxa de redistribuição da poro-pressão é maior que taxa de dissipação no interior do volume de solo solicitado. A Figura 3.39 indica o formato destas curvas.

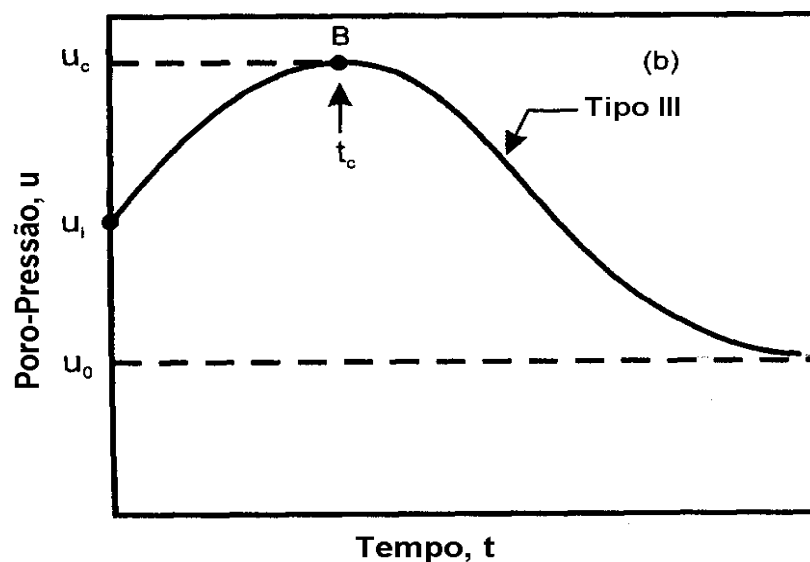


Figura 3.38 – Curva de dissipação tipo III, resposta da poro-pressão em solos finos sobre-adensados. Notar que a poro-pressão  $u_c$  tende a ser superior à poro-pressão inicial ( $u_i$ ), (Sully et al., 1999)

**Tipo V** – Também representam curvas típicas de solos moderadamente a muito pré-adensados, quando a poro-pressão é medida na posição  $u_2$ , podendo apresentar valores menores que da pressão hidrostática, eventualmente abaixo de zero. Neste caso a poro-pressão eleva-se até a pressão de equilíbrio e estabiliza-se. Isto ocorre quando a taxa de redistribuição da poro-pressão é menor que a taxa de dissipação. A Figura 3.39 indica as características deste tipo de curva.

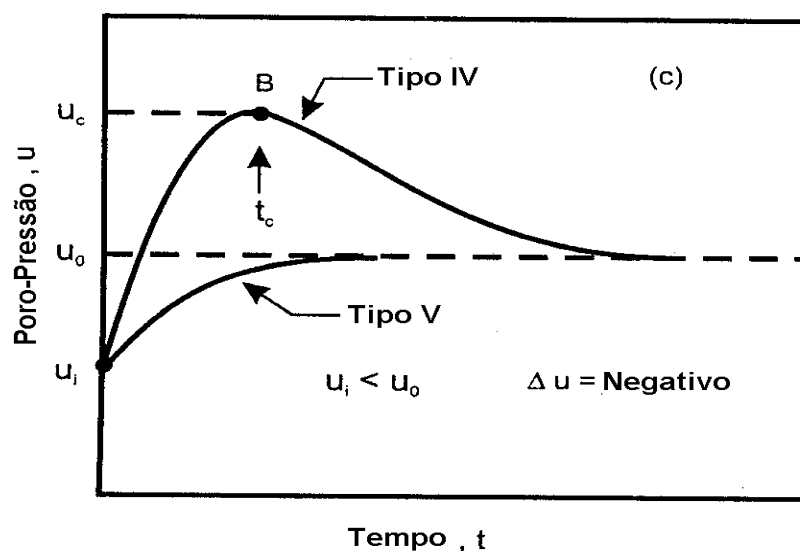


Figura 3.39 – Curvas de dissipação tipos IV e V, típicas de solos finos moderadamente a muito adensados. Notar que no início da curva a poro-pressão  $u_i$  é inferior a poro-pressão hidrostática ( $u_0$ ), (Sully et al., 1999).

### Correção das curvas dilatantes

A correção das curvas de dissipação tipo II, III e IV para estimativa dos valores de  $c_h$ , pode ser realizada através de dois procedimentos (Sully et al., 1999). Cada um deles fornece resultados distintos, devendo-se aplicar os dois métodos para fins de comparação e seleção do parâmetro mais adequado.

#### Gráfico de poro-pressão normalizada ( $u_n$ ) versus $\log t$

Seleciona-se o valor de pico como a máxima pressão ( $u_m$ ), durante a fase de elevação da poro-pressão, logo após a paralisação da penetração, conforme mostrado na Figura 3.40. O tempo ( $t$ ) equivalente a este valor de pico é considerado como  $t = 0$  no registro de dissipação, e os demais tempos ajustados adequadamente. A partir do valor de poro-pressão máximo e do novo  $t = 0$  equivalente aplica-se o método de Housby & Teh (1988).

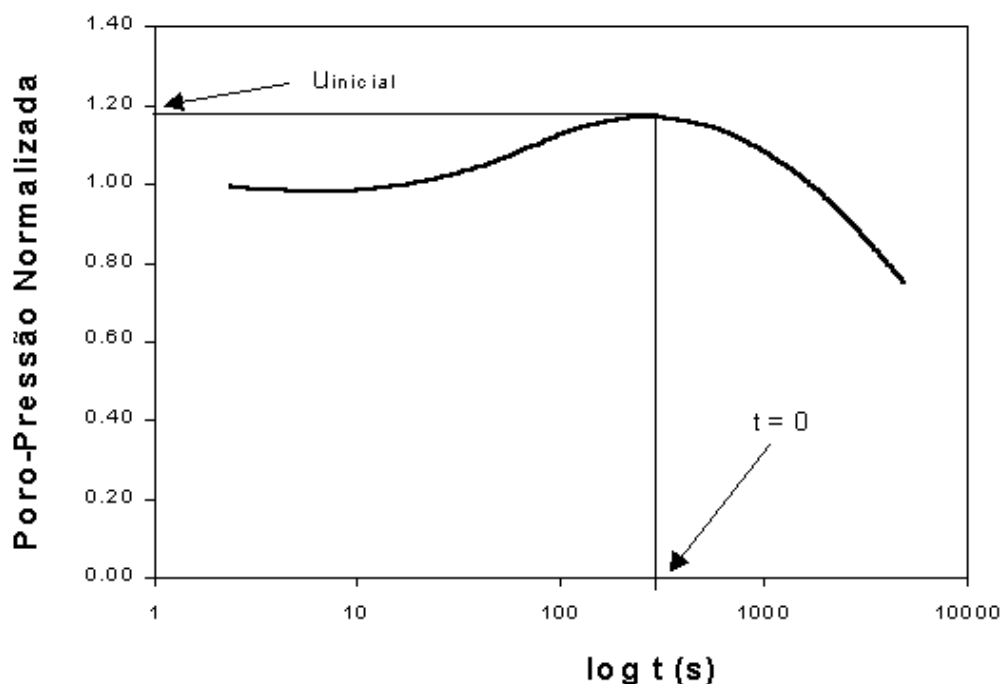


Figura 3.40 – Exemplo de curva de dissipação do excesso de poro-pressão no formato  $u$  normalizado contra raiz de  $t$ .



### Gráfico de poro-pressão normalizada ( $u_n$ ) versus raiz de tempo

Extrapolam-se o trecho reto da curva até  $t = 0$ , para obter o valor da poro-pressão máxima inicial, conforme indicado na Figura 3.41. A partir deste valor de poro-pressão máxima ( $u_m$ ) obtida da extrapolação do trecho reto e do  $t = 0$ , equivalente ao início do ensaio, aplica-se o método de Housby & Teh (1988). Este método é semelhante ao de Taylor para interpretação do  $t_{50}$ , no ensaio de adensamento em laboratório. Permite também a obtenção do  $t_{50}$  a partir da extrapolação de ensaios de dissipação de curta duração.

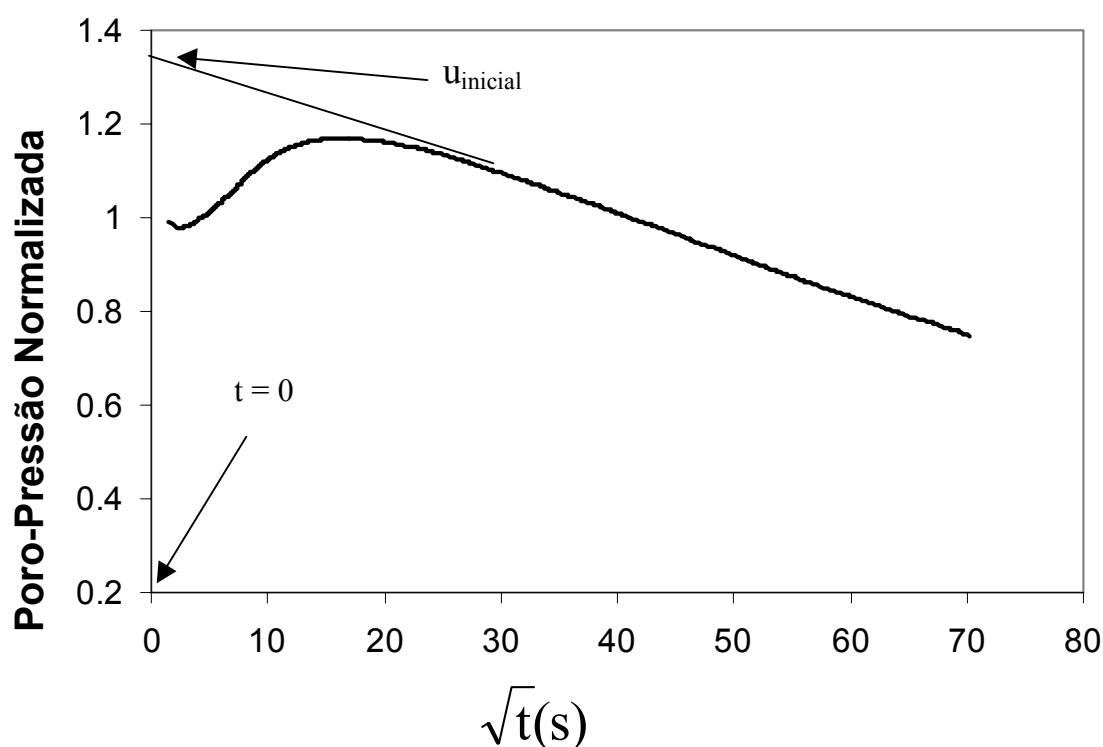


Figura 3.41 – Exemplo de curva de dissipação do excesso de poro-pressão no formato  $u$  normalizado contra raiz de  $t$ .

### Aplicação do método de Housby & Teh (1988) ao cálculo do $c_h$

As soluções teóricas para obtenção do  $c_h$  a partir do ensaio de dissipação da poro-pressão, fornecem aproximações razoáveis da distribuição da poro-pressão no entorno do piezocone. Inicialmente, as teorias embasavam-se na expansão de cavidades cilíndricas, e a partir dos trabalhos de Baligh (1985) e Housby & Teh (1988) o método da trajetória das deformações permitiu soluções mais coerentes para obtenção do coeficiente de adensamento.

No método proposto por Housby & Teh (1988) é ressaltada a importância da obtenção do Índice de Rigidez ( $I_r$ ) para interpretações mais refinadas do ensaio. O coeficiente de adensamento horizontal ( $c_h$ ) é calculado através da fórmula (25).

$$C_h = \frac{T^* R^2 \sqrt{I_r}}{t} \quad (25)$$

$T$  = fator tempo

$R$  = raio do piezocone

$t$  = tempo de dissipação

$I_r$  = índice de rigidez ( $G_0/S_u$ ).

A Tabela 3.3 apresenta os valores do Fator Tempo ( $T^*$ ) para a posição  $u_2$  de medição da poro-pressão. Com a adoção da expressão acima, Housby & Teh (1988) obtiveram uma faixa estreita de variação para as curvas teóricas de  $\Delta u/\Delta u_0$  versus  $T^*$ .

Tabela 3.3 – Fator tempo  $T^*$  para análise dos ensaios de dissipação (Housby & Teh, 1988)

	Fator Tempo $T^*$
$\Delta u/\Delta u_0$ (%)	Elemento poroso na base do cone ( $u_2$ )
80	0.038
70	0.078
60	0.142
50	0.245
40	0.439
30	0.804
20	1.600

Na Figura 3.42 é mostrada uma curva teórica de dissipação momotônica com indicação do tempo equivalente a 50 % de dissipação do excesso de poro-pressão ( $T_{50}$ ) e a poro-pressão equivalente ( $u_{50}$ ). Housby & Teh (1988) recomendam avaliar se a curva experimental simula a curva teórica admitida para poder aplicar o método.

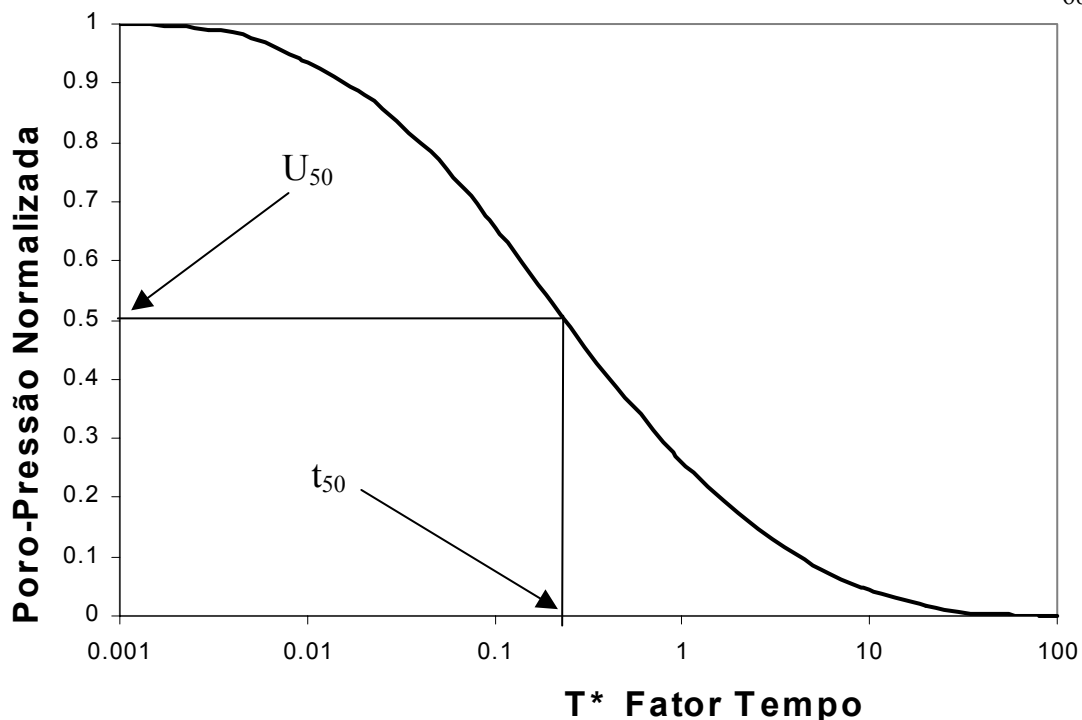


Figura 3.42 – Curva típica (Monotônica) do ensaio de dissipação.

O método para a determinação do  $c_h$  consiste num procedimento simples e direto. Um exemplo típico do ensaio de dissipação está ilustrado na Figura 3.39 e as etapas para a obtenção do  $c_h$  estão descritas a seguir:

- calcula-se a diferença entre a poro-pressão no início da dissipação ( $u_i = u_m$ ) e a poro-pressão hidrostática  $u_o$ ;
- calcula-se a percentagem da dissipação para  $\Delta u_{50\%} = (u_i - u_o)/2$ , e a partir da curva experimental determina-se o tempo real para ocorrer 50% da dissipação, no  $t_{50}$ ;
- obtém-se o Fator Tempo equivalente a 50% da dissipação da poro-pressão
- aplica-se a formulação indicada por Housby & Teh (1988).

### Permeabilidade

O coeficiente de permeabilidade pode ser determinado a partir do ensaio de dissipação descrito no item anterior (Mayne, 2002; Burns & Mayne, 2002) ou através de correlações diretas com os ábacos de classificação de solos, mostrado na Figura 3.43. A abordagem com base no ensaio de dissipação, considera a teoria do adensamento e a

avaliação do coeficiente de adensamento ( $c_h$ ) assumindo um fluxo radial. O coeficiente de permeabilidade horizontal ( $k_h$ ) é fornecido pela equação (26), proposta por Mayne (2002).

$$k_h = c_h \gamma_w / M \quad (26)$$

sendo  $M$  o módulo de compressão confinado, obtido a partir do resultado do ensaio oedométrico ou estimativas utilizando correlações com resultados de ensaios de campo.

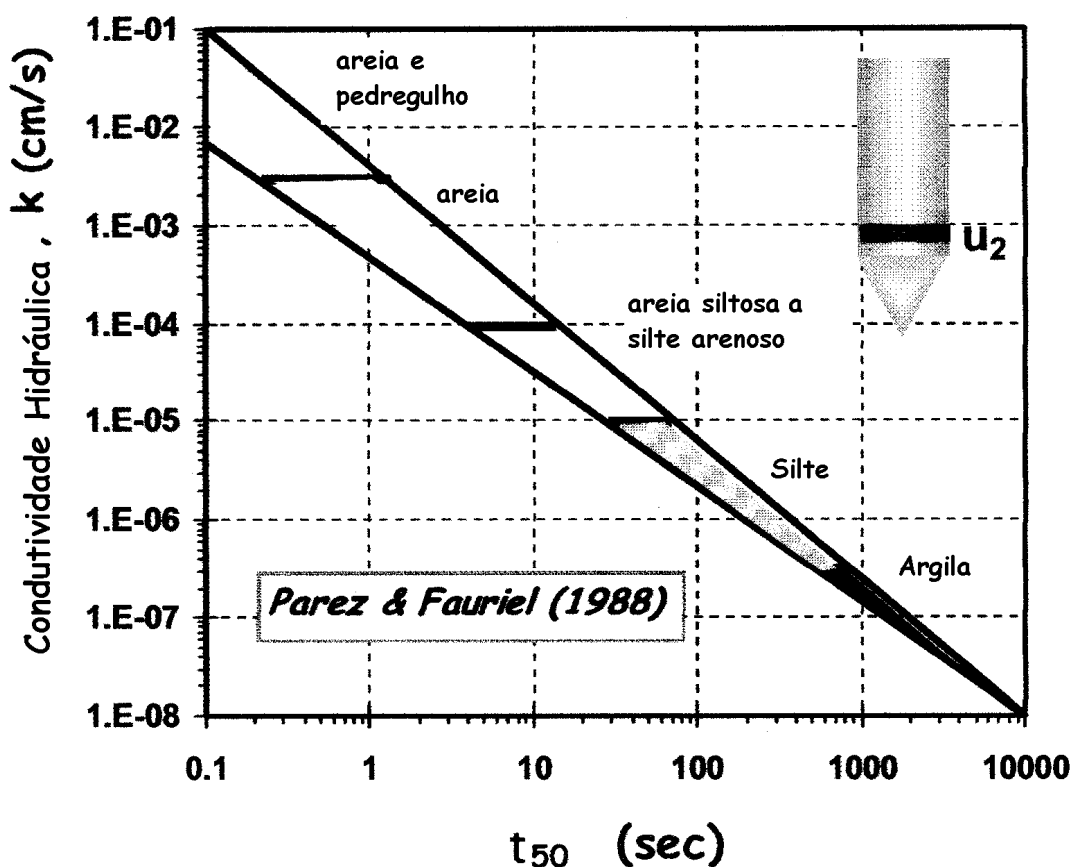


Figura 3.43 – Estimativa da Condutividade Hidráulica com base no ensaio de dissipação (Perez & Fauriel, 1988)

Burns & Mayne (2002) propõem uma metodologia para estimar a permeabilidade de um solo a partir do ensaio de piezocone sísmico empregando a mesma equação eq (27), porém utilizando o resultado do ensaio sísmico para obtenção do módulo de compressão confinada. A formulação geral é dada por:

$$M = 0,011 V_s^{2,43}, n = 77, r^2 = 0,80 \quad (27)$$

sendo  $V_s$  = velocidade da onda cisalhante

A correlação pode também ser feita com o módulo de cisalhamento ( $G_0$ ) na forma mostrada na eq. (28).

$$M = 0,017 G_0^{1,12} \quad (28)$$

Utilizando uma abordagem completamente distinta Song et al. (1999) propõem um método para estimar a permeabilidade com base no perfil de poro-pressão obtido nas posições  $u_2$  e  $u_3$ . Os autores consideram que a execução do ensaio de dissipação reduz sensivelmente a produtividade dos ensaios de piezocone, além disto não é possível obter um perfil contínuo de permeabilidade, devido ao elevado tempo necessário para estes ensaios. O método proposto está baseado na idéia de que existe uma relação clara entre as propriedades hidráulicas do solo e as diferenças de poro-pressão medidas nas posições  $u_2$  e  $u_3$ . Na penetração quasi-estática pode-se assumir que a tensão cisalhante em  $u_2$  e  $u_3$  é idêntica. As diferenças de poro-pressão entre as posições  $u_2$  e  $u_3$  são devidas a diferenças de tensão normal e de dissipação da poro-pressão. Apresentam, de forma conclusiva, que esta concepção está baseada na premissa de que as distribuições da poro-pressão nas posições  $u_2$  e  $u_3$  representam a curva de dissipação do excesso de poro-pressão induzido pela tensão normal, obtendo-se, desta forma, a medição contínua da geração e da dissipação da poro-pressão nas duas posições simultaneamente. Song et al. (1999) afirmam que conceitualmente a teoria é válida, porém os resultados experimentais são pouco conclusivos. Além disto, a inexistência de cones comerciais com medida simultânea de poro-pressão nas posições  $u_2$  e  $u_3$  limita aplicações práticas e pesquisas para estudar melhor esse aspecto.

### **3.5 – Identificação do perfil estratigráfico**

#### **3.5.1 – Considerações gerais**

A identificação do perfil geotécnico do solo, abrange a compartimentação das unidades e a caracterização dos materiais constituintes. As classificações têm objetivo de agrupar os diferentes tipos de solos em classes definidas por algum tipo de critério ou combinação de critérios. Este agrupamento tradicionalmente é realizado por critérios tácteis-visuais, a partir de sondagens a trado ou de simples reconhecimento com ensaio SPT, normalmente abrangendo a aplicação de um sistema de classificação desenvolvido

com base em ensaios de laboratório que consideram as características granulométricas e limites de consistência.

Qualquer ensaio de campo ou de laboratório pode servir de critério de classificação, porém os ensaios mais simples, baratos e rápidos têm sido convencionalmente utilizados para este fim (Carter & Bentley, 1991). Cada critério de classificação é função de um tipo de observação ou medição por instrumento. Na observação táctil-visual, existe uma influência considerável do nível de percepção ou experiência de cada pessoa, o que impõe um empirismo às classificações deste tipo. Quando um critério é definido a partir da medida de um instrumento a percepção perde em parte sua importância na fase de aquisição do dado, os resultados tendem a ser mais precisos e produzem uma classificação com menor empirismo, com base em resposta mecânica mais padronizada. Cada tipo de ensaio ou medição que utiliza sensores pode conduzir a um tipo de classificação, e a adequabilidade desta classificação será função da sensibilidade do instrumento ou sensor frente à propriedade investigada.

A maioria das classificações foi desenvolvida para solos que predominam na Europa e América do Norte, tipicamente de origem sedimentar, em climas frios, com comportamento geotécnico controlado basicamente pelo tamanho e constituição das partículas sedimentares, bem como pelo histórico de tensões que estas camadas foram submetidas. Os solos residuais receberam por muito tempo pouca atenção e foram pouco estudadas por situarem-se principalmente em regiões de baixo desenvolvimento econômico, contrastando com as regiões de grande desenvolvimento sobre solos tipicamente sedimentares (Lambe & Whitmann, 1969). O objetivo das classificações é agrupar solos com características semelhantes, de forma a obter informações sobre o comportamento de uma determinada classe de solo com base na classificação usada. As diversas classificações, quando aplicadas aos solos de climas tropicais, têm mostrado limitações sensíveis na previsão de comportamentos (Nogami & Villibor, 1981; Gidigas, 1990; Vargas, 1985,1990; Ajayi & Palogun, 1988).

Desta forma, surgiram classificações específicas, que consideram o comportamento do solo como parâmetro classificatório. A classificação proposta por Nogami & Villibor (1981) teve ampla divulgação com diversas aplicações em situações geotécnicas práticas envolvendo solos tropicais, principalmente na engenharia rodoviária (Nogami & Villibor, 1995).

No entanto é necessário que a aplicação destas classificações seja feita com base em um contexto geológico mais amplo. Tradicionalmente aplica-se o conceito de camada

extensivamente a todos os solos estudados pela engenharia porém, nos solos tropicais, este conceito falha. Materiais classificados como *solo* para a engenharia envolvem materiais granulares naturais de várias origens, que necessitam ser adequadamente compreendidos para que se possa interpretar adequadamente o perfil do terreno. Conforme está definido em Tognon (1985) solo para geotecnia significa: “*todo o material terroso encontrado na superfície da crosta de origem inorgânica ou orgânica que é escavável por meio de picareta, pá, escavadeira, etc. ou ainda que perde sua resistência quando em contato prolongado com a água. Em síntese todo material de imediata e fácil desagregação pelo manuseio ou ação de água*”. É um conceito amplo com pouca utilidade para a interpretação detalhada do perfil dos materiais inconsolidados. Já, o conceito de solo para a geologia, segundo Tognon (1985) tem uma conotação genética importante, e significa “*produto do intemperismo químico e físico das rochas, situado na parte superficial do manto de intemperismo. Constitui-se de material rochoso desintegrado e decomposto*”. Diferencia-se, desta forma, daqueles materiais inconsolidados (solo para a geotecnia) denominados *sedimentos*, que significam: “*material sólido, mineral ou orgânico, transportado ou que se moveu de sua área fonte por agentes transportadores (água, vento) depositado sobre a superfície terrestre acima ou abaixo do nível do mar*”. Estes sedimentos podem apresentar diferentes graus de consolidação, podendo caracterizar rochas moles, cujo comportamento é intermediário entre solo e rocha. Nos sedimentos, independente do estágio de consolidação, a interpretação é feita com base em conceitos geológicos, principalmente da estratigrafia e sedimentologia. Nesse caso, o conceito tradicional de camada é válido na interpretação. Já, nos solos formados por processos de intemperismo e morfogênese, o entendimento da distribuição dos materiais envolve a identificação dos processos que atuaram na formação do perfil atual dos materiais inconsolidados e envolve conhecimentos da área de pedologia, geomorfologia, geologia, entre outras (Bigarella et al., 1994; Gidigas, 1990 e Morrison, 1995). Desta forma, a história geológica recente influencia sensivelmente nas características dos materiais superficiais e é abordada sucintamente no próximo item.

### 3.5.2 – Influência da história geológica

Os solos sedimentares, principalmente aqueles das baixadas litorâneas e planícies aluviais recentes, são considerados geologicamente recentes e foram submetidos

predominantemente aos processos ligados à sedimentação. Por outro lado, os solos de regiões interiores, denominados de solos tropicais, foram submetidos a uma seqüência de processos de transformação das rochas preexistentes que permanecem registrados em maior ou menor intensidade nos perfis dos solos tropicais atuais. Grande parte destas transformações foram produzidas sob influência das mudanças climáticas ocorridas durante o Quaternário (Suguio et al., 1985; Angulo & Lessa, 1997).

Os estudos das mudanças ambientais do Quaternários estão ligados a duas linhas de pesquisas principais. A primeira estuda principalmente as regiões litorâneas, os sedimentos, flora e fauna, estudando as variações sucessivas de paleoambientes e procurando identificar as mudanças climáticas com base nas variações do nível médio dos mares e pela distribuição dos sedimentos. O segundo tipo de estudo enfoca as mudanças geomorfológicas ocorridas nos terrenos de diversas regiões do interior do Brasil, através de estudos de morfogênese e pedogênese condicionadas pelas variações paleoambientais (paleoclimáticas e neotectônicas) ocorridas no Quaternário.

É importante observar que os processos de intemperismo ocorrem simultaneamente ao da morfogênese, resultando em diversos tipos de perfis de solo, com características e distribuição espacial controladas pelas condições de clima e tectonismo, principalmente durante o período Quaternário (2,6 Ma). Na Figura 3.44 é mostrada a concepção de Morrison (1995), onde a evolução da paisagem e dos perfis de solo, principalmente durante o Quaternário, ocorre em ciclos que alternam erosão, sedimentação e estabilidade. Nas fases de estabilidade os processos de pedogênese tornam-se predominantes, e a repetição dos vários ciclos deixa registros na morfologia do terreno, através de pedimentos e pediplanos, conforme aqueles identificados por Bigarella et al. (1965). Nas regiões submetidas a intenso processo de intemperismo tropical ocorrem transformações, nas porções mais superficiais do terreno, devido a infiltração de água edáfica, que leva à formação dos denominados solos lateríticos, onde parte da fração argilosa é lixiviada, ocorrendo cimentação por óxidos de ferro e alumínio, levando à formação de crostas ferríferas (ferricretes), aluminosas (alcretes) ou silicosas (silcretes). Estes solos passam a apresentar uma estrutura porosa, freqüentemente colapsível, de grande importância para a geotecnia, e que deve necessariamente ser identificado e mapeado durante as campanhas de investigação geotécnica e geoambiental. Nestas situações, os conhecimentos de geomorfologia passam a ser indispensáveis, pois grande parte dos processos tropicais resultam em diferentes padrões morfológicos do terreno.



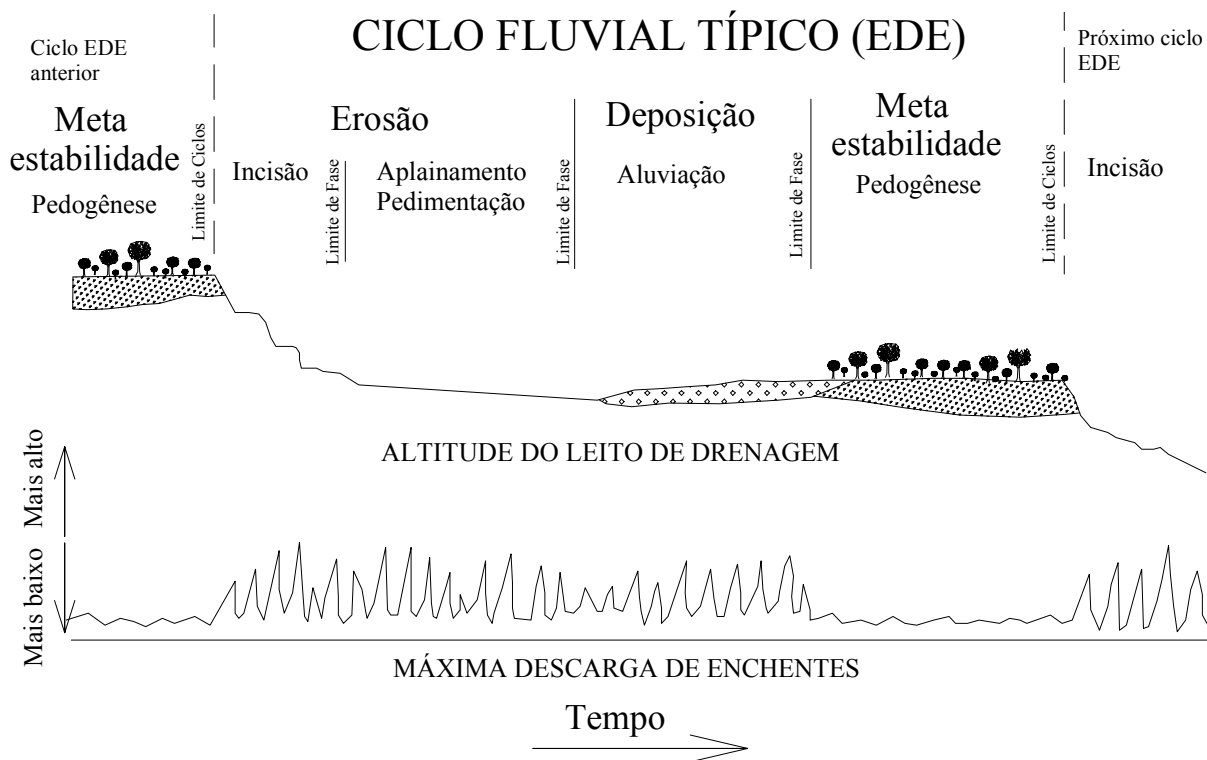


Figura 3.44 – Ciclos de erosão, deposição e estabilidade (EDE), em ambiente continental fluvial, submetido a mudanças climáticas cíclicas. Morrison (1995) Modificado.

Os registros da história da evolução do Quaternário permitem algumas considerações úteis para interpretação da história de formação dos solos nesta área, baseadas nos trabalhos de Bigarella et al. (1965), Suguio et al. (1985) e Ledru et al. (1996), entre outros. O período Quaternário engloba duas épocas: o Holoceno até aproximadamente 10.000 a 12.000 anos atrás, e o Pleistoceno até aproximadamente 2,6 Ma. atrás, e a separação entre estas duas épocas é feita com base nas superfícies erosivas que separam os dois períodos. No entanto, como no Brasil não ocorreu esta glaciação, muitos dos depósitos continentais não podem ser diferenciados segundo esta subdivisão. Por outro lado, esta última glaciação mundial interferiu no clima e no Nível Médio dos Mares, conforme será abordado no item 4.3.1. Considera-se que o máximo avanço desta glaciação ocorreu em torno de 20.000 anos atrás. Entre 20.000 e 12.000 anos atrás ocorreu aumento da temperatura e das chuvas, com desenvolvimento de um intenso processo erosivo e formação de extensos colúvios registrados em nível mundial (Bigarella et al., 1965; Thomas & Torp, 1995 e Morrison, 1995). Durante esta fase devem ter sido esculpidos os padrões regionais de relevo atualmente identificados na paisagem do Sul e Sudeste do Brasil. Os depósitos neocenozóicos que abrangem grandes áreas do interior do Estado de São Paulo devem ter se desenvolvido neste período, tendo como exemplo os

solos coluviais mais superficiais, acima da linha de seixos, identificados em São Carlos, Campinas e Bauru. A própria gênese destes colúvios é controversa, pois, para as porções mais inferiores das vertentes é aceitável o processo de formação por coluvionamento, porém nas porções de topos de morros não é perfeitamente aceitável.

Conforme Morrison (1995), entre outros autores, o período Quaternário apresentou mudança climáticas intensas, que resultaram em mudanças cíclicas (Figura 3.4.4) nos processos fluviais, coluviais, eólicos e pedogenéticos e modelaram a superfície atual do terreno, devendo-se entender a história geológica do Quaternário como responsável por grande parte das características dos perfis de solos presentes nas regiões estudadas. Na interpretação geomorfológica, necessária para o entendimento da distribuição dos solos tropicais, nas regiões estudadas, um conceito que pode orientar as pesquisas é o de pediplano, que representam rampas dissecadas, de extensão regional, relacionadas, na maioria dos casos, a condições climáticas passadas, quando a natureza e intensidade dos processos superficiais promoveram extensa degradação lateral da paisagem. Bigarella et al. (1965) identificaram três pediplanos, ou superfícies de erosão, extensivas a grande parte do Brasil: Pd3, de provável idade Oligocena, sendo a superfície superior; Pd2, de idade provável Pliocena Inferior, sendo a superfície média, e Pd1, de idade Paleógena, sendo a superfície inferior, e de grande abrangência no Sul-Sudeste do Brasil, correlata aos depósitos da Formação Rio Claro. A identificação destas superfícies, por critério geomorfológicos, pode orientar no entendimento do grau de evolução pedogenética e morfogenética de cada local investigado.

### 3.5.3 – Perfil Geotécnico com base nos resultados dos ensaios de piezocone

As classificações com base nos resultados de ensaios de piezocone, são consideradas indiretas, pois durante o ensaio não se obtém amostras de solo. Desta forma, diversos ábacos propostos (Begeman, 1965; Douglas & Olsen, 1981; Robertson et al., 1986; Robertson, 1990, Fellenius & Eslami, 2000) avaliam o comportamento dos solos frente a cravação de uma ponteira cônica instrumentada e não relacionam diretamente com as suas características granulométricas. Existem basicamente 3 fatores que controlam a resistência de ponta ( $q_c$ ), o atrito lateral ( $f_s$ ) e a poro-pressão ( $u$ ), que são: os equipamentos e procedimentos, a constituição do solo e as condições ambientais (Douglas & Olsen, 1981). Ao alcançar uma rigorosa padronização dos equipamentos e procedimentos, ainda

permanecem a constituição do solo e as condições ambientais como fatores intervenientes. Estes dois fatores se manifestam nos ábacos de classificação indicando duas tendências básicas, refletidas através das linhas de formato curvo, quase ortogonais, que definem as regiões dos diferentes tipos e condições de solo (Zhang & Tumay, 1996). O tipo de solo pode mudar segundo uma direção e características de campo, como OCR, sensibilidade e densidade relativa mudam em outra direção. Desta forma, as cartas de classificação mais comuns são similares no sentido de que solos arenosos geralmente apresentam alta resistência de ponta e baixa razão de atrito; e os solos argilosos geralmente apresentam baixa resistência de ponta e elevada razão de atrito. Os parâmetros  $q_c$ ,  $f_s$  e  $u$  tendem a aumentar com o aumento da tensão vertical (Robertson, 1990). Em função disto, surgem diversas correções para tensão vertical, através da normalização dos resultados do ensaio de piezocone, refletidas em algumas das cartas de classificação, como na de Robertson (1990). No entanto, a normalização dos resultados do ensaio de piezocone deve também considerar os efeitos da tensão horizontal, já que este fator tem forte influência na estimativa de parâmetros a partir dos resultados do ensaio de piezocone (Mayne & Kulhawy, 1982; Chen & Mayne, 1994, 1996), porém apresenta dificuldade de determinação no campo.

Lunne et al. (1997) consideram que a interpretação dos ensaios de cone realizados em solos sedimentares (“convencionais”) é bastante conhecida e pode fazer uso extensivo das diversas correlações existentes. Já, nos solos siltosos, concrecionados (“não-convencionais”), os ensaios de piezocone requerem especial atenção durante execução e interpretação. A classificação proposta por Douglas & Olsen (1981), procura correlacionar os valores de  $q_c$  e de  $R_f$  com a classificação USCS (*Unified Soil Classification System*), porém apresenta uma certa complexidade e foi desenvolvida com base em dados produzidos nos EUA (Califórnia, Oklahoma, Utah, Arizona e Nevada). Desta forma, Robertson et al. (1986) propuseram uma adaptação dessa classificação, adicionando dados de ensaios realizados no Canadá pela ISTG da UBC e propuseram uma classificação mais simples, porém de mais difícil compreensão (Campanella et al., 1998).

Classificações com ênfase em solos tropicais (Nogami & Villibor, 1981) mostram que o comportamento está ligado a gênese, e que fatores ligados a morfologia do terreno são também fundamentais na compartimentação dos diversos tipos de perfis de solo.

A experiência nigeriana, relatada por Ajayi & Balogun (1988), mostrou que os resultados dos ensaios de penetração de piezocone foram considerados adequados nas regiões de solos sedimentares. Já, nas regiões de solos lateríticos, eluviais (residuais) e

colúviais, as aplicações foram limitadas quando comparadas com aplicações realizadas na Europa. Ressaltam que nos solos tropicais o atrito lateral desenvolvido é maior que nos solos sedimentares convencionais.

Desta forma, os solos presentes em regiões de climas tropicais, abrangem ao menos dois grandes grupos:

- *aqueles formados em regiões de baixadas e planícies litorâneas, tipicamente sedimentares, com nível d'água próximo a superfície, onde já existe larga experiência internacional na utilização dos ábacos de classificação dos ensaios de piezocone e onde muitas das correlações disponíveis foram propostas;*

- *aqueles desenvolvidos a partir da alteração intempérica tropical, no local, de diversos tipos de rochas. Nestes casos o tipo de perfil está intimamente associado ao tipo de rocha de origem, às condições climáticas pretéritas e atuais, além da condição tectônica de cada local. Existe pouca experiência na aplicação dos ábacos e correlações com os resultados do ensaio de piezocone.*

#### 3.5.4 - Identificação do limite entre as camadas

A compartimentação das camadas a partir dos resultados dos ensaios de piezocone é feita a partir da identificação de mudanças na resposta de cada sensor. Pode ser feita de forma visual ou utilizando métodos estatísticos, descritos no item 4.3.2.1. Os métodos estatísticos, além de permitirem avaliação integrada dos três sensores principais do piezocone, eliminam um pouco do empirismo na definição dos estratos, que ocorre com frequência quando a divisão é feita somente por critérios visuais.

A resistência de ponta é influenciada pelas propriedades do solo situado à frente da ponteira do cone. Esta é sensibilizada por uma extensão que pode variar de 5 a 10 vezes o seu diâmetro (Schmertmann, 1978) e que aumenta com o aumento da rigidez do solo. Segundo Roberson & Campanella (1983), para um cone padrão, de 10 cm<sup>2</sup> de área, a resistência total da camada só é obtida em camadas com espessuras entre 36 e 72 cm. Este comportamento da resistência de ponta tem implicações na precisão da determinação das transições das camadas em profundidade e deve ser considerado na avaliação precisa das profundidades.

### 3.5.5 - Ábacos de classificação indireta

As classificações que utilizam os resultados do ensaio de CPT ou CPTU são geralmente feitas através de ábacos que combinam os parâmetros obtidos no ensaio, correlações com outros ensaios e descrições de amostras coletadas próximas aos ensaios de cone. As primeiras classificações, como a de Beggemann (1965), mostrada na Figura 3.45, utilizaram os dados de resistência de ponta ( $q_c$ ) no eixo Y e o atrito lateral local ( $f_s$ ) no eixo X, com base em resultados de ensaios com o cone mecânico de atrito, desenvolvido por Beggemann (1953).

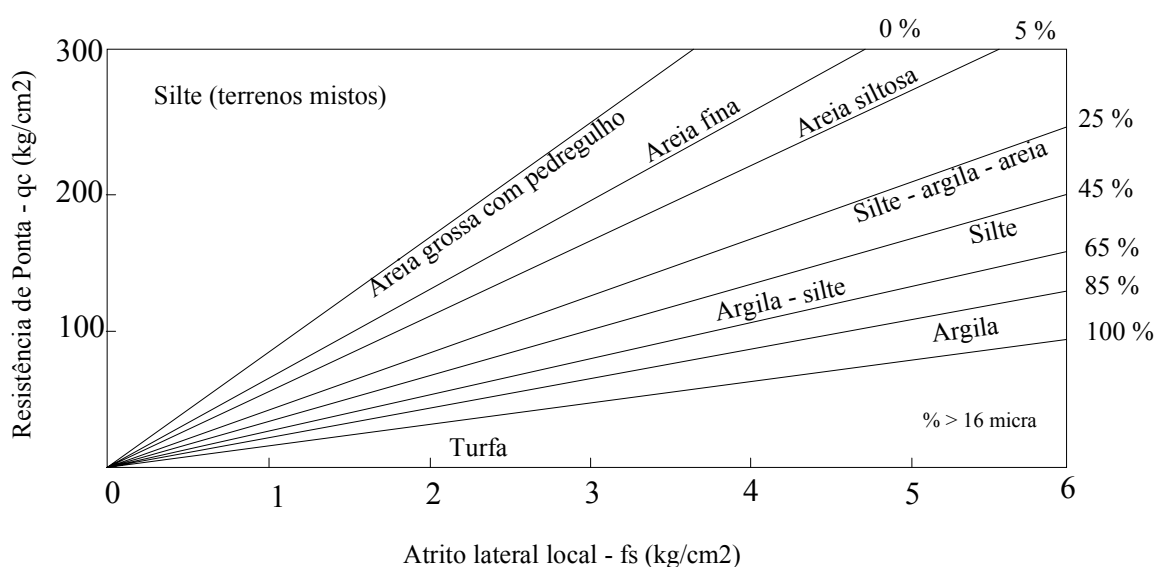


Figura 3.45 – Ábaco de Classificação de Beggemann (1965), com base nos registros de  $q_c$  e  $f_s$ , em  $\text{Kg/cm}^2$ , utilizando um cone mecânico..

Com base em dados obtidos em diversos tipos de solos na Flórida (USA) e utilizando um cone mecânico tipo Beggemann, Schmertmann (1969, apud Cestari, 1990), elaborou um ábaco relacionando a resistência de ponta ( $q_c$ ) com a razão de atrito ( $R_f$ ), fornecendo indicações de compactidade e consistência dos solos estudados. A Figura 3.46 mostra este ábaco, com indicações de comportamento do solo.

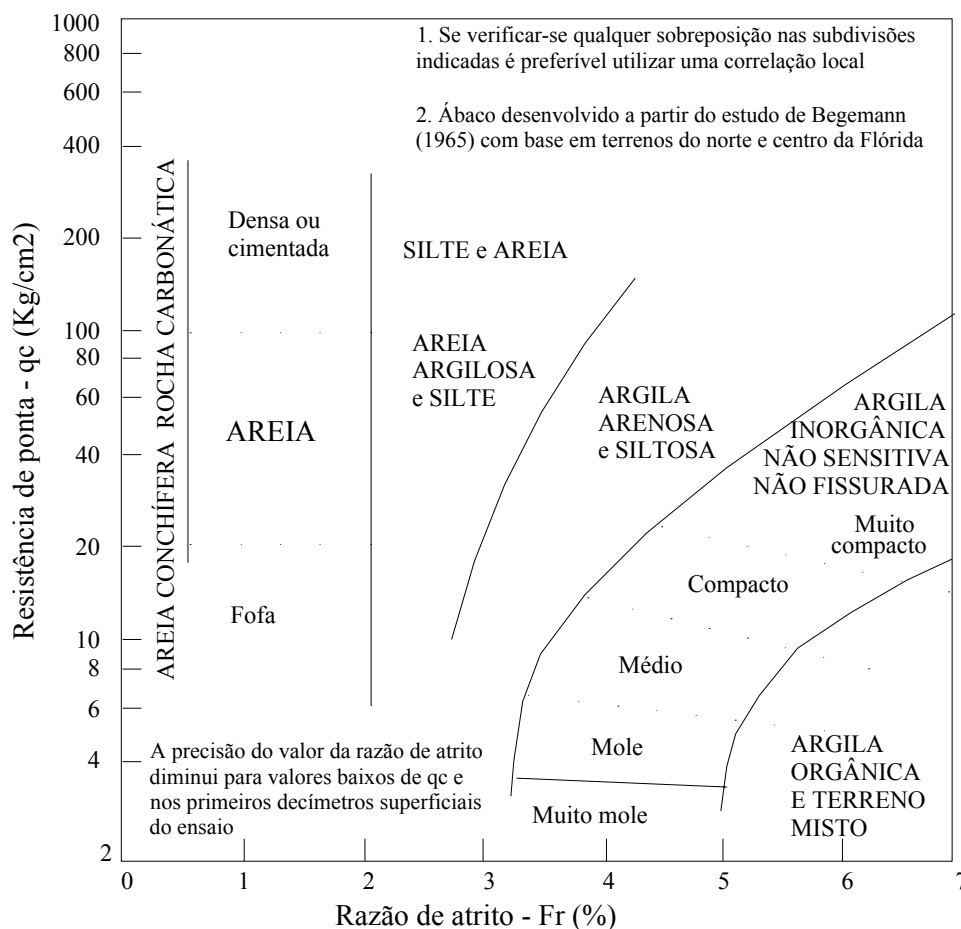


Figura 3.46 – Ábaco de Classificação proposto por Schmertmann (1969) citado por Cestari (1990), com base em resultados de ensaios de cone mecânico tipo Begemann (1968),

Na década de 60 surgiram os cones elétricos, que funcionam com sensores tipo “strain-gauges”, instalados na extremidade dos cones, e que registram os parâmetros em intervalos de até 1 cm, fornecendo perfis praticamente contínuos. O ábaco proposto por Douglas & Olsen (1981), mostrado na Figura 3.47, foi o primeiro a utilizar resultados de cones elétricos, considerados mais precisos. Nesse são plotados os valores da resistência de ponta ( $q_c$ ) contra a razão de atrito ( $R_f$ ), e fornece informações sobre a constituição granulométrica, com indicativos da tendência de  $K_0$ , das variações do tamanho dos grãos nas areias e do aumento do índice de vazios.

Olsen & Malone (1988) também utilizam uma estrutura de ábaco com resistência de ponta contra razão de atrito, porém corrige os resultados para o efeito da tensão vertical ( $\sigma_v$ ) e apresenta indicações da correspondência com a classificação USCS, conforme indicado na Figura 3.4.8.

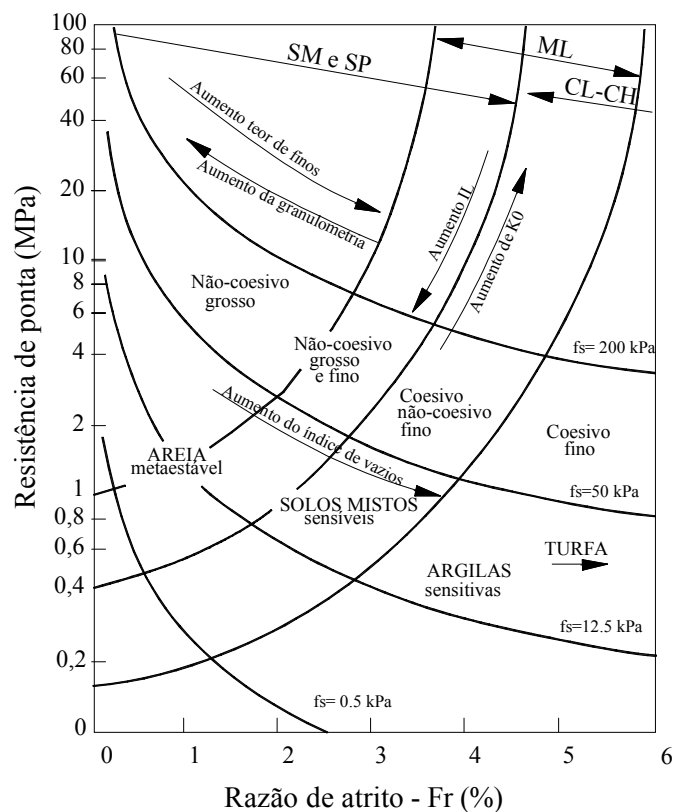


Figura 3.47 – Ábaco de Classificação de Douglas & Olsen (1981), com base em resultados de ensaios de cones elétricos e com indicações do tipo de solo e do comportamento geotécnico.

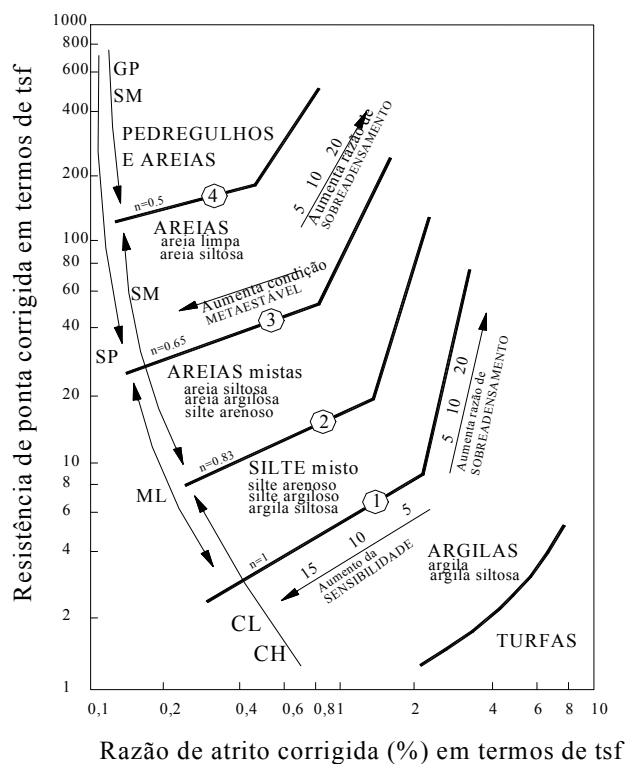
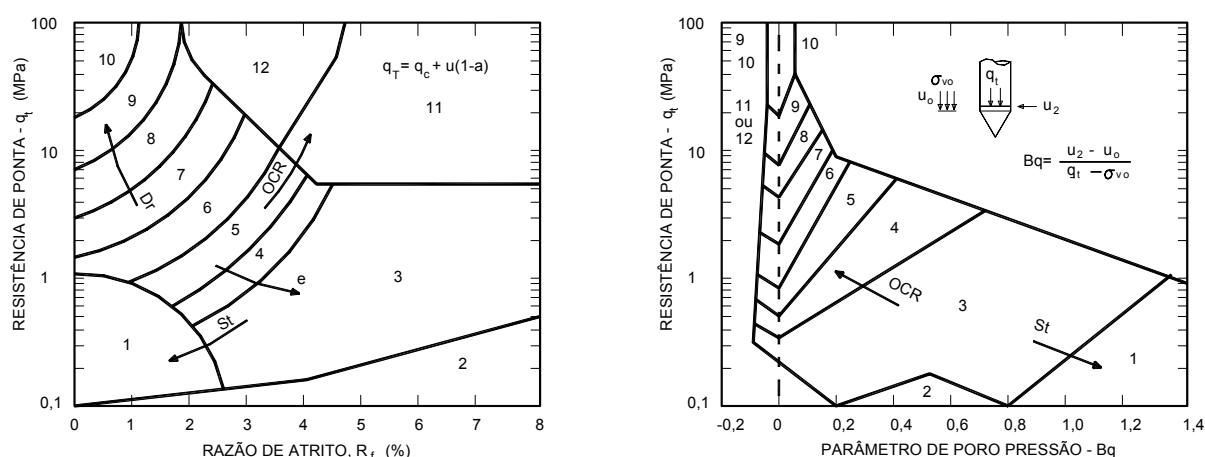


Figura 3.48 – Ábaco de Classificação de Olsen & Malone (1988), com base em resultados de ensaios de cones elétricos.

O surgimento do piezocone, com a inserção de sensor de poro-pressão simultaneamente aos demais sensores, ocorreu no início da década de 80 ampliando substancialmente o potencial de uso dessa ferramenta e dando início ao desenvolvimento de uma infinidade de micro-sensores para uma diversidade de aplicações. A Figura 3.49 mostra a proposta de Robertson et al. (1986) para um novo ábaco de classificação, com objetivo de simplificar aquele proposto por Douglas & Olsen (1981) e de incluir as informações fornecidas pelo parâmetro de poro-pressão.



SBT	Tipo de comportamento do solo
1	Solos finos sensíveis
2	Solos orgânicos
3	Argila
4	Argila siltosa a argila
5	Silte argiloso a argila siltosa
6	Silte arenoso a silte argiloso
7	Areia siltosa a silte arenoso
8	Areia a areia siltosa
9	Areia
10	Areia pedregulhosa a areia
11	Solo fino muito rijo *
12	Areia a areia pedregulhosa *
	* Pré-adensado ou cimentado

Figura 3.49– Ábaco de Classificação de Robertson et al. (1986), contemplando a poro-pressão.

Senneset et al. (1989) propõem um ábaco de classificação com base na resistência de ponta corrigida ( $q_t$ ) e na razão de poro-pressão ( $B_q$ ). O uso do parâmetro  $B_q$  também é sugerido por Wroth (1994) como o mais adequado para representar a poro-pressão. Neste ábaco, mostrado na Figura 3.50, são introduzidos solos com excesso de poro-pressão negativa, normalmente considerados solos dilatantes, como as areias densas e os siltes compactos. Este aspecto é fortemente influenciado pela posição de medida da poro-



pressão, sendo considerada padrão a posição  $u_2$ , atrás da base do cone, que é a normalmente utilizada nos ábacos classificatórios.

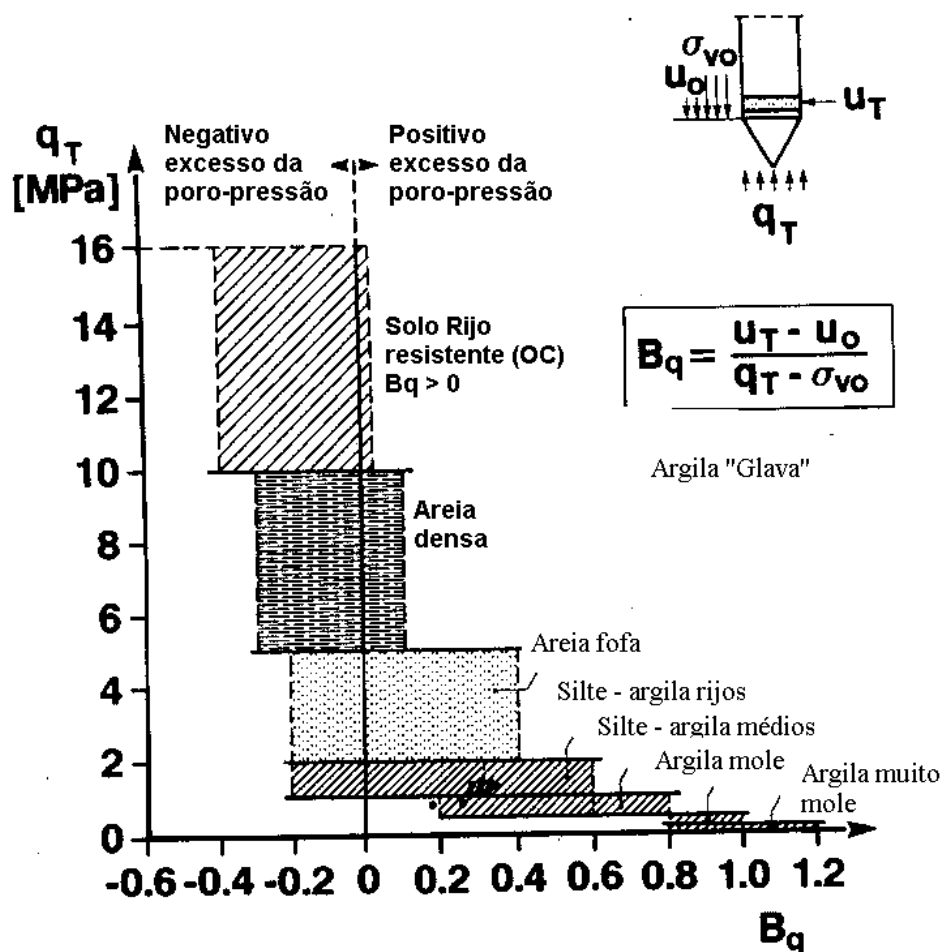


Figura 3.50 – Ábaco de Classificação de Senneset & Jambu (1988), adaptada por Senneset et al. (1989), utilizando os parâmetros  $q_t$  e  $B_q$ , com inserção de classes na faixa de poro-pressão negativa..

Robertson (1990) aprimorou a classificação precedente, considerando a correção devida à tensão vertical total, aplicada aos resultados de  $q_c$ . Os ábacos desta classificação são apresentados na Figura 3.51. Esta classificação é apropriada para investigações profundas e para aqueles perfis de solos onde os efeitos da tensão vertical são marcantes e crescentes com a profundidade. Neste gráfico, são plotados os resultados da resistência de ponta normalizada ( $q_t - \sigma_{v0}$ ), em MPa, nas abcissas e o parâmetro de poro-pressão ( $B_q$ ) em MPa ou a Razão de Atrito ( $F_r$ ) em %, nas ordenadas.

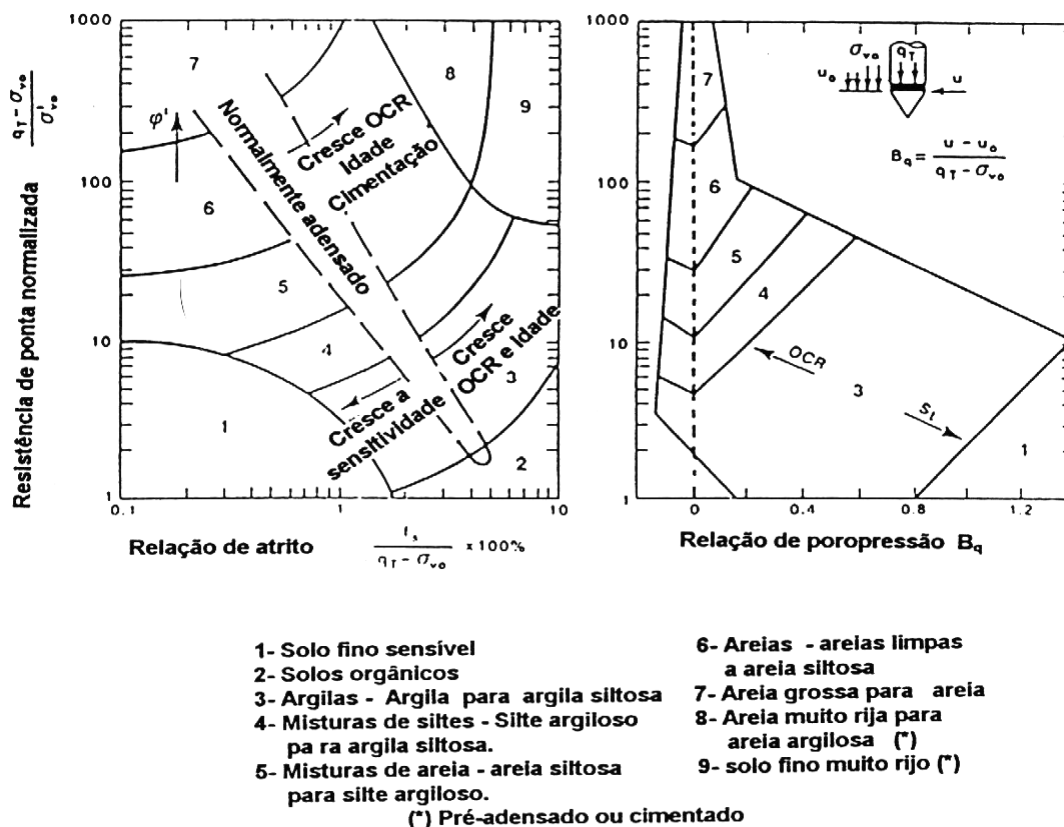


Figura 3.51 - Ábaco de classificação proposto por Robertson (1990) com base em resultados de ensaios de piezocone

Os resultados dos ensaios de piezocone são mais frequentemente utilizados na investigação de solos moles, muito úteis nos estudos de fundações de plataformas petrolíferas em fundos submarinos, sendo que as dificuldades em coletar amostras conduziram ao uso mais intensivo dos ensaios de campo, principalmente o piezocone, fazendo surgir classificações específicas para cada fim.

Neste sentido, Cheng-hou et al. (1990) propuseram um ábaco de classificação, mostrado na Figura 3.52, onde, segundo os autores, todas as informações são obtidas diretamente dos resultados do ensaio de piezocone, sem necessidade de estimativa de parâmetros ou execução de ensaios adicionais. Para tanto, definem um novo parâmetro,  $\sigma_e$ , que é a pressão equivalente, introduzido para normalizar a resistência de ponta e definir uma nova razão de poro-pressão ( $B_p$ ). No ábaco é plotada a relação entre  $\log(q_t/\sigma_e)$  e  $B_p$ . Com base nesta carta é definido um parâmetro  $N_h$ , para distinguir os diferentes tipos de solos. O parâmetro  $\sigma_e$  é definido como a pressão de coluna de água, igual a profundidade do elemento de solo em questão ( $\sigma_e = 10 h$ , em kPa, onde  $h$  é a profundidade em metros). O parâmetro  $B_p$  representa uma medida da variação da poro-pressão e é definido pela eq. (29).

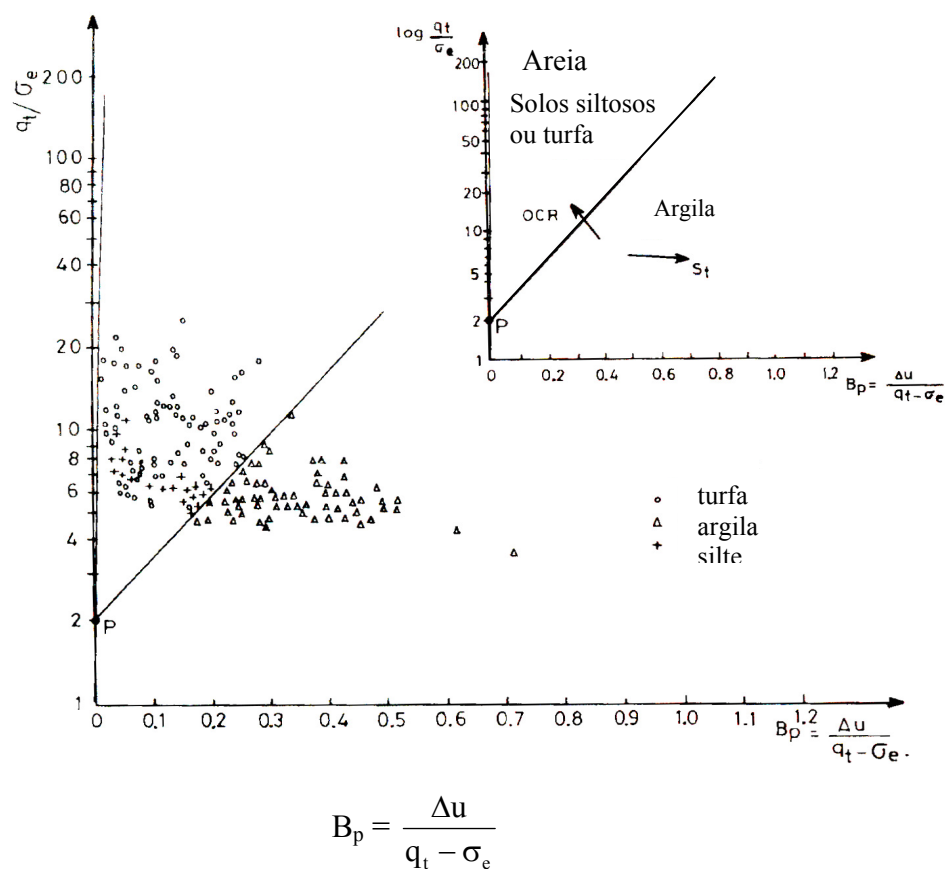


Figura 3.52 – Ábaco de Classificação proposto por Cheng-hou et al. (1990).

Classificações para usos específicos também foram desenvolvidas, para permitir uma melhor interpretação dos resultados dos ensaios de piezocone. Mlynarek & Tschuschke (2001) propuseram uma carta de classificação aplicável aos sedimentos depositados em barragens de rejeito de cobre, ouro e prata. Com objetivo de construir um método de classificação estatístico foi admitido que as linhas de separação entre as classes é uma função linear ou quadrática. Uma classificação dos sedimentos de barragens de rejeitos é indicada na Tabela 3.6, representada na Figura 3.53, como uma primeira tentativa de classificação destes resíduos com base nos resultados dos ensaios de piezocone (Tschuschke et al., 1992, apud Mlynarek & Tschuschke, 2001).

Tabela 3.6 – Classificação dos tipos de solo que ocorrem em barragens de rejeito (Tschuschke et al., 1992, apud Mlynarek & Tschuschke, 2001)

Grupo de rejeito	Tipo de solo	$R_f = f_s/q_c$	$I/R_f$	Areia	Silte	Argila
-	-	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
I	Areia fina	0,17	-	>90	<10	<2
II	Areia siltosa	0,42	-	70-90	10-30	<2
III	Silte arenoso	0,71	-	50-70	30-50	<2
IV	Silte	-	0,90	<70	>30	2-10
V	Argila siltosa	-	0,45	<40	>50	>10

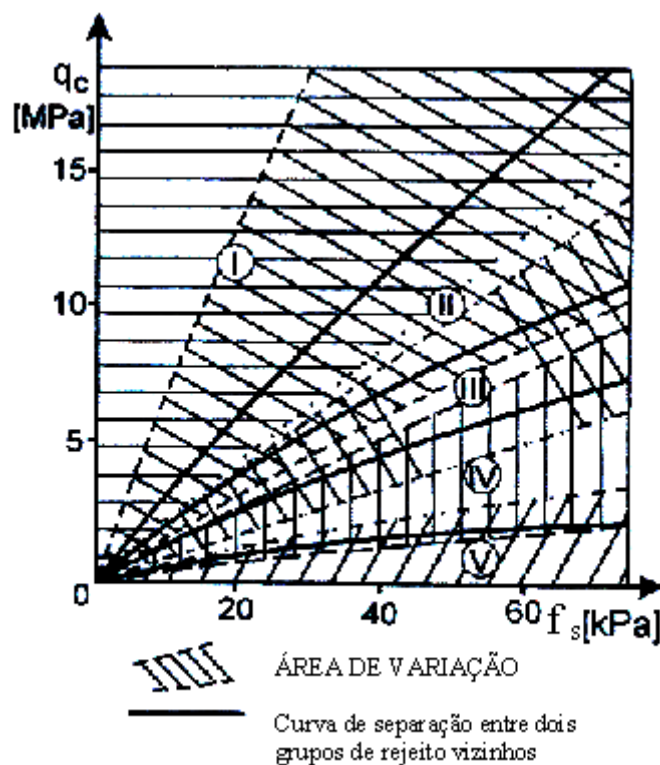


Figura 3.53 – Ábaco de Classificação de Solos proposto por Tschuschke et al. (1992) apud Mlynarek & Tschuschke, 2001) mostrando que existe uma superposição entre as classes de solos.

Mlynarek & Tschuschke (2001) propuseram, desta forma, dois ábacos com formatos distintos, sendo um com base na relação  $q_c$  e  $f_s$ , e o outro com base na relação  $q_c$  e  $R_f$  (Razão de Atrito). A Figura 3.54 mostra a distribuição das classes indicadas da Tabela 3.6, definidas com base em critérios estatísticos e ensaios realizados em barragens de rejeito.

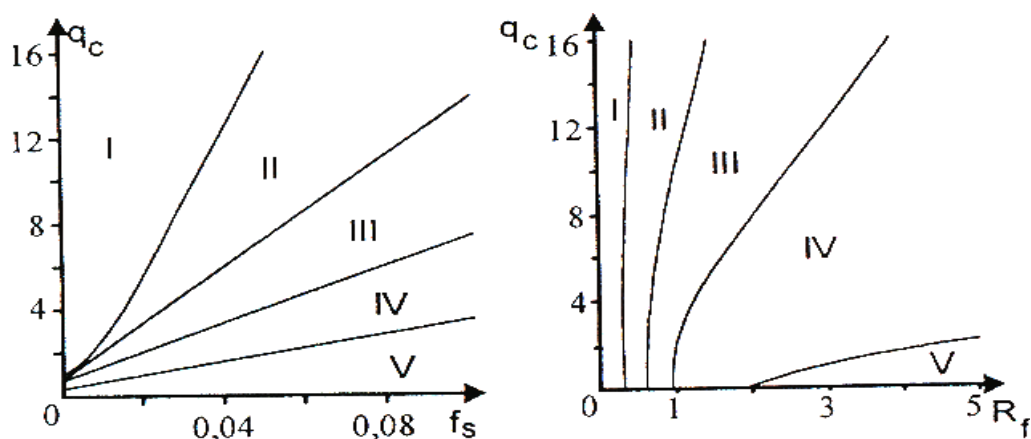


Figura 3.54 – Ábaco de Classificação proposto por Mlynarek & Tschuschke (2001) para sedimentos de barragens de rejeito e considerando os parâmetros  $q_c$ ,  $f_s$  e o  $R_f$ .

Fellenius & Eslami (2000) propuseram uma classificação com base no parâmetro  $q_e$  (resistência de ponta efetiva) e no parâmetro  $f_s$  (atrito lateral). A resistência de ponta efetiva é definida como a diferença  $q_t - u$ . Os autores ressaltam que o uso do parâmetro  $R_f$  (razão de atrito) não respeita uma regra de construção de gráficos que recomenda que a mesma variável não esteja presente nos dois eixos. Isto acontece nos ábacos convencionais onde o resultado da resistência de ponta aparece como componente nos dois eixos. Com esta proposta os autores retomam a idéia original da classificação de Beggemann (1965) onde o ábaco é plotado com os parâmetros  $q_c$  e  $f_s$ . A Figura 3.55 mostra o ábaco de Fellenius & Eslami (2000) que os próprios autores consideram mais simplificado e fácil de usar.

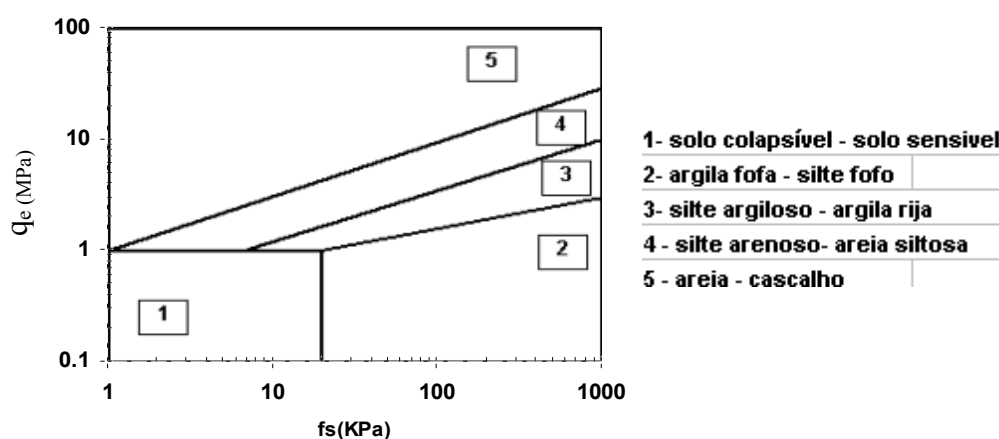


Figura 3.55 – Ábaco de Classificação proposto por Fellenius & Eslami (2000)

Sabe-se que o comportamento do solo é complexo e de difícil previsão. Solos, como argila pura em um extremo ou areia pura em outro extremo, tem seus comportamentos

razoavelmente entendidos e modelados. No entanto, raramente estes solos são encontrados na natureza, sendo mais freqüente a ocorrência de solos na forma de misturas controladas pelo comportamento particular de cada componente presente e pela estrutura do solo. Zhang & Tumay (1999) propuseram uma nova forma de abordar a classificação dos solos com base no resultados dos ensaios de piezocone, utilizando conceitos da lógica fuzzy e uma classificação probabilística. Os autores consideram os ábacos de classificações, com base em resultados de ensaios de piezocone, um reflexo da resposta física do solo à intrusão do cone, e que de alguma forma indica uma propriedade mecânica do meio ensaiado, como a resistência, a compressibilidade, ou outra. Na classificação de Zhang & Tumay (1999) as principais classes de solos são: HPC – alta probabilidade argila, HPM – alta probabilidade de mistura, HPS – alta probabilidade areia, baseados na freqüência relativa de U. Na Figura 3.56 é mostrado um perfil classificado de acordo com critérios probabilísticos.

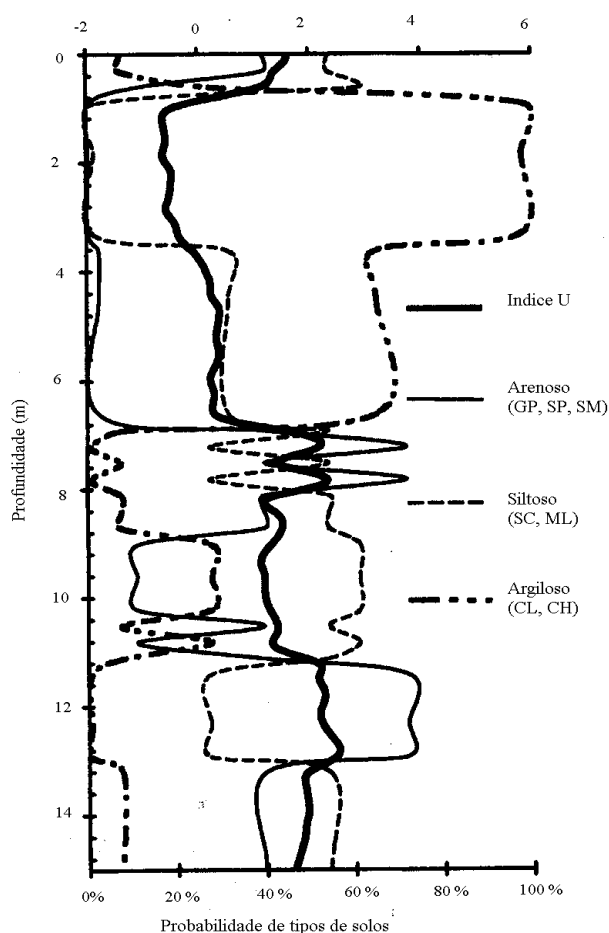


Figura 3.56 – Exemplo de perfil de probabilidade de ocorrência de tipos de solo com base na aplicação da lógica fuzzy aos resultados dos ensaios de piezocone (Zhang & Tumay, 1999).

Os solos, nestes três grupos, têm fundamentalmente diferentes propriedades geotécnicas, mas não existe limite abrupto entre eles e as mudanças são graduais. Segundo os autores a classificação pela lógica fuzzy aplicada aos resultados dos ensaios de piezocone tem características particulares por ser uma classificação de comportamento real e não só um índice, por retratar probabilidade, por reduzir as incertezas devidas ao uso da ferramenta piezocone e por permitir uma diferenciação fácil entre as classes de comportamento. Como exemplo mostram uma descrição de três solos, com base em critérios probabilísticos, considerando nível de confiabilidade:

*HPC* – com grau de confiança de 0,04

*HPM* – com grau de confiança de 0,67

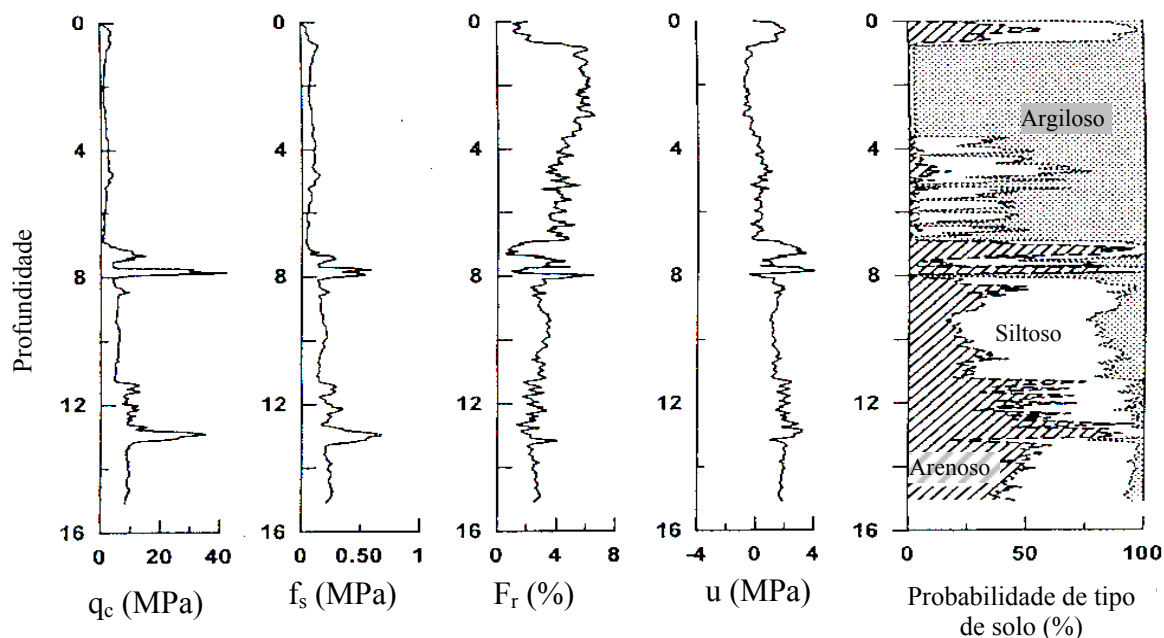
*HPS* – com grau de confiança de 0,73

Este tipo de descrição pode ser usada, por exemplo, para descrever uma pessoa, que pode parecer 70% com o pai e 30% com a mãe, e apesar de este ser um critério simples, está baseado nos conceitos da lógica fuzzy. O significado prático das informações fornecidas é um alerta ao projetista para a existência de camadas problemáticas, que podem ser zonas de transição, solos mistos, intercalações, entre outros, que poderiam não ser identificados nas avaliações convencionais. Kotzias & Stamatopoulos (1999), discutindo o artigo de Zhang & Tumay (1999), afirmam que os resultados de uma classificação não podem indicar um parâmetro de projeto para resistência, compressibilidade ou permeabilidade, mas deve efetivamente informar as tendências gerais dos parâmetros utilizados.

As classificações, desta forma, funcionam como ferramenta de diagnóstico preliminar durante as investigações geotécnicas. Um perfil com resultado de ensaio de piezocone classificado segundo a lógica fuzzy é apresentado na Figura 3.57.

Para os solos tropicais brasileiros poucos estudos têm sido feitos no sentido de procurar compreender, adaptar ou até mesmo desenvolver novos ábacos de classificação. A pouca quantidade de informações de ensaios de piezocone, com perfil controlado, pode explicar este fato. Mota (2003) estudando os solos de Brasília fez uma tentativa de propor ábaco de classificação, com base na proposta de Fellenius & Eslami (2000), caracterizando uma zona ativa de solo superficial laterítico, uma região de solo saprolítico fino e outra para as argilas porosas. Infelizmente, a pequena quantidade de dados não permite avaliações conclusivas sobre sua aplicabilidade prática.

Figura 3.57 – Exemplo de Resultado de Ensaio de Piezocone, classificado utilizando a lógica fuzzy (Kotzias & Stamatopoulos, 1999)



### 3.6 Solos tropicais

#### 3.6.1 Considerações gerais

O entendimento da gênese e estrutura dos solos tropicais é fundamental para caracterizar os diferentes tipos de comportamentos e identificar o grau de variabilidade das unidades. Ferreira (1985), Gidigasú (1990) e Bigarella et al. (1994) mostram que as características de comportamento dos materiais geológicos estão intimamente ligadas a história de formação, que controla o comportamento de muitas de suas propriedades. Quando o objeto são os solos tropicais residuais devem ser considerados os fatores pedogenéticos que agem de forma intensa sobre o perfil, sendo que nas porções mais superficiais o comportamento é controlado pelas características resultantes dos processos pedogenéticos (solos lateríticos), enquanto as porções mais inferiores são controladas por características herdadas do maciço rochoso (solos saprolíticos). Neste sentido, a morfologia dos terrenos é um elemento que resulta da atuação combinada de diversos processos de intemperismo tropical sobre os materiais geológicos e pode fornecer informações consistentes da distribuição horizontal das unidades (Gidigasú, 1990). Muitos dos solos tropicais residuais enquadram-se na classificação de solos “não-convencionais”



mostrados por Lunne et al. (1997) e que são difíceis de serem interpretadas pela falta de modelos teóricos que expliquem o comportamento adequadamente.

O solo tropical, segundo Vargas (1985), é aquele que apresenta peculiaridades de comportamento e propriedades, quando comparados aos solos não tropicais, em decorrência da atuação de processos geológicos ou pedológicos, típicos das regiões tropicais úmidas. As duas grandes classes dos solos tropicais são os lateríticos e os saprolíticos, conforme descritos e caracterizados por Nogami & Villibor (1983), Vargas (1985), Ferreira (1985) e Giacheti et al. (1999). Os solos lateríticos são uma variação de um solo, com intenso desenvolvimento pedogenético, típico de locais bem drenados em regiões tropicais úmidas. Os solos saprolíticos são aqueles que resultam da decomposição “in situ” da rocha, mantendo de maneira nítida a estrutura da rocha de origem. Contrastando com a estrutura dos solos de climas frios e temperados, os solos tropicais apresentam grande espessura tanto do horizonte superficial laterítico quanto grande espessura do horizonte saprolítico, podendo alcançar dezenas de metros. São comuns recobrimentos de solos coluviais, fruto dos processos de morfogênese. Os solos tropicais lateríticos bem desenvolvidos, mostram pequena diferenciação de horizontes, elevada porosidade e permeabilidade, com variedades granulométricas de areia até areia argilosa. Os fenômenos de colapsividade são peculiares a certos solos porosos que ocorrem em horizontes lateríticos dos solos tropicais (Vargas, 1985). Nos solos tropicais saprolíticos as peculiaridades mais notáveis são a preservação da estrutura herdada do maciço rochoso. O processo de intemperismo, condicionado por estas estruturas, resulta em uma maior complexidade e variabilidade muitas vezes errática. Desta forma, uma rocha aparentemente homogênea e uniforme poderá originar diversas camadas irregulares, em função do grau de intemperismo variável. As variações mineralógicas dos solos tropicais são provavelmente muito maiores que nos solos de outras regiões (Nogami & Villibor, 1995).

A classificação dos solos, é feita normalmente a partir de propriedades índices, como a granulometria e limites de Atterberg (Vargas, 1985; Gidigas, 1990). Desta forma, nos solos tropicais, identificam-se alguns com mesmos LL e mesmos IP, porém com expansibilidades completamente diferentes. Assim, estes índices podem falsear indicações de comportamento, comprometendo a validade das classificações geotécnicas baseadas neles, como a AASHO e a USCS. As limitações estão ligadas em grande parte ao uso do Gráfico de Casagrande e a percentagem que passa pela peneira 0,075 mm. Os solos residuais tropicais apresentam características particulares em função de mineralogia e estrutura variadas, cimentação entre partículas, índice de vazios variável, não

correlacionável com a história de tensões, permeabilidade normalmente não-relacionada a granulometria, presença de descontinuidades de baixa resistência, condição não-saturada, freqüentemente com grandes espessuras.

Os comportamentos particulares dos solos tropicais estão ligadas às condições climáticas vigentes durante o processo de sua formação. As principais distinções se dão com relação a forma de agregação das partículas, a constituição mineralógica e a presença de estruturas reliquiares no solo. Estas características, em grande parte, só podem ser identificadas com avaliações abrangentes, que incluem mapeamentos, identificação dos perfis de alteração e análises químicas que, em muitas situações, podem ser integradas às informações produzidas pelo ensaio de piezocone.

Com base em todas estas limitações, Nogami & Villibor (1981) propuseram uma nova classificação para solos tropicais, que integra a metodologia MCT (miniatura compactado tropical), que para uso e aplicação necessita da coleta de amostras e ensaios físicos específicos em laboratório. Segundo Brand (1985), os solos tropicais apresentam três características dominantes, que condicionam o comportamento:

- *Para o objetivo de projeto e análise, é necessário considerar o perfil completo de alteração, desde o material completamente alterado até a rocha sã,*
- *Em qualquer profundidade, os solos residuais são extremamente heterogêneos, o que traz sérias dificuldades para amostragens e ensaios,*
- *Os solos residuais são, em geral não-saturados e com alta permeabilidade, de forma que seu comportamento pode ser influenciado pela água da chuva e mudanças cíclicas no nível d'água, de difícil previsão.*

O método observacional (Peck, 1969) é especialmente aplicado aos solos tropicais residuais, já que investigações adicionais e mudanças de projeto são freqüentes em função das características identificadas durante a obra. As abordagens para projeto podem ser efetuadas segundo três procedimentos distintos, segundo Brand (1985):

- **Abordagem Clássica** – geralmente a partir de análises de equilíbrio limite, onde são obtidos os fatores de segurança para cada condição de solo e tipo de obra;
- **Abordagem Semi-empírica** – baseia-se em conhecimento abrangente do comportamento de obras pré-existentes em condições semelhantes; e

- *Abordagem de Avaliação de Terrenos* – fortemente embasada em mapeamento geomorfológico e uso de fotografias aéreas, para classificação do relevo, o que permite zoneamentos de risco e informações de orientação ao planejamento.

Brand (1985) considera que a aplicação combinada de técnicas de geologia, geomorfologia e engenharia geotécnica é indispensável para o sucesso de projetos situados em regiões com solos residuais ou coluviais. Na concepção de Ferreira (1985), os solos lateríticos são produto de uma intensa alteração intempérica da rocha, cujos conteúdos de ferro e/ou alumínio são altos e o conteúdo de sílica é mais baixo que o de rochas caulinizadas. Consistem predominantemente de assembléias minerais com goethita, hematita, hidróxidos de alumínio, caulinita e quartzo. Este mesmo autor fez um abrangente levantamento dos solos tropicais lateríticos e saprolíticos, onde se observa que as diferenças de comportamento e classificação são ligadas ao grau de alteração e composição química da rocha mãe e do perfil atual do solo.

Mais recentemente trabalhos em solos tropicais brasileiros (Ortigão et al., 1996; Machado, 1998; Giacheti et al., 1999; Cunha et al., 2001 e Mota, 2003) têm mostrado que a condição não-saturada dos solos tropicais, associadas às variações sazonais na umidade, impõem forte controle nas propriedades do solo, através do fenômeno da sucção, conforme definidos por Marinho (2001) e Rojas (2001).

### 3.6.2 Investigação em solos tropicais

As técnicas de investigação disponíveis para solos tropicais abrangem uma grande diversidade de métodos de campo e laboratório. Nenhum ensaio individualmente tem a capacidade de identificar todas as propriedades do solo (Lunne et al., 1997). Os solos tropicais exigem abordagens amplas, conforme exposto anteriormente. A maior adequabilidade dos ensaios em campo para caracterizar propriedades do maciço, é preferida em função das limitações dos processos de amostragem, principalmente devido à cimentação nos solos lateríticos e a presença de estruturas reliquias nos solos saprolíticos (Gidigas, 1990; Chang, 1990).

Chang (1990) avaliou o uso de diversos ensaios de campo na caracterização de solos tropicais de Singapura. A Tabela 3.7 compara os diversos ensaios de campo com relação à natureza, custo, vantagens e limitações práticas, avaliação de variabilidade e avaliação de parâmetros. Concluiu que, em projetos de porte envolvendo solos residuais

tropicais, a combinação de sondagem de simples reconhecimento (SPT), complementado por ensaio de penetração dinâmica (RST), ensaios pressiométricos (PMT) e ensaios de laboratório avaliando as curvas de tensão-deformação em ensaios realizados em amostras indeformadas. Considera que existem pelo menos três requisitos importantes básicos a serem considerados na seleção dos métodos de investigação nos solos residuais:

- *variabilidade do material, que pode afetar o andamento do projeto,*
- *ampla faixa de variação da resistência e consistência dos materiais a serem investigados exigem ferramentas e métodos de ensaios que tenham grande adaptabilidade,*
- *interpretação dos resultados dos ensaios torna-se difícil, mesmo com o uso de métodos sofisticados diretos, devido a saturação parcial, textura e anisotropia.*

Tabela 3.7 - Comparação entre variações, custos, limitações, vantagens e aplicabilidade de 7 ensaios de campo freqüentemente utilizados (Chang, 1990).

Ensaio	Natureza	Custo*	Limitações /Vantagens práticas	Aplicabilidade no solo residual +	
				Avaliação da Variabilidade	Avaliação do Parâmetro
SPT	Indireta Resistência dinâmica	M	Proporcionar amostra	A	B
CPT	Indireta Resistência estática	M	Penetração moderada	B	B
WST	Indireta Resistência dinâmica	L	Penetração limitada, alta mobilidade e velocidade	C	B
DMT	Indireta Tensão-deformação	M	Penetração moderada	B	B
PMT	Direta Tensão-deformação	H	Alta suscetibilidade para condições variáveis do solo	C	A
PLT	Direta Tensão-deformação	VH	Aplicação em solos homogêneos	-	A

\* L = baixo, M = médio, H = alto, VH = muito alto

+ A = alto, B = moderado, C = limitado, - = não aplicado

SPT – sondagem de simples reconhecimento, CPT – ensaio de penetração do cone, WST – ensaio de penetração dinâmica contínua, DMT – ensaio dilatométrico, PMT – ensaio pressiométrico, PLT – ensaio de placa

O processo de intemperismo desenvolve materiais de comportamentos distintos a partir de uma rocha homogênea. Nas condições tropicais, estes processos são mais intensos

e são controlados por diversos fatores, como temperatura, umidade, vegetação, tipo de rocha, entre outros. A ampla variedade de geometrias de distribuição dos materiais rochosos na superfície da Terra associada a diversidade de processos intempéricos provoca um nível de incerteza grande, que associado ao comportamento tensão-deformação distinto dificulta a aplicação de modelos teóricos (Rocha Filho & Carvalho, 1990). O conhecimento geológico, através da elaboração de modelos geológico-geotécnicos, pode contribuir para avaliar a probabilidade de ocorrência de estruturas desfavoráveis, e confrontá-las com as solicitações impostas pela obra em análise e os impactos possíveis (técnico, financeiro, de cronograma etc.), e decidir o nível de investigação ótima para cada empreendimento.

A interpretação dos ensaios de campo, em especial o piezocone, baseia-se na experiência adquirida nos solos sedimentares, que ocorrem em climas frios e temperados. Alguns princípios básicos podem comprometer o uso e interpretação dos resultados dos ensaios de campo, principalmente quando da utilização de correlações entre ensaios e parâmetros. Vaughan (1985) propõe uma abordagem sugerindo que os solos residuais tem as propriedades controladas pela resistência das cimentações e a densidade desenvolvida durante o processo de alteração. O conceito de pré-adensamento dos solos sedimentares assume que o solo foi previamente submetido a um nível de tensão vertical maior, durante fases de sedimentação e erosão dos terrenos, impondo às propriedades do solo uma forte dependência da história deposicional e do índice de vazios. Este conceito não pode ser aplicado diretamente aos solos tropicais, devido a gênese distinta (Rocha Filho & Carvalho, 1990). Neste sentido, Vaughan (1985) indicam que o processo de alteração provoca reduções na tensão horizontal e vertical e é improvável que ele mantenha a memória das tensões passadas. Isto tem aplicações diretas no uso de correlações, pois as propriedades do solo serão fortemente dependentes do grau de alteração e intensidade de cimentação e porosidade, sem nenhum ou pouco efeito da história de tensões. Resultados semelhantes foram obtidos por Ajayi & Balogun (1988) em estudo abordando ensaios de campo em solos tropicais da Nigéria. Os autores concluíram que a história de tensões não interfere na interpretação dos ensaios e que os resultados da resistência de ponta ( $q_c$ ) não são influenciados pela pressão de recobrimento (ou tensão vertical efetiva). Indicam ainda que as correlações tradicionais desenvolvidas para ensaios SPT e CPT, não apresentam resultados coerentes quando aplicadas aos solos lateríticos e saprolíticos, e que os valores de atrito lateral, no ensaio de CPT são elevados, devido a adesividade, o que pode resultar

em valores de razão de atrito ( $F_r$ ) superiores a 10, que não são comuns para os solos sedimentares.

Ortigão et al. (1996), estudando as argilas porosas de Brasília, indicaram comportamentos particulares destes solos em função do elevado índice de vazios e permeabilidade, densidade natural baixa e grande variação do nível d'água em função da sazonalidade climática. Pela inspeção visual dos solos residuais, durante as escavações para implantação do metrô, verificaram que a anisotropia é marcante e que as características do material rochoso, como acamamento e fraturamento, controlam o comportamento geotécnico. Através de resultados de ensaios DMT concluíram que não existe variação marcante da tensão horizontal, o que sugere que os processos geológicos envolvidos na formação destas argilas não afetaram consideravelmente o regime de tensão ao longo da profundidade.

Peuchen et al. (1995) analisaram resultados de algumas centenas de ensaios de piezocone realizados em solos tropicais da Tailândia, Malásia e Singapura, considerando-os representativos de uma grande variabilidade e resistência errática, o que torna este tipo de solo muito agressivo ao piezocone. Na interpretação dos resultados de ensaios CPT os autores concluíram que este deve ser avaliado sob a ótica de modelos geotécnicos, que resultam da integração entre ensaios e técnicas de interpretação geológica. Consideram que o potencial de análise estratigráfica do resultado do ensaio de CPT é mantido para os solos tropicais, sendo possível destacar alguns aspectos positivos:

- diferenciação entre solos residuais e solos colúviais de recobrimento
- identificação de rochas matrizes acamadadas
- características de seqüências de alteração não homogêneas e tipo de solo

Estes autores concluíram que a interpretação dos resultados de ensaios CPT em solos tropicais residuais segue a interpretação convencional dos solos sedimentares. Consideram que as dificuldades de estabelecer correlações ocorrem devido a perturbações causadas nas amostras empregadas em ensaios laboratoriais. A penetração do piezocone nos solos tropicais normalmente é drenada e na classificação de Robertson (1990) correspondem a argilas e argilas arenosas cimentadas ou pré-adensadas.

Diversas pesquisas têm procurado avaliar a aplicabilidade de ensaios de piezocone em diferentes tipos de solos (Takesue et al., 1996; Lunne et al., 1997; Rinaldi et al., 1998 e Finke et al., 2001). Nesse ensaio, o parâmetro poro-pressão é empregado para distinguir a

penetração drenada da não-drenada. A maioria dos solos residuais tropicais enquadra-se na classe dos solos intermediários, entre os extremos argila e areia. Bugno and McNeilan (1984; apud Lunne et al., 1997) sugerem que a penetração não-drenada, para um cone padrão de  $10 \text{ cm}^2$  de área e velocidade de cravação de  $2 \text{ cm/s}$ , ocorre em solos com permeabilidade menores que  $10^{-7}$  a  $10^{-6} \text{ cm/s}$ . A penetração do piezocone em solos com permeabilidade entre  $10^{-6}$  e  $10^{-3} \text{ cm/s}$  é considerada parcialmente drenada, o que ocorre na maioria dos solos siltsos. Na interpretação do ensaio de piezocone em solos intermediários é importante identificar as condições de drenagem esperadas no projeto e aquelas geradas durante o ensaio de piezocone. Se o problema envolver cisalhamento não-drenado e a penetração do piezocone for também não-drenada, o resultado do ensaio é interpretado similarmente à argila. De forma oposta, se as condições da obra forem drenadas e o resultado dos ensaios também drenado, o solo é interpretado como areia. A interpretação torna-se mais complexa quando a condição de drenagem do ensaio é distinta daquela prevista para a obra (Lunne et al., 1997). O nível de detalhe para o qual se investiga o maciço de solo, depende do tipo de projeto e tipo de obra, e das características do próprio maciço de solo. O nível de investigação ótimo está intimamente ligado a variabilidade do maciço nas diferentes escalas e frente as necessidades de cada projeto.

### **3.7 Variabilidade e fontes de incertezas nos resultados dos ensaios**

A caracterização estratigráfica dos solos consiste na compartimentação do maciço em unidades razoavelmente homogêneas. É necessária a identificação das transições entre unidades, a classificação dos vários tipos de solo e a identificação da variabilidade interna na escala e detalhe exigidos pelo projeto, em função das condições geológicas de cada local. As incertezas quanto as condições geológicas, e conseqüentemente quanto aos parâmetros geotécnicos, é característica que diferencia as engenharias geotécnica e geológica, quando comparadas às outras áreas da engenharia (Einsten & Baecher, 1982). As análises geotécnicas evoluíram através de técnicas de julgamento (engineering judgement) e abordagens de projeto adaptáveis, como forma de lidar ou enfrentar as incertezas resultantes da variabilidade natural dos solos.

A variabilidade dos solos é um dos componentes que afeta o grau de incerteza na avaliação de propriedades geotécnicas. Para Lacasse & Nadin (1996) as incertezas nas

informações podem ser subdivididas em três tipos principais: erros introduzidos nas medições e estimativas das propriedades geotécnicas, imprecisões causadas pela modelagem física do comportamento e variabilidade espacial natural das formações geológicas.

Ladd & Da Re (1999) sugerem que as incertezas a serem consideradas na avaliação de parâmetros geotécnicos devem enquadrar-se nos seguintes grupos: variações sistemáticas da propriedade de um ponto a outro, dispersões devido a variação espacial na média da tendência e na escala na qual estas flutuações ocorrem, dispersão devido a erros aleatórios de ensaios, incerteza estatística devido ao número limitado de ensaios, erros na média devido a medidas tendenciosas (biases). A Tabela 3.9 mostra os fatores que afetam as incertezas de modelos, segundo Lacasse & Nadim (1996).

Tabela 3.9 – Exemplo de fatores que interferem nas incertezas de modelo (Lacasse & Nadim, 1991)

<b>Propriedade</b>	<b>Fator de Influencia</b>
Resistência ao cisalhamento não-drenada	Perturbação de amostragem Método e escala de ensaio Variabilidade espacial – anisotropia Taxa de carregamento
Ângulo de atrito	Reconstituição da amostra Densidade, método e escala de ensaio
Capacidade de carga de estacas	Atrito lateral considerado Valores limite Subdivisão de camadas Instalação da estaca, tensão residual Reconsolidação, taxa de carregamento, recarga Rigidez da estaca, comprimento, grupos de estacas Extrapolação de base de dados
Fundações superficiais	Posição da superfície crítica História de tensões Procedimento de ensaio Efeito escala Redistribuição de tensões Modelo de perfil e condições de drenagem

Muitas das abordagens geotécnicas são qualitativas, e as análises racionais das incertezas envolvem a teoria da probabilidade e estatística, que podem contribuir com análises sistemáticas, essenciais para as decisões de engenharia. Ronold & Bjerager (1992), a partir de resultados de análise de confiabilidade, mostram que os erros de modelo são a principal fonte da incerteza nas informações, devido a variabilidade do meio geológico. As heterogeneidades do meio geológico são provocadas por processos como sedimentação, diagênese, fraturamento, entre muitos outros, de forma que os dados e modelos geológicos



podem ser muito úteis na caracterização da variabilidade espacial (Nobre & Sykes, 1992). O uso da krigagem na interpolação de propriedades tem a vantagem de permitir a avaliação da precisão da estimativa através da análise da variância. A fidelidade dos diversos modelos geotécnicos depende da compreensão das características das formações e estruturas espaciais. No entanto, para a maioria dos casos práticos, a quantidade de informação disponível não é suficiente para definir a variabilidade espacial do solo.

Morgenstern (1974) considera a natureza variada das incertezas como principal fator que dificulta a análise de riscos em geotecnia. Distingue três fontes de incertezas: a incerteza de parâmetro, a incerteza de modelo e a incerteza humana. Considera que o método observacional (Terzaghi, 1943) é uma forma de análise de risco consequente, que mostra clara capacidade de intervenção e adaptação em meio ao processo.

Whitman (1986) avalia as incertezas na engenharia geotécnica, indicando que existem diferentes tipos de análises adequadas a diferentes estágios de cada projeto. Nas fases iniciais de viabilidade, é importante identificar se o programa de investigação é adequado para detectar e revelar feições que possam provocar problemas no projeto ou tornar inadequado o local para determinado fim. O sucesso desta etapa depende da combinação do conhecimento do modelo geológico associado ao programa de investigação consistente. Bases de dados, através de arquivos regionais, podem auxiliar neste sentido, porém tem disponibilidade atual muito restrita. Dentre estas “surpresas geológicas” o autor cita cavernas, inclinações desfavoráveis de juntas, entre outras.

Wu et al. (1996) concluem que um projeto de investigação deve começar com a escolha de um modelo geológico apropriado, baseado em observações e informações geológicas. Com base neste modelo, métodos de probabilidade e estatística podem ser usados para avaliar a informação existente e estimar as incertezas associadas aos vários elementos utilizados na investigação. No entanto, as informações geológicas são difíceis de quantificar, pois são observacionais e freqüentemente imprecisas e incompletas. Estes autores procuraram identificar as incertezas na interpretação de informações geológicas através de um experimento. Solicitaram a 9 especialistas que estimassem a continuidade e dimensões de camadas de areia, com base em duas seções constituídas por 20 sondagens. A variação das estimativas foi muito grande, chegando a 1.000%. Esta variação foi atribuída pelos autores à interpretação que cada especialista forneceu para o modelo e ambiente geológico de formação das unidades que continham as camadas de areia. Com isto, concluíram que a informação geológica, quando proveniente de métodos observacionais, é uma fonte de incerteza significativa na investigação dos terrenos. A

forma prática de reduzir as incertezas dos modelos geológicos é organizar um processo em que toda informação gerada, seja arquivada, adequadamente interpretada e integrada às informações prévias. Com isto, gera-se um modelo de banco de dados dinâmico vinculados a mapas de zoneamento e cartas geotécnica, muito adequadas e úteis para diversos fins em regiões urbanas e escalas entre 1:1.000 e 1:10.000.

O processo de determinação das propriedades do solo é outra fonte de incerteza, resultante do modelo de interpretação de cada ensaio e das deformações provocadas pelos ensaios ou coletas de amostras. Para Kulhawy & Phoon (1996) os ensaios de campo têm muitas fontes primárias de incerteza, incluindo erros de calibração, influência do operador, erros de amostragem e variação no procedimento do ensaio. Fazendo uma avaliação comparativa dos erros entre os resultados da sondagem de simples reconhecimento, do ensaio de penetração do cone, do ensaio dilatométrico, do ensaio de palheta e do ensaio pressiométrico, os autores concluem que os ensaios com maior potencial de variação dos equipamentos e procedimentos de operação, resultam em maior incerteza nos seus resultados. A Tabela 3.10 resume as estimativas de erros para cada ensaio.

As primeiras três colunas fornecem as incertezas, na forma de coeficiente de variação (COV), de equipamento, procedimento e erros aleatórios. A coluna seguinte combina estes três erros, na forma da raiz quadrada da soma dos quadrados. Por último, devido a pequena disponibilidade de dados e necessidade de julgamento para estimar estes erros, a última coluna indica a provável faixa de variação esperada para o parâmetro.

As medições realizadas nos ensaios de campo, apresentam duas fontes primárias de incertezas que contribuem de forma marcante: a variabilidade espacial do maço e os erros de medida (Jaksa et al., 1997). As análises dos erros aleatórios de medida e a variabilidade espacial das propriedades geotécnicas, podem ser analisadas segundo duas técnicas matemáticas distintas: a teoria dos campos aleatórios e a geoestatística. A teoria dos campos aleatórios, conforme aplicada por Vanmarcke (1983, apud Wickremesinghe, 1989), é uma extensão bi ou tri-dimensional da análise das séries de tempo, que incorpora o comportamento observado, no qual os valores de pontos adjacentes estão mais relacionados que aqueles a maiores distâncias. Os tratamentos geoestatísticos são baseados em variáveis regionalizadas, com propriedades aleatórias e espaciais, e que apresentam continuidade entre os pontos. O semivariograma é uma medida estatística básica, que quantifica a intensidade da dependência espacial entre amostras ao longo de uma determinada orientação, representando o grau de continuidade da propriedade em questão (Isaaks & Srivastava, 1989).

Tabela 3.10 - Estimativa das incertezas para cinco ensaios de campo comuns na prática da engenharia (Kulhawey &amp; Phoon, 1996)

Ensaio	Coeficiente de Variação, COV(%)				
	Equipamento	Procedimento	Props. Aleatórias	Total <sup>a</sup>	Intervalo <sup>b</sup>
Sondagem de simples reconhecimento	5 <sup>c</sup> -75 <sup>d</sup>	5 <sup>c</sup> -75 <sup>d</sup>	12-15	14 <sup>c</sup> -100 <sup>d</sup>	15-45
Cone de penetração mecânico (MCPT)	5	10 <sup>e</sup> -15 <sup>f</sup>	10 <sup>e</sup> -15 <sup>f</sup>	15 <sup>e</sup> -22 <sup>f</sup>	15-25
Cone de penetração elétrico (ECPT)	3	5	5 <sup>e</sup> -10 <sup>f</sup>	8 <sup>e</sup> -12 <sup>f</sup>	5-15
Ensaio de palheta (vane test)	5	8	10	14	10-20
Ensaio dilatométrico (DMT)	5	5	8	11	5-15
Ensaio pressiométrico (PMT) c/ pré-furo	5	12	10	16	10-20 <sup>g</sup>
Ensaio pressiométrico (SBPMT) autoperfurante	8	15	8	19	15-25 <sup>g</sup>

a –  $COV(\text{total}) = [COV(\text{equipamento})^2 + COV(\text{procedimento})^2 + COV(\text{propriedades aleatórias})^2]^{1/2}$

b – Devido a dados limitados e decisões envolvidas na estimativa de  $COV_s$ , o intervalo de magnitude representa a probabilidade dos erros dos ensaios medidos em campo.

c,d – No pior e no melhor cenários, respectivamente, para o SPT

e,f – Resistência de ponta e atrito lateral, respectivamente, para CPT

g – Resultados podem ter diferenças para  $\rho_0$ ,  $\rho_f$  e  $\rho_1$ , mas os dados são insuficientes para elucidar este resultado.

O entendimento das variações espaciais das propriedades, seja através da geoestatística ou da teoria dos campos aleatórios, pode orientar substancialmente o processo de amostragem. Com a coleta de mais amostras é possível fazer melhores estimativas sobre as microvariações, indicada nos variogramas pelo “nugget” ( $C_0$ ). No entanto, isto aumenta sensivelmente o custo da investigação, tornando-se desnecessário reduzir o espaçamento de amostragem abaixo de um certo valor nominal. Infelizmente esta distância mínima de amostragem depende das condições geológicas em questão, e não podem ser conhecidas antes da investigação (Jaksa et al, 1997). Estes mesmos autores, em estudo estatístico dos resultados de diversos ensaios CPT elétrico, avaliaram o intervalo de registro de dados do ensaio de cone para espaçamentos de 10, 20, 50, 100 e 200 mm, concluindo que espaçamentos de registros menores que 50 mm fornecem indicações precisas sobre as microvariações ao longo do perfil.

Os problemas ligados a obtenção da distribuição e variação das propriedades do solo, freqüentemente resumem-se na avaliação de alguns registros da propriedade medida por um profissional experiente e uma escolha empírica de um valor representativo, com

base na experiência. Este método funciona, porém é empírico, não repetitivo e principalmente não permite analisar o nível de incerteza e confiança associado ao valor escolhido (Tabba & Yong, 1981). Para estes autores é importante distinguir entre as fontes de incerteza para poder selecionar o modelo analítico apropriado e permitir a análise e combinação de diferentes conjuntos de dados provenientes de diferentes ensaios. Além disto, como praticamente todo ensaio é destrutivo, cada um fornece resultado em um único ponto. Para estes autores, as três principais fontes de erros na avaliação de dados aleatórios são: heterogeneidade inerente do solo, resultante da natureza aleatória do material de origem, agentes formadores e transformadores atuantes e ambiente de formação; amostragens e técnicas de ensaio utilizadas, dependendo do operador, do instrumento e do próprio solo; e medições indiretas da propriedade desejada, através de correlações com outras propriedades.

Para Wickremesinghe (1989), do ponto de vista estatístico, os métodos de análise de tendências usando técnicas de regressão são convenientes para expressar a dependência das propriedades do solo em função da profundidade. Uma tendência linear ou polinomial de dois graus é suficiente para esta modelagem. Este procedimento permite que o engenheiro determine o nível de confiança exigido pelos critérios de cada projeto, para o nível de significância desejado. Na seleção dos ensaios é importante distinguir entre os ensaios tendenciosos (*biased*) e ensaios não-tendenciosos (*unbiased*), considerando a precisão e melhor representação da propriedade desejada. Ensaios não-tendenciosos são definidos como aqueles que melhor representam a propriedade do solo e são tecnicamente mais precisos. Tabba & Yong (1981) desenvolveram um modelo de probabilidade para aproximações de primeira ordem da propriedade aleatória, avaliando a média, variância e covariância. Concluíram que existem diferenças marcantes entre amostragens em bloco e amostragens em tubos de parede fina. As amostras em bloco normalmente representam concentrações de informações em um único ponto no espaço; enquanto que as amostras em sondagens representam um dado a cada ponto ou nível investigado. Normalmente, mais de um tipo de amostra e técnica de ensaio é utilizada para determinar uma mesma propriedade, obtendo-se diferentes resultados. No início de uma campanha, normalmente são feitas muitas medidas utilizando ensaios de baixo custo e pouco precisos (tendenciosos) com objetivo de obter uma visão geral da distribuição da propriedade no sítio. Pela imprecisão, normalmente são necessários ensaios adicionais, mais precisos e caros, para determinar a propriedade em locais específicos. Ensaios menos tendenciosos podem ser concentrados em um local específico, com coleta de amostras de bloco, ou em

furos de sondagem distribuídos na área. Tabbá & Yong (1981) testaram o modelo proposto comparando quatro situações distintas para obtenção da resistência ao cisalhamento não-drenada ( $S_u$ ), utilizando resultados de ensaios de: 1 – Compressão Simples (CS) em amostras obtidas a partir de sondagens com tubos amostradores, 2 - Compressão Simples (CS) em amostras coletadas em bloco, 3 - Palheta em laboratório e 4 - Palheta em campo. Avaliaram a tendenciosidade de cada ensaio (*biase*) considerando como não-tendencioso (*unbiased*) os resultados dos Ensaio de Compressão Simples realizados em amostras de bloco, que passaram a ser a referência de comparação para os outros ensaios. Concluem que a avaliação dos erros de ensaio (*biase*) só pode ser obtida de forma comparativa com algum ensaio de referência e que os modelos de previsão de propriedades, apesar de falhos, podem auxiliar substancialmente na determinação do número de ensaios requeridos para alcançar determinado nível de confiança e permitir melhor entendimento para planejamento das campanhas de investigação..

Jaksa et al. (1997), em estudo estatístico de ensaios de CPT, concluem que os erros de medidas aleatórias associadas a um determinado teste dependem fortemente do grau de tendência removido dos dados e do espaçamento das amostras. As determinações do “nugget” ( $C_0$ ) são uma combinação de erros de medidas aleatórias, variabilidade de pequena escala do solo, erros de amostragem e erros devido a não-estacionaridade dos dados. Os dados e análises apresentados indicam que os erros de medida aleatória associados ao ensaio de piezocone são menores ou iguais a 3%.

Um bom programa de investigações deve produzir uma adequada caracterização da estratigrafia dos terrenos, abrangendo a delimitação das unidades, a identificação da constituição e da variabilidade interna, de forma a se determinar parâmetros mais precisos, com informações do nível de incerteza vinculado à escolha de determinado parâmetro. Desta forma, a redução das incertezas passa por três etapas:

- seleção de ensaios onde há pequena variação do equipamento e do procedimento de operação,
- controle de qualidade nas amostragens e ensaios de campo e laboratório específicos,
- seleção de base teórica apropriada, que forneça consistência às correlações para determinação do parâmetro de projeto desejado.

Considerando as fontes de incerteza presentes em geotecnia, é consenso que elas são inevitáveis. Deve-se reduzi-las ao máximo, e a questão principal é saber como tratá-las. Neste sentido, a avaliação da variabilidade do solo pode ser feita de forma consistente utilizando os resultados dos ensaios de piezocone. A alta repetibilidade, baixa interferência do operador, reduzido erro aleatório e grande quantidade de dados, colocam o piezocone como a melhor ferramenta para estas avaliações (Wickremesinghe, 1989).

As incertezas na determinação dos parâmetros geotécnicos são consideradas por Duncan (1999) como a principal razão para se utilizar abordagens probabilísticas em substituição ao processo convencional, que é determinístico. A Tabela 3.11 mostra os coeficientes de variação (COV) para alguns parâmetros geotécnicos e resultados de ensaios de campo, compilados por Duncan (1999). Os fatores de segurança usados na prática convencional de engenharia são baseados na experiência, o que é lógico. No entanto, a tradição e as normas indicam a aplicação de um mesmo fator de segurança para situações que envolvem ampla faixa de variabilidade, o que não é lógico. Na prática, os coeficientes de segurança devem considerar a variabilidade interna do solo, segundo uma abordagem probabilística. Os autores sugerem uma abordagem mais lógica na seleção de fatores de segurança, considerando as incertezas nos valores que compõem o cálculo e as conseqüências da ruptura ou do comportamento não satisfatório. As incertezas podem ser agrupadas em duas categorias:

- Incertezas epistêmicas, que são aquelas que podem ser reduzidas através de uma quantidade maior de ensaios melhor conduzidos. No entanto, não podem ser completamente eliminadas, devendo ser utilizada a teoria de probabilidade e julgamento de engenharia para a decisão,
- Incertezas aleatórias, que são aquelas que não podem ser avaliadas através de uma melhor investigação, por mais abrangente que esta possa ser.

Tabela 3.11 – Valores do coeficiente de variação (Cov) para parâmetros geotécnicos e resultados de ensaios de campo (Duncan, 1999).

<b>Parâmetros ou resultados de ensaios de campo</b>	<b>Cov (%)</b>	<b>Autor</b>
▪ Massa específica ( $\gamma$ )	3-7	Harr(1984), Kulhawy(1992)
▪ Massa específica submersa ( $\gamma_b$ )	0-10	Lacasse and Nadim(1997), Duncan(2000)
▪ Ângulo de atrito efetivo ( $\phi'$ )	2-13	Harr(1984), Kulhawy (1992)
▪ Resistência ao cisalhamento do solo não-drenado ( $S_u$ )	13-40	Harr(1984), Kulhawy(1992), Lacasse and Nadim (1997), Duncan (2000)
▪ Razão da resistência não-drenada ( $S_u/\sigma_u'$ )	5-15	Lacasse and Nadim(1997), Duncam(2000)
▪ Índice de compressão ( $C_c$ )	10-37	Harr(1984), Kulhawy(1992), Duncam(2000)
▪ Pressão de pré-adensamento( $\sigma'$ )	10-35	Harr(1984), Lacasse and Nadim(1997), Duncan(2000)
▪ Coef. de permeabilidade em argilas saturadas ( $k$ )	68-90	Harr(1984), Duncam(2000)
▪ Coef. de permeabilidade em argilas parcialmente saturadas ( $k$ )	130-240	Harr(1984), Benson et al.(1999)
▪ Coeficiente de adensamento( $c_v$ )	33-68	Duncan(2000)
▪ SPT (N)	15-45	Harr(1984), Kulhawy(1992)
▪ CPT elétrico ( $q_c$ )	5-15	Kulhawy(1992)
▪ CPT mecânico ( $q_c$ )	15-37	Harr(1984), Kulhawy(1992)
▪ Dilatômetro ( $q_{DMT}$ )	5-15	Kulhawy(1992)
▪ Ensaio de Palheta - resistência não-drenada ( $S_u$ )	10-20	Kulhawy(1992)

Serão abordados a seguir os procedimentos estatísticos que permitem uma adequada compartimentação dos perfis obtidos a partir dos resultados dos ensaios de piezocone, bem como os parâmetros que permitem estimar a variabilidade vertical e a distância ótima de correlação, fornecendo elementos que possam definir melhor um programa de amostragens. A análise do processo de determinação de parâmetros geotécnicos a partir dos ensaios de piezocone, mostra que os melhores resultados são obtidos a partir das correlações com ensaios paramétricos em campo e laboratório. Como não é possível coletar amostras ou executar 2 ensaios na mesma posição, na prática, as diferentes correlações ocorrem com resultados obtidos em porções distintas do terreno. Estas distâncias normalmente variam entre 1 e 2 m. Desta forma, a análise da variabilidade do solo, com relação aos parâmetros geotécnicos, é indispensável para que se possa conhecer o nível de significância das correlações e resultados de ensaios. O nível de variabilidade deve permitir uma quantificação apropriada do número de amostras necessário para caracterizar determinada unidade, dentro do nível de significância exigido por cada projeto.

Lumb (1974) analisa a variação espacial dos parâmetros do solo, e considera que normalmente não há dados confiáveis para avaliar a variabilidade interna do solo. A dificuldade principal em estimar a estrutura da variabilidade espacial é a grande quantidade de amostras e ensaios de elevada qualidade necessários para viabilizar análises criteriosas. Os autores consideram que a variabilidade interna pode ser plenamente descrita pela variância global junto com uma função de autocorrelação ou função de densidade espectral.

Um programa de investigação pode variar sensivelmente em função dos objetivos e das condições geológicas, sendo difícil avaliar sua qualidade objetivamente. Para Parsons & Frost (2002) a prática corrente na caracterização das condições de subsuperfície usualmente envolve a interpretação de resultados de ensaios de laboratório e campo usando métodos determinísticos. Estes métodos não representam as incertezas associadas com a estimativa dos parâmetros geotécnicos, que pode ser feita com uma abordagem coerente, utilizando análises abrangentes, com métodos probabilísticos e geoestatísticos. Utilizam processo de krigagem ordinária em blocos e krigagem indicativa na visualização dos resultados de sondagens SPT. As campanhas de investigação devem permitir a avaliação do nível de significância dos parâmetros adotados. Isto só pode ser feito considerando as análises das incertezas e variabilidade interna do solo, quantificando os riscos envolvidos no processo, através de análises probabilísticas. Quanto mais fechada a curva de probabilidade de distribuição, mais homogêneas são as condições do subsolo, e neste sentido, os grandes erros gerados nos ensaios SPT causam elevada incerteza e tornam as análises de probabilidade sem sentido

A variabilidade do solo interfere sensivelmente nos custos da investigação. Handy (1978) indica que a evolução na qualidade dos ensaios traz um aumento de custos, que podem ou não estar associados a uma maior acurácia do ensaio. Considera que a variabilidade do solo é uma das responsáveis pela manutenção de ensaios de baixo custo e menor precisão. Para avaliar características do concreto ou aço 5 ou 6 ensaios são suficientes para caracterização precisa, sendo que para o solo, este número cresce substancialmente. O número de ensaios está associado ao desvio padrão e ao erro máximo aceitável, dado pela eq. (30).

$$n = 4\sigma^2/\text{erro}, \quad (30)$$

sendo  $n$  = número de ensaios,  $\sigma^2$  = desvio padrão e erro = erro máximo aceitável



Por exemplo, se quatro ensaios fornecem uma variação máxima de  $12^\circ$  para estimativa do ângulo de atrito ( $\phi$ ), para obter uma média com variação máxima de  $2^\circ$  são necessários 68 ensaios. Os autores concluem que se a variabilidade do solo for grande é melhor usar ensaios mais baratos em maior quantidade. Ensaios caros, pontuais e precisos só devem ser utilizados em locais com baixa variabilidade. Para melhor se conhecer a variabilidade pode-se compartimentar o maciço em subunidades com base na exploração geológica, sondagens e ensaios geofísicos. A seleção dos ensaios está também ligada ao porte da obra, e obras pequenas praticamente ditam o emprego quase exclusivo de sondagens SPT. A esperada redução de custos, na implantação do projeto, devido a ensaios especiais, normalmente não justifica o investimento. Segundo Handy (1978) o custo dos ensaios é inversamente proporcional ao nível aceitável de erro, independente do ensaio utilizado, e o vetor de variabilidade na qual a análise está baseada pode ser estimado a partir de poucos ensaios exploratórios de qualquer método com desvio padrão conhecido.

A Tabela 3.12 mostra o custo relativo estimado e acurácia de alguns ensaios de campo e a Figura 3.58 apresenta uma relação entre erro de ensaio e custo de investigação (Handy, 1978), mostrando que a variabilidade do solo tem forte influência no desempenho da investigação.

Tabela 3.12 – Custo relativo estimado e acurácia de alguns ensaios de campo para estimativa do ângulo de atrito interno (Handy, 1978).

<b>Método de ensaio</b>	<b>Custo relativo por ensaio</b>	<b>Acurácia na estimativa de <math>\phi</math></b>	<b>Observações</b>
Cone dinâmico (DPSH)	0,2	+ - 10%	Ensaio contínuo
CPT	0,3 a 2	+ - $1,7^\circ$ a + - $5^\circ$	Atrito medido
SPT	1,0	+ - 5 %	Amostras
Cisalhamento em sondagem	3,0 a 5,0	+ - $1,5^\circ$	Também mede coesão
Pressiômetro	8,0	+ - $1,5^\circ$	Módulo horizontal
Pressiômetro (autoperfurante)	20 ?	+ - $0,5^\circ$	Em pesquisa

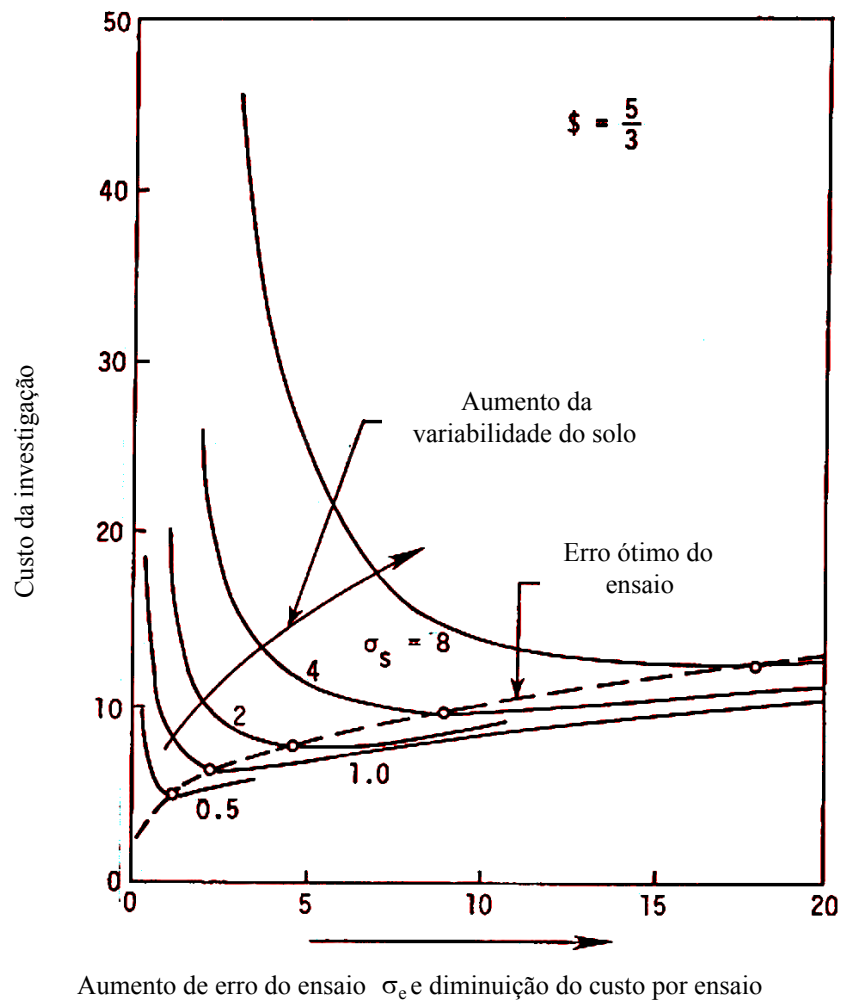


Figura 3.58 – Relação entre erro de ensaio, custo de investigação e variabilidade (Handy, 1978)

### 3.8 - Tratamento estatístico dos resultados de ensaios de piezocone

Os resultados do ensaio de piezocone permitem tratamentos estatísticos consistentes, devido a qualidade do dado e elevada frequência de registros. Os resultados refletem as diferentes escalas de variabilidade do terreno, inclusive micro-variações que permitem análises detalhadas do perfil de solo. Por ser um ensaio com múltiplos sensores, as análises estatísticas podem ser aplicadas aos registros de cada sensor individualmente ou aos resultados do conjunto de sensores. Os tratamentos estatísticos aplicados aos resultados do ensaio de piezocone podem auxiliar na identificação das transições entre diferentes camadas de solo e nas análises de variabilidade do solo.

Wickremesinghe (1989) realizou extensa análise dos procedimentos estatísticos aplicáveis aos resultados dos ensaios de piezocone, onde aplicou os testes estatísticos de coeficiente de correlação intra-classe, teste T e teste  $D^2$  para identificação das prováveis transições entre solos distintos. Após a identificação das camadas, visualmente ou pela aplicação dos testes estatísticos acima indicados, são necessários conhecimentos sobre a variabilidade interna de cada unidade. Para isto Wickremesinghe (1989) sugeriu a utilização da média ( $X$ ), do desvio padrão ( $\sigma$ ), do coeficiente de variação ( $Cov$ )= $\sigma_X/X$  e da escala de flutuação ( $\delta$ ). O coeficiente de variação ou variância, representa uma forma padronizada de um fator de variabilidade. A escala de flutuação representa a distância dentro da qual as propriedades do solo mostram forte correlação na vertical e na horizontal, também chamada de distância de correlação perfeita ou escala de uniformidade. Quando seus valores são baixos significa flutuação rápida em relação a média indicando alta variabilidade para aquele estrato. Deste conceito podem ser obtidas informações ótimas para a amostragem, que dependerá da acurácia das estimativas necessárias, do nível de confiança desejável e da variabilidade do solo. A formulação estatística e detalhes adicionais de cada teste serão apresentados no capítulo de Materiais e Métodos.

As análises estatísticas aplicadas aos resultados do ensaio de piezocone normalmente são unidirecionais, na vertical de penetração do cone. Análises tridimensionais são possíveis, porém não serão aqui abordadas. Caracteristicamente os resultados dos ensaios de piezocone apresentam picos e tendências (“trends”) nos dados, que devem ser adequadamente avaliados, interpretados e processados, antes da aplicação de técnicas de filtragem e testes estatísticos. Os picos, nos gráficos que representam os resultados dos ensaios de cone podem indicar particularidades do solo, porém prejudicam os testes estatísticos e seleção de registros para aplicação nas correlações. A presença de tendência (“trends”) é aspecto inerente aos solos, e muitos dos parâmetros medidos tem uma componente devido tensão vertical total ( $\sigma_{V0}$ ).

Pesquisas realizadas por Ajayi & Palogun (1988) nos solos nigerianos e confirmadas por Rocha Filho & Carvalho (1990) indicam que em solos tropicais pode haver menor influência da tensão vertical sobre alguns parâmetros, não permanecendo registrado o histórico de tensões do processo de formação.

A análise de tendências permite a separação espacial de variáveis geológicas (Isaaks & Srivastava, 1989). O dado pode ser separado em duas componentes: tendência e residual, sendo que a residual tem característica de aleatoriedade e a tendência é definida

pelo grau da correlação, sendo que quanto maior o coeficiente de adequação linear mais perfeita a definição da tendência. A avaliação da presença de tendências muitas vezes pode ser feita por inspeção visual, porém a utilização do teste RUN de Wickremesinghe (1989), que é uma medida de constância da média, pode auxiliar nas análises e indicar o nível de significância dos resultados. Na Figura 3.59 são mostrados os registros de  $q_c$ , de um ensaio de piezocone, com indicação de tendências, a partir do teste RUN, em dois trechos de ensaio para 95 % de nível de confiança.

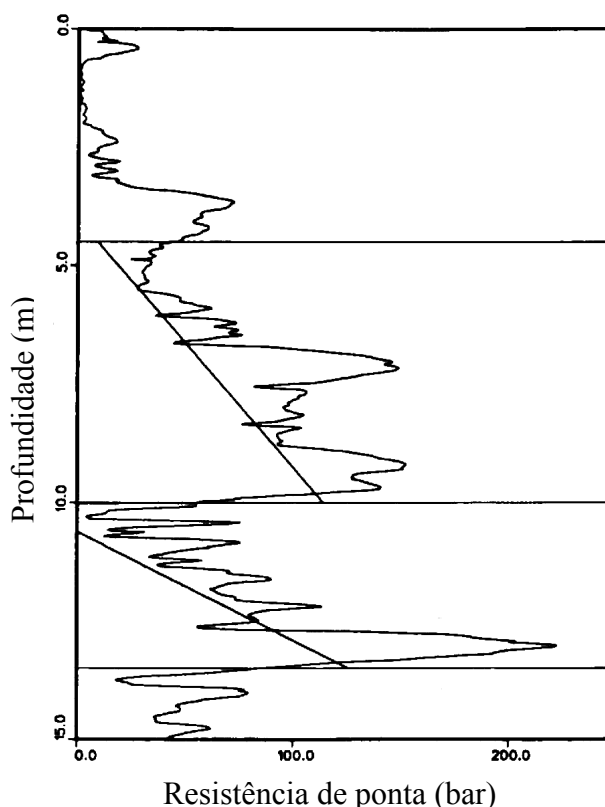


Figura 3.59 – Análise de tendência (“trend”), aplicado aos registros de  $q_c$  do resultados de um ensaio de piezocone, por regressão linear, a nível de confiança de 95 % (Wickremesinghe, 1989).

Análises de confiança aplicadas aos resultados dos ensaios de piezocone podem auxiliar a definição de espaçamento ótimo de amostragem para caracterização adequada de um certo intervalo do perfil de solo. A Tabela 3.13 mostra o resultado de análise de confiança, comparando dois intervalos de um perfil de solo com diferentes níveis de variabilidade, medido pelo coeficiente de variação.

Tabela 3.13 – Resultados da aplicação de testes estatísticos para estimar espaçamento ótimo de amostragem a partir da análise de variabilidade de resultados de ensaios de piezocone (Wickremesinghe, 1989)

Camada (m)	Tolerância	Nível de confiança (%)	Numero de amostras	Espaçamento (cm)
25.0 a 30.0 <i>Baixa variabilidade</i> <i>Cov = 0,289</i>	+- 0.05	80	58	8,7
		90	93	5,4
		95	132	3,8
	+- 0.10	80	15	35,0
		90	26	20,0
		95	36	13,8
30.0 a 35.0 <i>Alta variabilidade</i> <i>Cov = 0,410</i>	+- 0.05	80	112	4,5
		90	184	2,7
		95	262	1,9
	+- 0.10	80	30	17,2
		90	49	10,4
		95	68	7,4

A compartimentação de um perfil de ensaio de piezocone em camadas, objetiva estabelecer o nível de variabilidade de cada camada solo e do perfil integral do solo, de forma a definir uma estratégia adequada de amostragem. O parâmetro estatístico que permite inferências neste sentido é a escala de flutuação, que considera que no interior de um pequeno volume de solo os valores de um parâmetro do solo são aproximadamente uniformes e menos variáveis. Entre unidades distintas ocorrem mudanças na variabilidade, de forma que a variabilidade no interior de cada elemento será menor que entre elementos. Se o tamanho do elemento for grande os valores médios dos parâmetros do solo no interior do elemento não diferem da média.

Analisando a escala de flutuação independentemente para  $q_c$ ,  $f_s$  e  $u$  o autor concluiu que cada registro de  $f_s$  representa um valor médio, com escala de flutuação menor do que  $q_c$ , cujos registros também representam valores médios, função do volume de influência do bulbo de tensões à frente do cone; por último o registro de  $u$ , que representa medições pontuais, que refletem de forma mais rápida as variações do solo. Quando dois ensaios distintos são comparados o intervalo de amostragem deve ser menor que a escala de flutuação. O oposto ocorre quando a amostragem é feita com o mesmo equipamento (mesmo ensaio), onde o intervalo de amostragem deve ser maior que a escala de flutuação para obter-se amostras representativas daquele estrato. A definição de espaçamento de amostragem pode, desta forma, ser feita estabelecendo o nível de confiança exigido pelo projeto.

A análise da variação espacial é importante no planejamento de programas de investigação e auxilia na seleção de parâmetros de projeto. Na Figura 5.60 é mostrado um esquema, onde são indicadas as várias escalas de variabilidade, comparando-as com a necessária para um dimensionamento de estacas. Apesar das medidas serem determinísticas no local do ensaio, os parâmetros precisam ser estimados nos locais não amostrados. Pinnaduwa et al. (2003) propõem um método de identificação de camadas estatisticamente homogêneas, bem como mostram que a teoria dos campos aleatórios, com a geoestatística em conjunto com análise de regressão, podem ser utilizadas na avaliação da homogeneidade estatística de camadas. Utilizando um critério de janelas móveis, com comprimento da janela fixo de 0,4 m, é possível identificar a presença de tendências a partir da aceitação de coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superiores a 0,9. Estes mesmos autores consideram que as amostragens realizadas no interior de camadas estatisticamente homogêneas são mais representativas da propriedade investigada e portanto mais confiáveis.

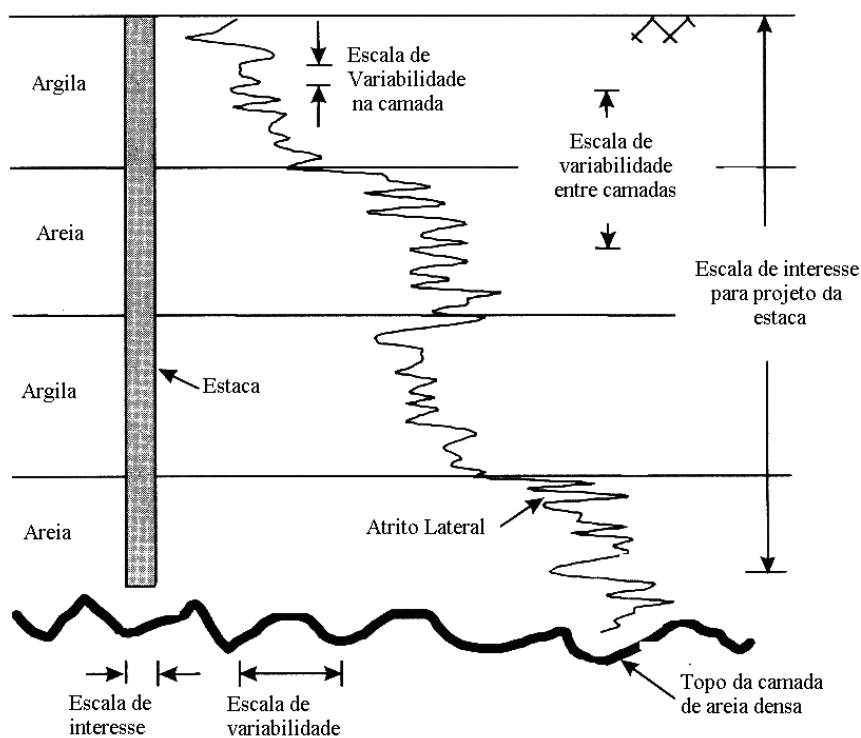


Figura 3.60 – Diferentes escalas de variabilidade do maciço de solo (Pinnaduwa et al., 2003)

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Considerações gerais

Neste capítulo são descritos sucintamente os locais pesquisados, os ensaios utilizados nas análises e os procedimentos de execução, tratamento e interpretação dos resultados desses ensaios.

### 4.2 Sítios estudados

Para avaliar as influências das características geológicas na interpretação dos ensaios de piezocone, foram selecionados nove locais, com características geológicas distintas, representativas de grandes extensões do território brasileiro, identificados com a denominação da cidade onde se localizam os respectivos sítios. A Figura 4.1 mostra a localização dos sítios de pesquisa, com relação às diferentes unidades geológicas.

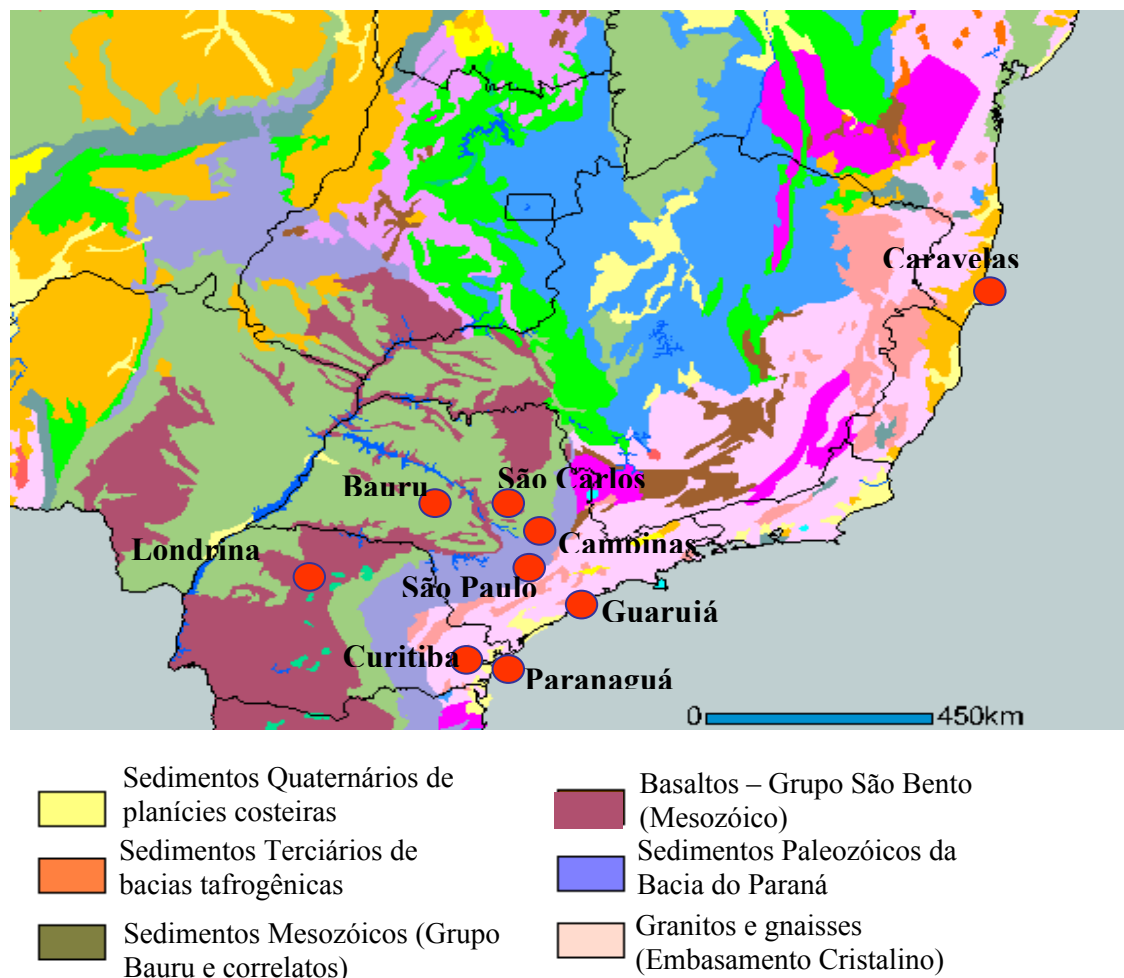


Figura 4.1 Croquis com a localização dos sítios estudados e indicação das principais unidades geológicas

A Tabela 4.1 mostra um resumo das características geológicas de cada sítio e os ensaios utilizados nos levantamentos realizados.

Tabela 4.1 Resumo das condições geológicas de cada sítio, com indicação dos ensaios utilizados para realização dessa pesquisa

Sítio	Descrição Geológica	Ensaio utilizado na pesquisa							
		Piezocone ou cone elétrico	Piezocone sísmico	Piezocone de resistividade	Cross-hole	Sondagem de simples reconhecimento /pocos	Ensaio/Análises de laboratório	Mapeamento Geológico/Caminhamento elétrico	
<b>Curitiba</b>	Sedimento Terciário da Bacia de Curitiba, recoberto por colúvio	Sedimento Terciário	5		1		1	4	1
<b>São Paulo</b>	Sedimento Terciário da Bacia de São Paulo – Formação Itaquaquetuba				6		3		1
<b>Paranaguá</b>	Sedimento Quaternário da Planície Litorânea – Ambiente de Baía fechada	Sedimento Quaternário			4		10	8	5
<b>Guarujá</b>	Sedimento Quaternário da Planície Litorânea – Ambiente de Baía fechada		2				2	5	1
<b>Caravelas</b>	Sedimento Quaternário da Planície Litorânea – Ambiente de praia em mar aberto		2						1
<b>São Carlos</b>	Sedimento e Basalto da Bacia do Paraná, recobertos por colúvio, submetidos a intemperismo tropical	Solo Tropical	5	2	4	2	10	10	1
<b>Bauru</b>	Sedimento da Bacia do Paraná recoberto por colúvio, submetidos a intemperismo tropical		9	2	1	1	7	20	
<b>Campinas</b>	Intrusão de Diabásio submetido a intemperismo tropical		11	2		1	12	20	
<b>Londrina</b>	Basalto submetido a intemperismo tropical		2				2	20	

### 4.3 Ensaio realizados

São aqui descritos os equipamentos e procedimentos dos ensaios utilizados, com ênfase naqueles vinculados a tecnologia do piezocone, conforme ABNT (1990) MB-3406. Detalhes e especificações das sondagens de simples reconhecimento e ensaios de “cross-hole” podem ser obtidos nas normas ABNT (1980) NB-6484 e ASTM (1984) D4428 respectivamente, que foram seguidas na realização desses ensaios.



#### 4.3.1 Sistema de reação

Para cravação das ponteiros e execução dos ensaios de piezocone (CPTU), piezocone de resistividade (RCPTU), piezocone sísmico (SCPTU) e algumas coletas de amostras foi utilizado um penetrômetro multifuncional italiano da Pagani Geotechnical Equipment (Foto 4.1). O equipamento é especialmente preparado para execução de ensaios geotécnicos em campo, com automação de todas as funções operativas, o que facilita a execução dos ensaios e permite a obtenção de parâmetros de projeto com mais agilidade. Tem capacidade de penetração de até 200 KN, trabalhando com sistema de ancoragem através de 2 trados mecânicos com 30 a 50 cm de diâmetro. A capacidade de penetração e profundidade de investigação dependem, desta forma, de 3 fatores: força do mecanismo de penetração, capacidade de reação da ancoragem e características litológicas do subsolo.



Foto 4.1 – Penetrômetro utilizado para execução dos ensaios de piezocone.

#### 4.3.2 Ensaios com piezocone

Os ensaios de piezocone utilizados neste trabalho foram em grande parte gerados por uma mesma equipe, utilizando equipamentos fabricados pela empresa sueca

Geotech. Apenas os ensaios de piezocone sísmico foram executados utilizando um piezocone sísmico da empresa norte americana Vertek, com sistema de aquisição desenvolvido através deste projeto de pesquisa. Os piezocones foram adequadamente calibrados e aferidos nos laboratórios da Faculdade de Engenharia de Bauru – UNESP.

O procedimento de execução do ensaio de cone elétrico e piezocone é normalizado pela ABNT – MB 3406 (1990) e para o ensaio com medida de poro-pressões, denominado piezocone ou CPTU, é normalizado pela ASTM – D 5778 (1995). O procedimento detalhado e o resultado de aferições dos piezocones utilizados nessa pesquisa são apresentadas em Giacheti (2001) e Bolinelli Júnior (2004).

Nesse ensaio, uma ponteira de forma cônica, conectada à extremidade de um conjunto de hastes, é introduzida no solo, em intervalos de 1 metro, a uma velocidade constante de 2 cm/s. A extremidade cônica tem um vértice de  $60^\circ$  e um diâmetro de 35,68 mm, com área de ponta igual a  $10 \text{ cm}^2$ . O diâmetro das hastes é igual ao diâmetro do cone e o sistema de transmissão de dados do piezocone convencional e de resistividade funciona no modo sônico, sem utilização de cabos. Os ensaios de piezocone sísmico utilizam o sistema convencional de transmissão de dados através de cabos. Os registros da resistência de ponta ( $q_c$ ), do atrito lateral ( $f_s$ ), da poro-pressão ( $u$ ), da inclinação e da velocidade de avanço, são obtidos em intervalos de 2 cm, sendo todos visualizados em tempo real na tela de um computador portátil. Os resultados são corrigidos pelas calibrações feitas em laboratório e arquivados em banco de dados digital, para posterior processamento e integração com demais informações.

#### 4.3.3 Ensaios com piezocone de resistividade

Para os ensaios com medida de resistividade (ou condutividade) do solo foi utilizado um sistema constituído por um módulo que é acoplado a parte posterior do piezocone. O sistema tem geometria com 4 eletrodos, em arranjo tipo Wenner (Figura 4.3), e um transmissor de ondas sonoras para envio dos dados até a superfície conforme mostrado na Figura 4.2. O sistema trabalha alimentado por 4 baterias alcalinas no interior do módulo, que tem seção circular de  $15 \text{ cm}^2$  e um intervalo de medida que varia de uma resistividade entre 0,3 a  $2000 \Omega\text{m}$ , ou condutividade elétrica entre 0,5 e  $3000 \text{ mS/m}$ , segundo seu fabricante.

Considerando os quatro eletrodos, uma corrente elétrica é aplicada nos dois eletrodos externos (denominados de corrente), e é lida nos 2 eletrodos internos (denominados de potência). Estas informações são úteis na definição litológica, auxiliam na delimitação de alguns tipos de contaminantes e especialmente para avaliar o nível de salinidade das águas subterrâneas, conforme descrito por vários pesquisadores.

O sensor de resistividade foi devidamente aferido, em uma caixa d'água, preenchida com uma solução de água e cloreto de sódio em várias concentrações, monitorada por um condutivímetro portátil, descrito por Bolinelli Junior (2004).

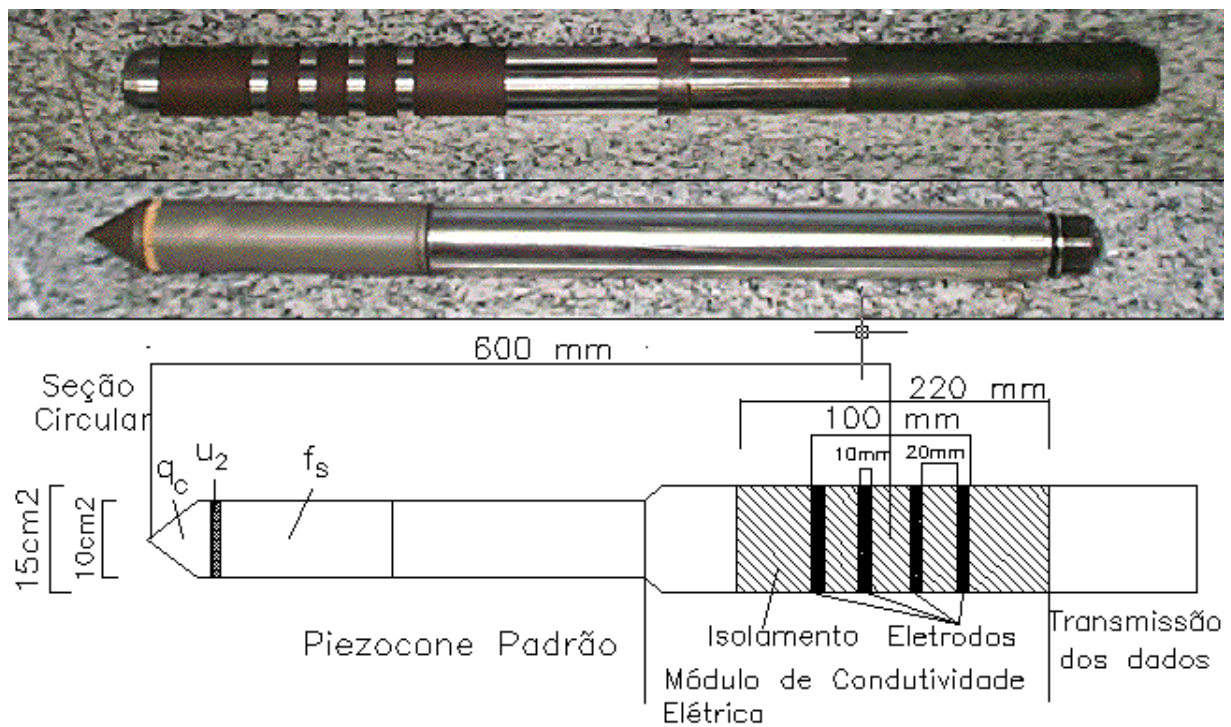


Figura 4.2 – Piezocone de Resistividade (RCPTU) com indicação da posição dos sensores e dimensões

Foram comparadas as leituras obtidas no sensor com as leituras obtidas no condutivímetro, mostrando que existe adequada sensibilidade do módulo de resistividade do piezocone com relação aos vários intervalos de medida de resistividade. A Figura 4.3 mostra o resultado destas calibrações para toda a faixa de medida da resistividade, sendo que maiores detalhes sobre os procedimentos e resultados da calibração são mostrados em Bolinelli Junior (2004). Conforme demonstra o autor as curvas de calibração mostram que os valores obtidos em campo estão dentro da faixa de utilização do módulo de resistividade, o que valida as medidas deste parâmetro em

campo. Para valores de resistividade entre 2 ohm.m e 5000 ohm.m os coeficientes de variação são menores que 5% e os erros relativos menores que 10%.

Este módulo de resistividade, adequadamente calibrado, foi utilizado para as campanhas de investigação com piezocone de resistividade em alguns dos sítios estudados. Os resultados dos perfis de resistividade são comparados com as demais informações e utilizados como informação auxiliar na identificação do perfil estratigráfico e no mapeamento de contaminações.

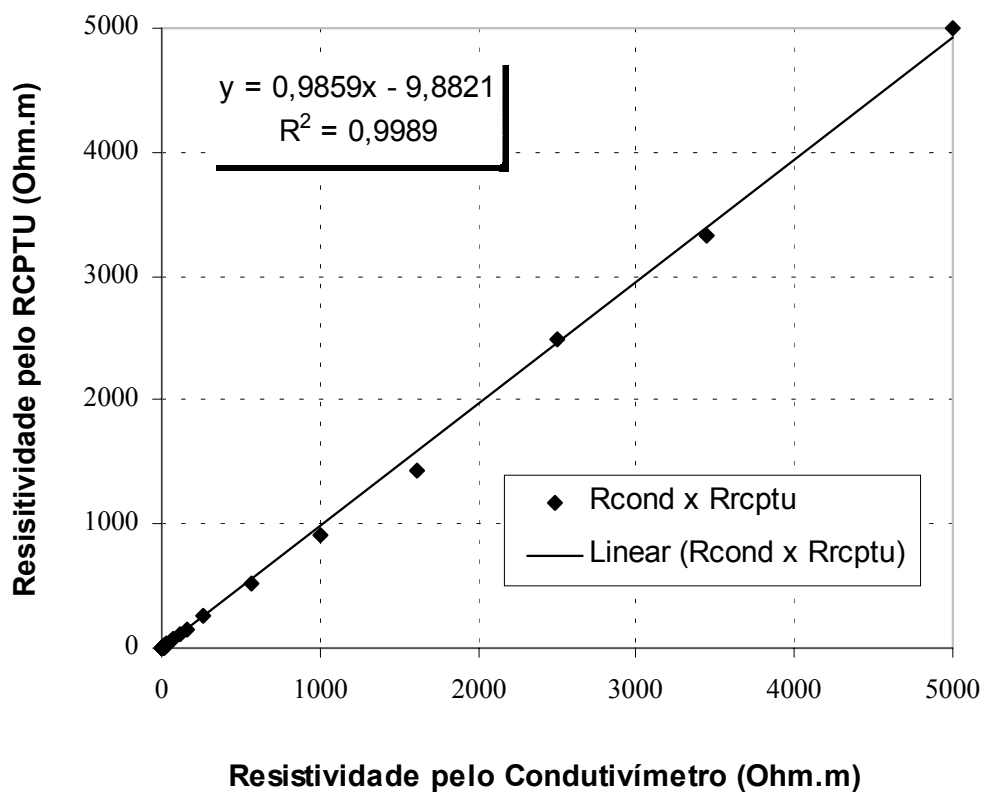


Figura 4.3 Calibração do sensor de resistividade – Faixa de valores de 2 a 5000 ohm.m.(Bolinelli Junior, 2004)

#### 4.3.4 Ensaios com piezocone sísmico

Na execução dos ensaios de piezocone sísmico foi utilizada uma ponteira sísmica, constituída pelos sensores convencionais do piezocone e por um sistema de geofones triaxiais adquiridos de empresa comercial americana. Os softwares, sistema de aquisição e de geração das ondas sísmicas foram montados e desenvolvidos pelo Grupo de Pesquisas em Geotecnia de solos tropicais da Faculdade de Engenharia de Bauru - Unesp, com tecnologia nacional, conforme descritos a seguir. O piezocone sísmico

utilizado tem área de ponta de  $10 \text{ cm}^2$ , luva de atrito com  $150 \text{ cm}^2$ , poro-pressão medida na posição  $u_2$  e 3 geofones de 28 Hz, instalado na porção superior dos sensores convencionais do piezocone.

#### 4.3.4.1 Sistema de geração de ondas

Para geração das ondas foi desenvolvido sistema composto por placa metálica, com marretas de 5 e 7,5 kg, e pesos de 15 Kg sobre a placa metálica para garantir um adequado contato entre placa e solo. O sistema é fixado em superfície horizontal, com placas metálicas ou estacas de madeira e a distância entre a placa e as hastes de cravação varia de 0,5 a 2 m. Por ser independente do lastro da máquina de cravação (Figura 4.4), permite que a posição e distância da placa sejam modificadas facilmente. Foi instalado um “trigger” (gatilho) do tipo fechamento de circuito elétrico que é acionado simultaneamente ao impacto da marreta na placa e informa ao sistema de aquisição que a onda foi gerada ( $t = 0 \text{ s}$ ). Os impactos da marreta são produzidos em lados opostos da placa de forma a polarizar as ondas cisalhantes, que facilita a interpretação do tempo de chegada pelo método do cruzamento de ondas polarizadas. O sistema possui um bom controle da altura de queda do martelo, observando-se uma boa repetitividade da geração de ondas sucessivas.

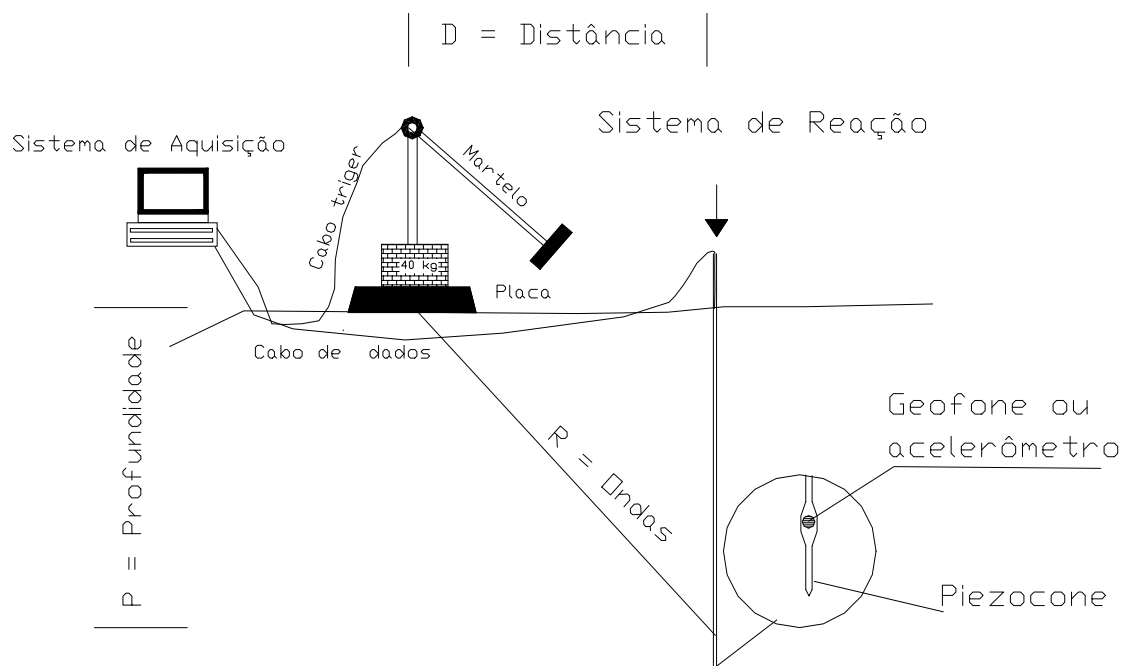


Figura 4.4 – Sistema de geração de onda sísmica para ensaio de piezocone sísmico



As ondas são geradas normalmente em intervalos de 1 metro durante a cravação ou retirada da composição no ensaio de piezocone, transmitidas a superfície por um cabo passado no interior das hastes e registradas em sistema de aquisição com computador portátil em campo.

#### 4.3.4.2 Sistema de registro e aquisição dos dados sísmicos

O sistema de aquisição é constituído por um equipamento modular, ADS2000IP, da Lynx (Foto 4.2), adaptado especificamente para aquisições dos dados do piezocone sísmico utilizado, que foi desenvolvido com financiamento da FAPESP Processo nº 03/05024-3. O sistema faz a conversão dos dados dos sensores instalados no piezocone para sistema digital, registra-os e armazena-os em computador portátil com comunicação via rede.



Foto 4.2 – Sistema de registro e aquisição dos dados do piezocone sísmico utilizado.

#### 4.3.4.3 Interpretação dos resultados dos ensaios sísmicos

A interpretação dos registros das ondas sísmicas consiste em identificar a primeira chegada da onda cisalhante a partir de um gráfico tempo versus voltagem. A

polarização das ondas cisalhantes permite identificar a primeira chegada desta onda pelo cruzamento dos sinais, conforme mostrado na Figura 4.5. A partir das relações geométricas do ensaio calcula-se a distância percorrida pela onda em cada ensaio ( $R$ ) e a velocidade da onda pelas equações (31) e (32).

$$R = (P^2 + D^2)^{1/2} \quad (31)$$

$$V_s = (R/t) \quad (32)$$

sendo,  $P$  profundidade do geofone,  $D$  distância da placa até as hastes do piezocone sísmico,  $t$  tempo de primeira chegada,  $V_s$  velocidade da onda cisalhante (Figura 4.6). Conforme procedimento recomendado por Campanella et al. (1986) os ensaios normalmente são executados em intervalos de 1 m, fornecendo um perfil de velocidade sísmica de cada camada.

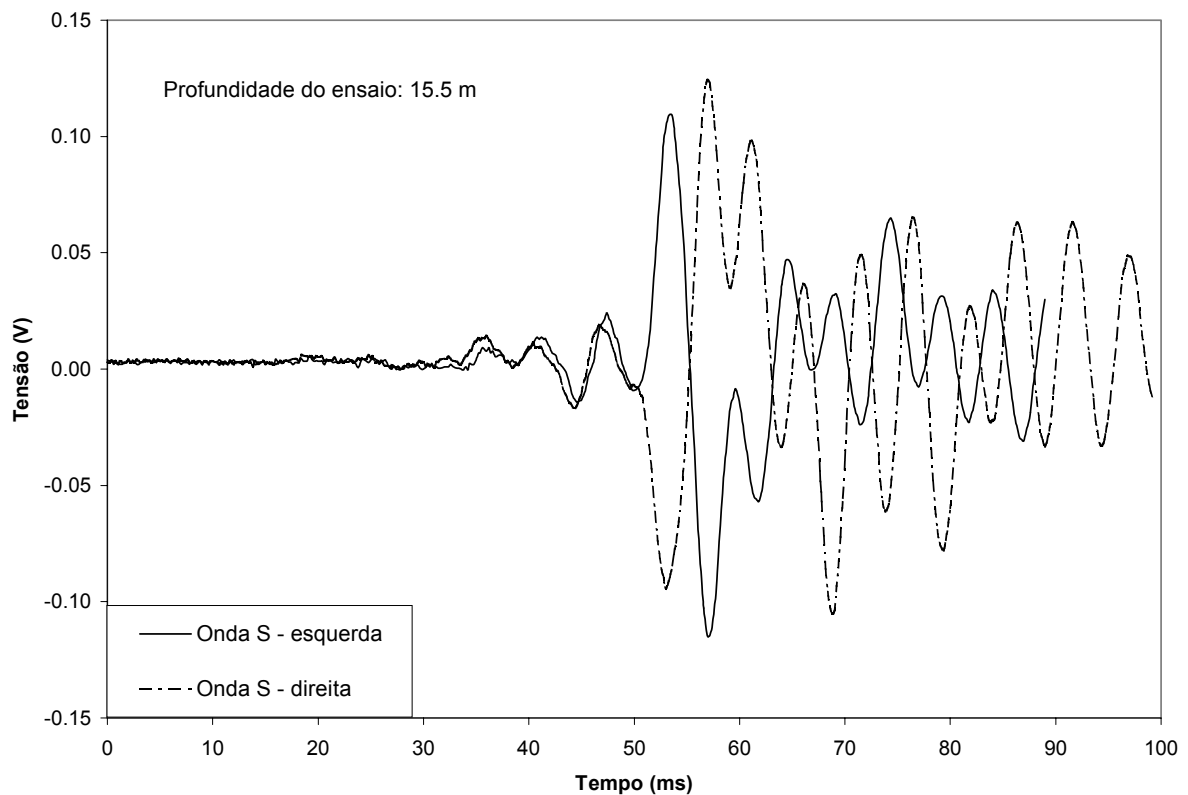


Figura 4.5 – Registro típico de duas ondas sísmicas onde se observa a polarização da onda S por impacto em lados opostos da placa instalada na superfície do terreno.

O ensaio sísmico ““downhole””, realizado no SCPT, consiste em três etapas: medida do tempo de chegada das ondas S, determinação da velocidade da onda S ( $V_s$ ) para cada profundidade de ensaio e cálculo do módulo de cisalhamento máximo ( $G_o$ ) para cada

uma dessas profundidades. A etapa mais importante da interpretação do ensaio “downhole” é a medida precisa do tempo de chegada da onda S. Um esquema de como é realizado o ensaio “downhole” no SCPT é apresentado na Figura 4.6. A velocidade de onda cisalhante ( $V_s$ ) pode ser determinada dividindo-se a diferença das distâncias percorridas pela onda S, para duas profundidades diferentes, pela diferença de tempo entre dois sinais registrados.

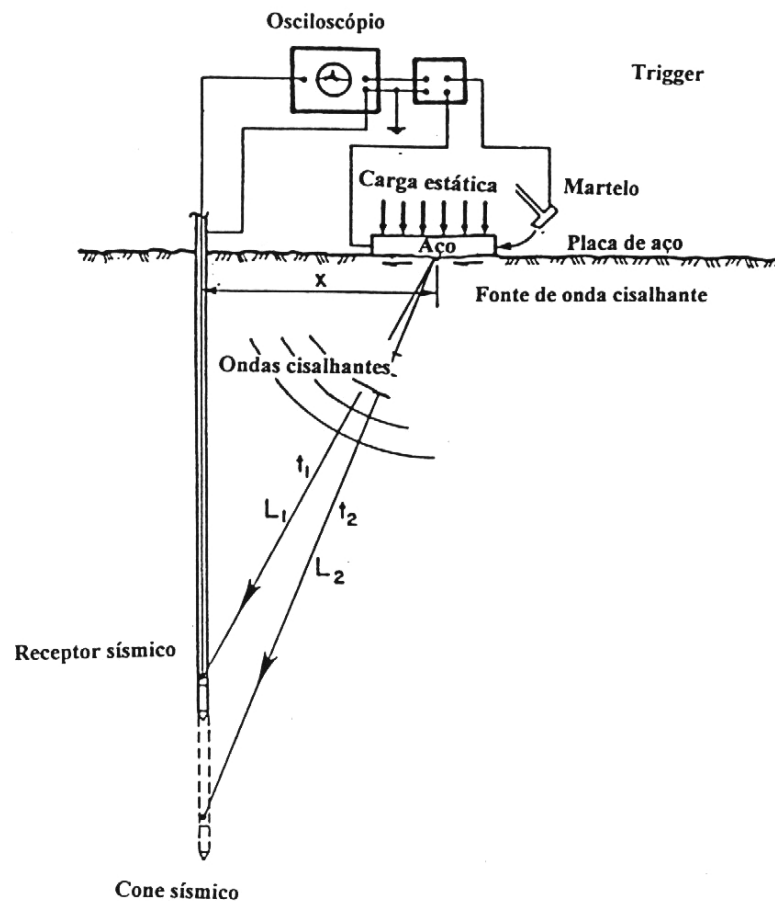


Figura 4.6 - Ensaio SCPTU “downhole” (Stewart e Campanella, 1992)

A massa ou peso específico do solo é determinado através de amostras indeformadas ou estimativas a partir de resultados de sondagens de simples reconhecimento ou ensaios de piezocone. Pode-se relacionar o módulo de cisalhamento máximo ( $G_0$ ), a velocidade de onda cisalhante ( $V_s$ ), a massa específica do solo ( $\rho$ ) e a aceleração da gravidade ( $g$ ) através da eq. (33), da Teoria da Elasticidade:

$$G_0 = \rho V_s^2 = \frac{\gamma}{g} V_s^2 \quad (33)$$



#### 4.3.5 – O filtro de cavidade preenchido com graxa para registro de poro-pressão

É possível fazer o registro da poro-pressão em ensaios de piezocone utilizando um filtro de cavidade preenchido por graxa automotiva em substituição ao elemento poroso convencional saturado com glicerina ou água. Estudos em laboratório (Larson, 1995; Elmgren, 1995; Bolinelli Junior, 2004) e artigos que tratam do tema mostram que a graxa apresenta um pequeno atraso na resposta, em função da viscosidade mais elevada. No entanto, em locais com nível d'água profundo, a execução de ensaios de piezocone, saturados com água ou mesmo com glicerina, torna-se inviável, pela necessidade de pré-furos profundos, enquanto que o emprego do filtro de cavidade preenchido com graxa automotiva fornece respostas coerentes e informações úteis para auxiliar na definição da estratigrafia. No entanto, a resposta da medição da poro-pressão utilizando a graxa mostra efeitos de histerese, representada na Figura 4.7 pela diferença de leitura entre a pressão aplicada e a pressão medida no piezocone, obtidos em laboratório. Durante a realização desse trabalho diversos ensaios de piezocone foram feitos de forma a comparar os resultados da utilização do filtro de cavidade preenchido com graxa e o processo de saturação convencional com glicerina.

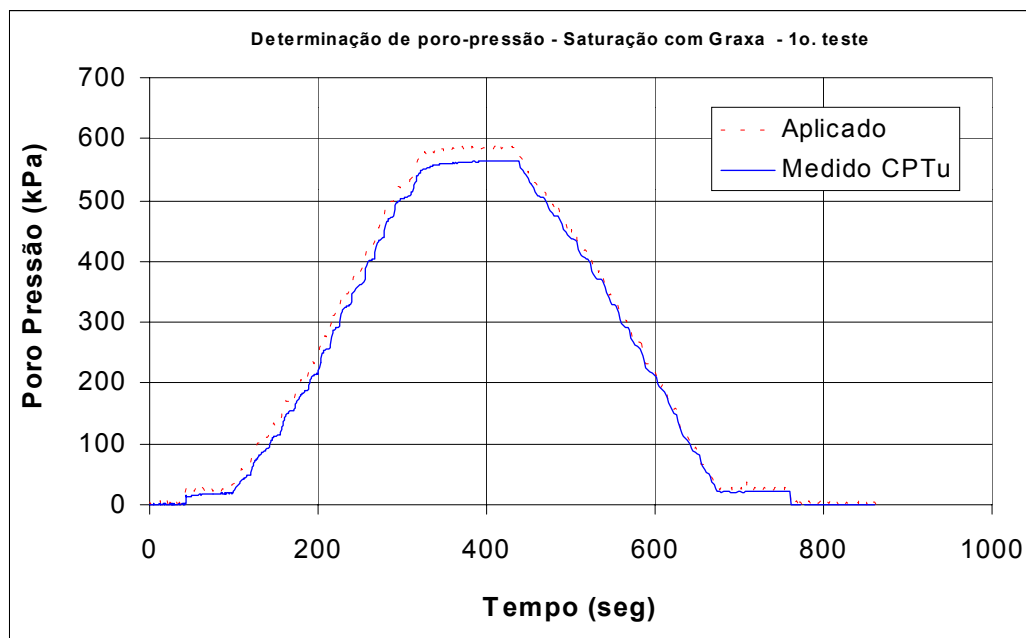


Figura 4.7 - Registro da poro-pressão mostrando os valores da pressão aplicada e os valores medidos no piezocone utilizando graxa.

#### **4.4 Procedimentos de tratamento dos dados e interpretação dos resultados**

##### **4.4.1 - Organização digital dos dados**

Todos os resultados de ensaios e mapeamentos foram organizados em banco de dados no formato AGS (AGS, 1994) utilizando os softwares HoleBase e KeyHole, integrados ao Excel e ao AutocadMap, para produção de gráficos, ábacos, mapas, seções, modelos, entre outros. A integração entre softwares e a automação de procedimentos de tratamento, permitiu ampla gama de comparações entre os diversos ensaios disponíveis em cada sítio, com um melhor entendimento e visualização da geometria e distribuição das unidades de solo, pois os dados são georreferenciados. Para avaliar os resultados do emprego de sistemas de classificação dos solos que empregam ábacos a partir de ensaios de piezocone, foi desenvolvido processo automatizado que superou as expectativas, reduzindo sensivelmente o tempo de processamento das informações e facilitando as análises e interpretações. Esta tendência de gerenciamento digital e automação do processamento, já antecipada em Nicholls et al. (1996), torna mais efetivos os trabalhos de investigação do subsolo, e foi fundamental para possibilitar a realização deste trabalho.

##### **4.4.2 – Identificação do perfil estratigráfico**

###### **4.4.2.1 – Considerações gerais**

A identificação do perfil estratigráfico abrange a identificação da geometria dos materiais constituintes do perfil, suas relações de contato e transições entre unidades, abrangendo análises de variabilidade e classificação. Neste trabalho isto é feito pela combinação e comparação das informações provenientes das sondagens de simples reconhecimento e aquelas provenientes dos resultados dos ensaios de piezocone.

As transições entre unidades são identificadas através da interpretação das sondagens pontuais. A integração entre as várias sondagens depende de interpretação geológica. Nas sondagens de simples reconhecimento a identificação das transições e classificações dos solos foram feitas por inspeção e descrição táctil-visual, de acordo com as informações registradas nos boletins de sondagem.

Nos ensaios de piezocone as transições são identificadas por inspeção visual dos registros dos três sensores ( $q_c$ ,  $f_s$  e  $u$ ) e separação das unidades. A identificação pode também ser feita por testes estatísticos, sendo aqui descritos os testes  $D^2$ ,  $T$  e de *correlação intraclassa*, que também podem ser utilizados para análises de variabilidade e homogeneidade de conjuntos de dados obtidos em um ensaio de piezocone. As classificações dos materiais foram feitas a partir sistemas de classificação que empregam ábacos, que indicam o comportamento do solo, e foram aplicados a todos os ensaios de piezocone dos sítios estudados. Para a realização deste trabalho foram utilizadas e comparadas as propostas de Douglas & Olsen (1981), Robertson et al. (1986), Felenius & Eslami (2000) e, que foram apresentados no item anterior. Na revisão da literatura foi também descrito um sistema de classificação mais recente, desenvolvido por Zhang & Tumay (1999), com base em conceitos probabilísticos, que foi utilizada para interpretação dos resultados dos ensaios e comparado com os resultados dos demais sistemas de classificação descritos. Um grupo de testes estatísticos foi aplicado para caracterização dos dados aleatórios, utilizando a média ( $X$ ), o desvio padrão ( $\sigma$ ), o coeficiente de variação ( $\eta$ )= $\sigma_Q/X$  e a escala de flutuação ( $\delta$ ) ou escala de variabilidade, com base nos valores de  $q_c$  do ensaio de piezocone.

Para tratamento e interpretação dos resultados foram utilizados softwares desenvolvidos em Fortran e fornecidos gratuitamente pela UBC (Universidade da Colúmbia Britânica – Canadá). Para a classificação probabilística, com base nos índices classificatórios U e V, definidos por Zhang & Tumay (1996), utilizou-se software de domínio público, disponibilizado pelos autores.

#### 4.4.2.2 Identificação estatística das transições

Para a identificação estatística das transições foram aplicados três testes estatísticos aos resultados dos ensaios de piezocone, que utilizam o critério de janelas móveis e a comparação das médias superiores com as médias inferiores, em um processo de deslocamento contínuo da janela ao longo do perfil. Os procedimentos utilizados por Wickremesinghe (1989) e por Zhang & Tumay (1999) foram seguidos para execução do Teste T, do teste de Coeficiente de Correlação Intraclassa na análise univariada e o Teste  $D^2$ , para análise multivariada, que combina os resultados de  $q_c$ ,  $f_s$  e  $u$  para a perfeita definição de camadas. A Figura 4.8 exemplifica o conceito de janela móvel utilizado nestes testes estatísticos.

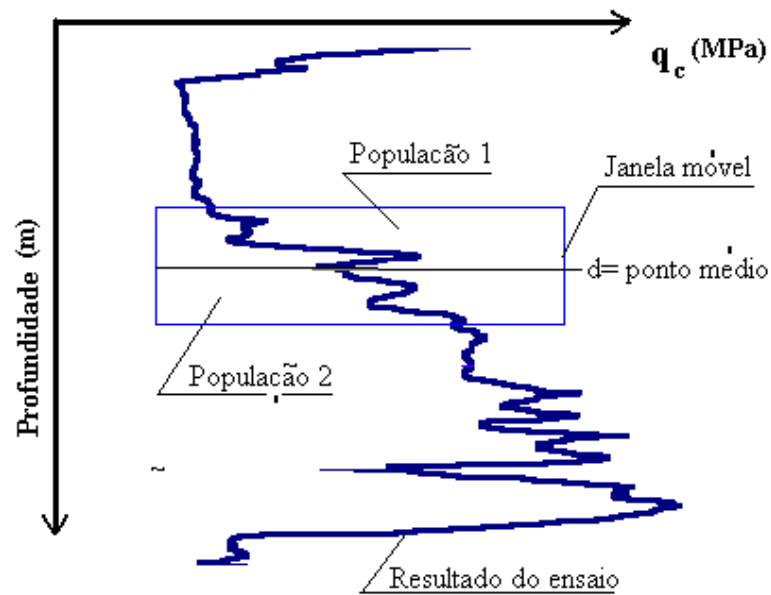


Figura 4.8 – Critério de janela móvel que se desloca ao longo do perfil, comparando duas populações com mesmo número de amostras, definidas pelo tamanho da janela utilizada.

O teste T é aplicado a uma única variável ( $q_c$ ,  $f_s$  ou  $u$ ) enquanto que o teste  $D^2$  é aplicado simultaneamente às três variáveis fornecendo boas informações sobre as transições entre camadas com base nas respostas dos três sensores do piezocone, conforme mostrado na Figura 4.9.

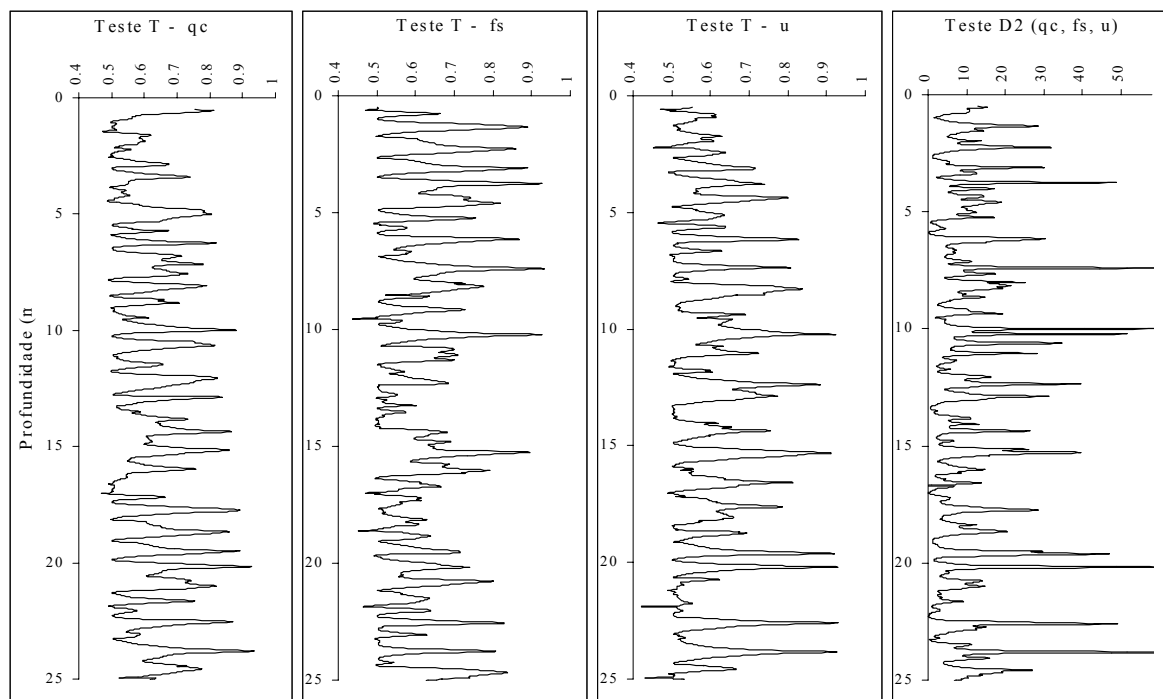


Figura 4.9 Comparação entre teste T univariado aplicado aos valores de  $q_c$ ,  $f_s$  e  $u$  de um ensaio de piezocone e teste  $D^2$  aplicado ao conjunto de valores de um mesmo ensaio de piezocone e janelas de 1 m.

Os testes estatísticos que utilizam o critério da janela móvel podem, desta forma, funcionar como critério para identificar o grau de homogeneidade, a partir do resultado do ensaio de piezocone. A variação do tamanho da janela móvel interfere na posição dos picos e no nível de detalhe da identificação, sofrendo influência direta da variabilidade e da quantidade de camadas do local investigado, conforme mostrado na Figura 4.10.

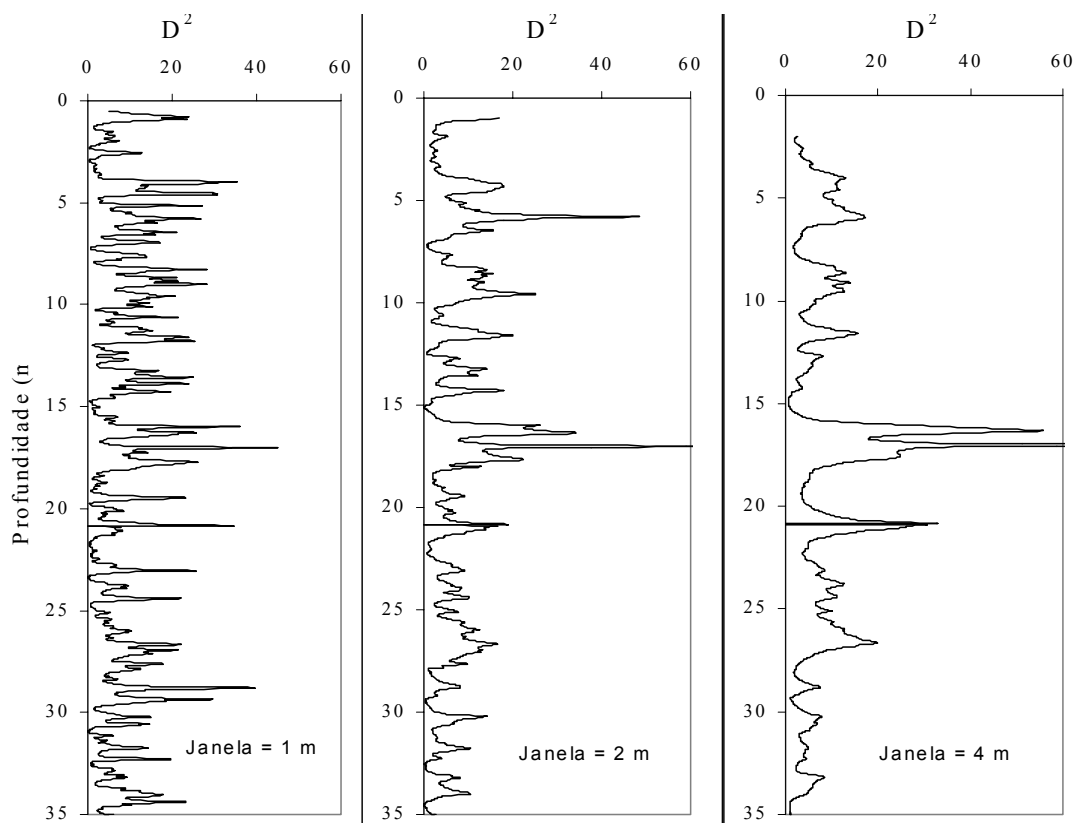


Figura 4.10 – Resultado do teste  $D^2$  aplicado ao resultado do ensaio de piezocone, variando tamanho da janela móvel de 1 a 4 metros, com picos dos gráficos indicando as prováveis transições.

Estes testes foram aplicados extensivamente a todos os ensaios e sítios investigados, selecionada uma dimensão de janela padrão de 2 m, e comparadas com os demais métodos de detecção das transições.

Rotinas informatizadas desenvolvidas por Wickremesinghe (1989) foram utilizadas para aplicação dos testes estatísticos aos resultados dos ensaios de piezocone, e são descritas a seguir as formulações dos testes utilizados.

### Teste T

A partir do centro da janela (d), indicado na Figura 4.10, tem-se duas amostras,  $\Omega_1$  e  $\Omega_2$  uma em cada lado.  $Q_1$  e  $Q_2$  são considerados as médias das respectivas amostras e  $\sigma_1^2$  e  $\sigma_2^2$  a variância das distâncias  $n_1$  e  $n_2$  da amostra, indicadas pelas equações (34) e (35).

Onde:

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{(n_1 - 1)} \sum_{i=1}^{n_1} (Q_i - \bar{Q}_1)^2 \quad (34)$$

$$\sigma_2^2 = \frac{1}{(n_2 - 1)} \sum_{i=1}^{n_2} (Q_i - \bar{Q}_2)^2 \quad (35)$$

Para duas amostras com igual número de dados e mesma distância ( $n$ ) em cada lado da janela a partir do centro ( $d$ ), a variância comum combinada  $\Upsilon_w^2$ , é definida pela eq (36).

$$\Upsilon_w^2 = \frac{n}{2n-1} \sigma_1^2 + \frac{n}{2n-1} \sigma_2^2 \quad (36)$$

Na equação acima, espera-se uma razoável homogeneidade de  $\sigma_1^2$  e  $\sigma_2^2$ , para janelas com tamanho pequeno. Logo, a razão T pode ser definida pela eq. (37).

$$T = \sqrt{\frac{n}{2} \left( \frac{\bar{Q}_1 - \bar{Q}_2}{\Upsilon_w} \right)^2} \quad (37)$$

Um recurso para melhor avaliar a possibilidade de diferenciação entre duas camadas adjacentes, é a diferença entre as médias ( $Q_1 - Q_2$ ), que será máxima se as duas amostras  $\Omega_1$  e  $\Omega_2$  forem claramente distintas. Considerando o registro anteriormente mencionado, o Teste T determinará necessariamente um pico potencial limite entre camadas, podendo-se realizar testes com diferentes tamanhos de janelas em função do tamanho da amostra ou espessura da camada.

### Coefficiente de Correlação Intraclases ( $\rho_1$ )

Como no caso anterior, considera-se  $\sigma_1^2$  e  $\sigma_2^2$  a variância das amostra  $\Omega_1$  e  $\Omega_2$  e a variância combinada  $\Upsilon_w^2$ , definida anteriormente. A variância intraclases  $\Upsilon_b^2$  é a variância das amostras combinadas, dada pela eq.(38).

$$\Upsilon_b^2 = \frac{1}{n_1 + n_2 - 1} \sum_{i=1}^{n_1+n_2} (Q_i - \bar{Q})^2 \quad (38)$$

onde,  $\bar{Q}$  é a média de todos os dados  $Q_i$  com  $i = 1, 2, \dots, (n_1 + n_2)$ .

Para um igual número de dados em uma amostra tem-se a eq. (39).

$$\Upsilon_b^2 = \frac{1}{2n - 1} \sum_{i=1}^{2n} (Q_i - \bar{Q})^2 \quad (39)$$

O coeficiente de correlação intraclasse  $\rho_1$  é definido como sendo o resultado da aplicação da eq. (40), sendo que valores próximos a zero (0) indicam amostras semelhantes e valores próximos a um (1) indicam amostras distintas entre si.

$$\rho_1 = \frac{\Upsilon_b^2}{\Upsilon_b^2 + \Upsilon_w^2} \quad (40)$$

### Teste $D^2$

O teste estatístico  $D^2$  avalia a distância entre as médias multivariadas de duas amostras com espaço limitado a  $\Omega_1$  e  $\Omega_2$ , implicando valores de  $D^2$  maiores quanto mais distintas forem as duas amostras (Rao, 1965 apud Wickremesinghe, 1989). O  $D^2$  é dado pela eq (41).

$$D^2 = \{\bar{Q}_1 - \bar{Q}_2\}^T [W]^{-1} \{\bar{Q}_1 - \bar{Q}_2\} \quad (41)$$

onde,  $\{\bar{Q}_1 - \bar{Q}_2\}$  é a coluna matriz das diferenças médias das variáveis nas duas amostras. Para o caso de  $m$  variáveis,  $\{\bar{Q}_1 - \bar{Q}_2\}$  é a matriz  $m \times 1$ .  $[W]$  é a variância combinada da matriz de covariação das amostras  $\Omega_1$  e  $\Omega_2$ . Para identificação das

camadas usando os resultados do ensaio de piezocone, o número de variáveis (m) considerado é igual a três, sendo:

$q_1, f_1, u_1$  resistência de ponta, atrito lateral e poro-pressão na amostra  $\Omega_1$

$q_2, f_2, u_2$  resistência de ponta, atrito lateral e poro-pressão na amostra  $\Omega_2$

As diferentes médias das variâncias das duas amostras são dadas pelas eq. (42) e (43).

$$\Delta q = \bar{q}_1 - \bar{q}_2 \quad \Delta f = \bar{f}_1 - \bar{f}_2 \quad \Delta u = \bar{u}_1 - \bar{u}_2 \quad (42)$$

$$\{\bar{Q}_1 - \bar{Q}_2\} = \begin{Bmatrix} \Delta q \\ \Delta f \\ \Delta u \end{Bmatrix} \quad (43)$$

Na utilização do Teste  $D^2$  para identificar o limite da camada de solo, a janela com dimensão  $d_0$ , é movida ao longo dos dados do perfil, sendo que o centro da janela separa as duas amostras, e para cada profundidade do  $d$ , o valor do  $D^2$  é calculado e plotado contra a profundidade. Os picos resultantes indicam a melhor posição dos limites das camadas, sendo os picos principais relacionados às principais transições e os picos secundários relacionados às transições secundárias. Variando o tamanho da janela e o grau de detalhe na seleção de picos, podem ser individualizados as camadas com um nível de detalhamento variável adequado para cada tipo de projeto.

#### 4.4.2.3 Análises estatísticas para estudos de variabilidade

Análises estatísticas para estudo da variabilidade de cada sítio foram aplicadas aos resultados dos ensaios de piezocone para obter a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação, para cada uma das camadas definidas. A estrutura da correlação espacial foi analisada através da função espacial, calculando-se a escala de flutuação através da função variograma aplicada aos valores de  $q_c$ . As rotinas informatizadas utilizadas na realização dos testes estatísticos foram obtidas da Universidade da Colúmbia Britânica (Wickremesinghe, 1989). Foram utilizadas as rotinas UBCLayer, UBCstat, UBCtrend e UBCrun, desenvolvidas em fortran, especificamente para tratamento estatísticos de resultados de ensaios de piezocone, sendo a maior parte das análises feita com base nos valores de  $q_c$ , do ensaio de piezocone.



A seguir tem-se uma descrição sucinta dos testes estatísticos e formulações utilizadas, para caracterização da variabilidade e obtenção de parâmetros estatísticos que definam as heterogeneidades internas de cada camada. Para estas avaliações são utilizadas a média ( $X$ ), o desvio padrão ( $\sigma$ ), o coeficiente de variação ( $\eta$ )= $\sigma/X$  e a escala de flutuação ( $\delta$ ) ou escala de variabilidade.

- Média ( $X$ ), fornece o valor médio da população investigada
- Desvio padrão ( $\sigma$ ), mede a intensidade em que o valor difere da média
- Coeficiente de Variação ( $\eta$ ) =  $\sigma/X$  , fornece uma relação entre o desvio padrão e a média, sendo uma forma padronizada do fator de variabilidade,
- Escala de flutuação ( $\delta$ ), que mede a distância até onde os dados apresentam alguma correlação espacial.

Os conceitos de média, desvio padrão e coeficiente de variação são claros e de fácil entendimento. A avaliação da variabilidade espacial, que é aqui retratada por meio da escala de flutuação, é determinada através das funções de variância e de auto-correlação explicadas na seqüência.

#### 4.4.2.4 - Função variância

A função variância ( $\Gamma^2$ ) é a expressão da variabilidade do desvio padrão em função da estrutura espacial do dado. Para o cálculo da escala de flutuação a partir da função variância são seguidas as seguintes etapas: os dados são agrupados em pares ( $n=2$ ) e é gerada nova série com as respectivas médias dos pontos adjacentes, sendo o comprimento da média igual ao espaço entre os dados; calcula-se o desvio padrão desta nova série, que será menor que o da série original; o procedimento é repetido para vários  $n=1,2,3,4..$ , até aproximar-se do número total de pontos. Para cada  $n$ , a função variância ( $\Gamma^2(Z_n)$ ) será dada pela eq (44).

$$\Gamma^2(Z_n) = \frac{\sigma_n^2}{\sigma_1^2} \quad (44)$$

A função variância pode ser determinada para diferentes distâncias de lag ( $Z$ ), ou distância de amostragem e a função tem valor máximo de 1, decrescente para zero, com o aumento da distância de “lag” (ou intervalo de amostragem). Para valores grandes de  $Z$  a função variância será inversamente proporcional a  $Z$ , conforme eq. (45).

$$\Gamma^2(Z) = \delta/Z \quad (45)$$

A partir desta relação, Wickremesinghe (1989) propõe o cálculo da escala de flutuação, sendo que para valores elevados de  $Z$  a função  $\Gamma^2(Z)_Z$  alcança um pico e este valor máximo é uma boa aproximação da escala de flutuação. Essa abordagem torna o processo de obtenção mais simples, retirando a incerteza na determinação do ponto de máxima curvatura do método de Vanmarcke (1978). A Escala de Flutuação é então calculada através do gráfico função variância x distância de “lag” versus distância de “lag”, mostrado na Figura 4.11.

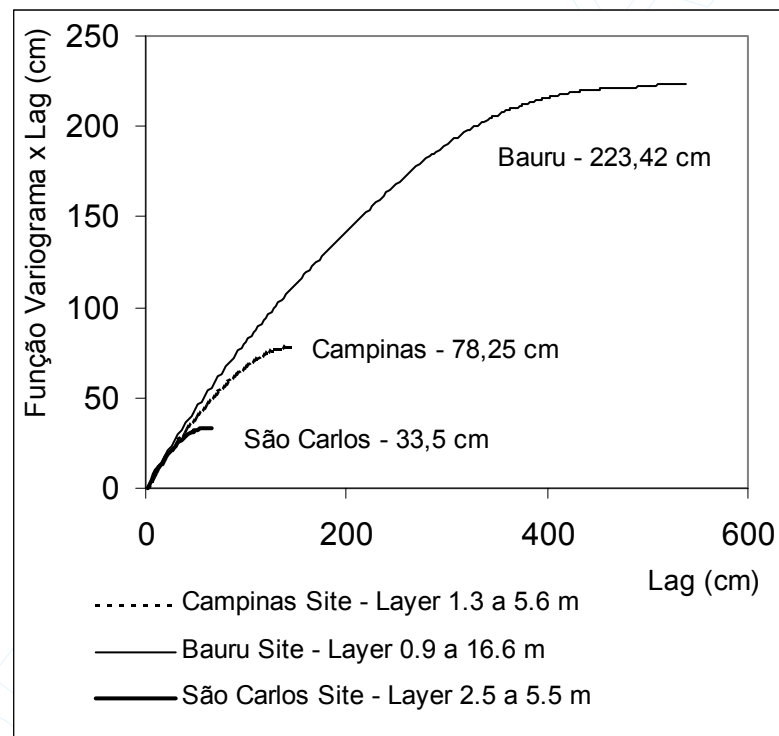


Figura 4.11 – Escalas de flutuação a partir de valores de  $q_c$ , com base no valor máximo da função do gráfico função variância x “lag” versus “lag”, para três intervalos distintos.

A análise geoestatística através de variogramas e diagramas de autocorrelação requer que os dados atendam ao requisito estatístico básico e sejam estacionários. A estacionaridade é a garantia de manutenção constante da média e do desvio padrão nas sub-populações de uma população analisada. Quando os resultados dos ensaios apresentam alguma tendência (“trend”), elas devem ser analisadas segundo a estatística

dos dados aleatórios e removidas, ou não, em função do tipo de estudo que se pretende realizar (Fenton,1999).

Neste trabalho a análise de tendência foi feita visualmente, sendo que alguns dos perfis e camadas mostram clara tendência e outros não indicam tendência alguma. Desta forma, devido a padronização desejada, o tratamento estatístico dos dados foi feito sem a remoção de tendências, porém elas são consideradas como critério de avaliação do resultado dos ensaios de piezocone nos diversos locais e contextos geológicos abordados. É importante frisar que a remoção de tendências interfere diretamente na obtenção dos parâmetros estatísticos aleatórios, como a média, o desvio padrão, a variância e a escala de flutuação.

#### 4.4.3 - Classificação de solos baseada na lógica “fuzzy” e nos resultados do piezocone

A classificação de solos com base na lógica “fuzzy” aplicada aos resultados dos ensaios de piezocone foi proposta por Zhang & Tumay (1996) e consolidada em Zhang & Tumay (1999), com objetivo de obter uma classificação geotécnica realmente independente baseada em resultados dos ensaios de cone elétrico, estabelecendo ainda uma transição entre esta nova abordagem e as classificações de solos convencionais. A abordagem é feita combinando probabilidade com a lógica fuzzy, comparando-os com as classes de solo da Classificação Unificada (USCS), na proposta de Douglas e Olsen (1981) e na constatação de que existe uma relação probabilística entre os tipos de solos e o comportamento geotécnico, o que resulta em inevitável incerteza. Considera-se também que existem três fatores básicos que controlam a resistência de ponta ( $q_c$ ) e o atrito lateral ( $f_s$ ) no ensaio de piezocone que são: equipamento e procedimento, composição do solo e componentes ambientais (Douglas & Olsen,1981). Ao garantir uma padronização rigorosa no equipamento e procedimento os resultados de  $q_c$  e  $f_s$  só serão afetados pelas características do solo e pelas condições ambientais. Nos ábacos de classificação bi-dimensionais que utilizam a Razão de Atrito ( $R_f$ ) e resistência de ponta ( $q_c$ ), isto se reflete através de duas tendências básicas que são quase ortogonais entre si, conforme pode ser observado no ábaco de Douglas & Olsen (1981) (Figura 3.47) e também no de Robertson et al. (1986) (Figura 3.49). O tipo de solo muda em uma direção e a condição em campo do solo (OCR, sensibilidade) muda em outra. Desta forma todos os ábacos são similares no sentido de que os solos arenosos geralmente

apresentam alta resistência de ponta e baixo atrito lateral e os solos argilosos geralmente tem baixa resistência de ponta e elevado atrito lateral. (Campanella et al., 1998).

Zhang & Tumay (1996) modificaram os ábacos tradicionais de forma a refletir matematicamente o aspecto discutido acima, derivando dois índices que representam os dois fatores básicos que interferem nos registros de  $q_c$  e  $f_s$ : tipos de solo e condições em campo. As transformações matemáticas representam a aplicação de um sistema de coordenada curvilínea empiricamente estabelecido ao longo das duas tendências principais dos ábacos descritos acima. Este sistema é então transformado em um sistema de coordenadas cartesianas por mapeamento conformal, como mostrado na Figura 4.12.

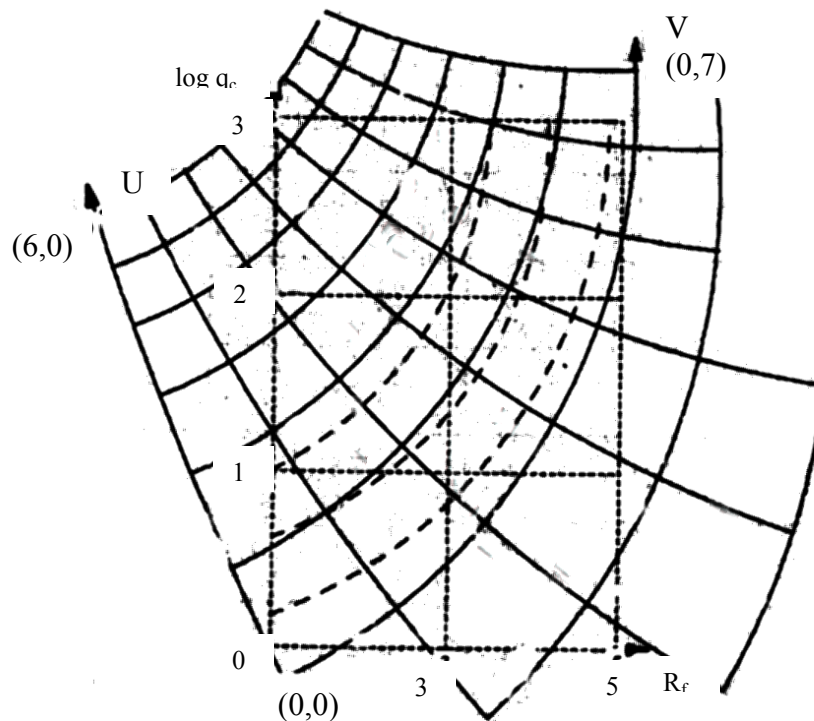


Figura 4.12 – Sistema de coordenadas curvilínea (U, V) superposto a estrutura dos ábacos convencionais com  $q_c$  e  $R_f$ .

São definidos o parâmetro U, que representa os índices de classificação dos solos, e o parâmetro V, que representa o índice de condições em campo. Elevados valores de U representam solos com alta resistência e permeabilidade e baixa compressibilidade, com comportamento mais provável de areia, enquanto que valores baixos de U representam solos com baixa resistência e permeabilidade e alta

compressibilidade. A Figura 4.13 mostra as curvas probabilidade de distribuição das classes de solo da USCS frente ao índice U (Zhang & Tumay, 1996), que possibilita apresentar os resultados segundo critérios da lógica fuzzy. Maiores detalhes sobre a transformação matemática podem ser obtidos em Zhang & Tumay (1996) ou Zhang & Tumay (1999), também responsáveis pelo desenvolvimento e divulgação do software gratuito para obtenção dos parâmetros U e V, e da classificação com resultado probabilístico aqui descrita.

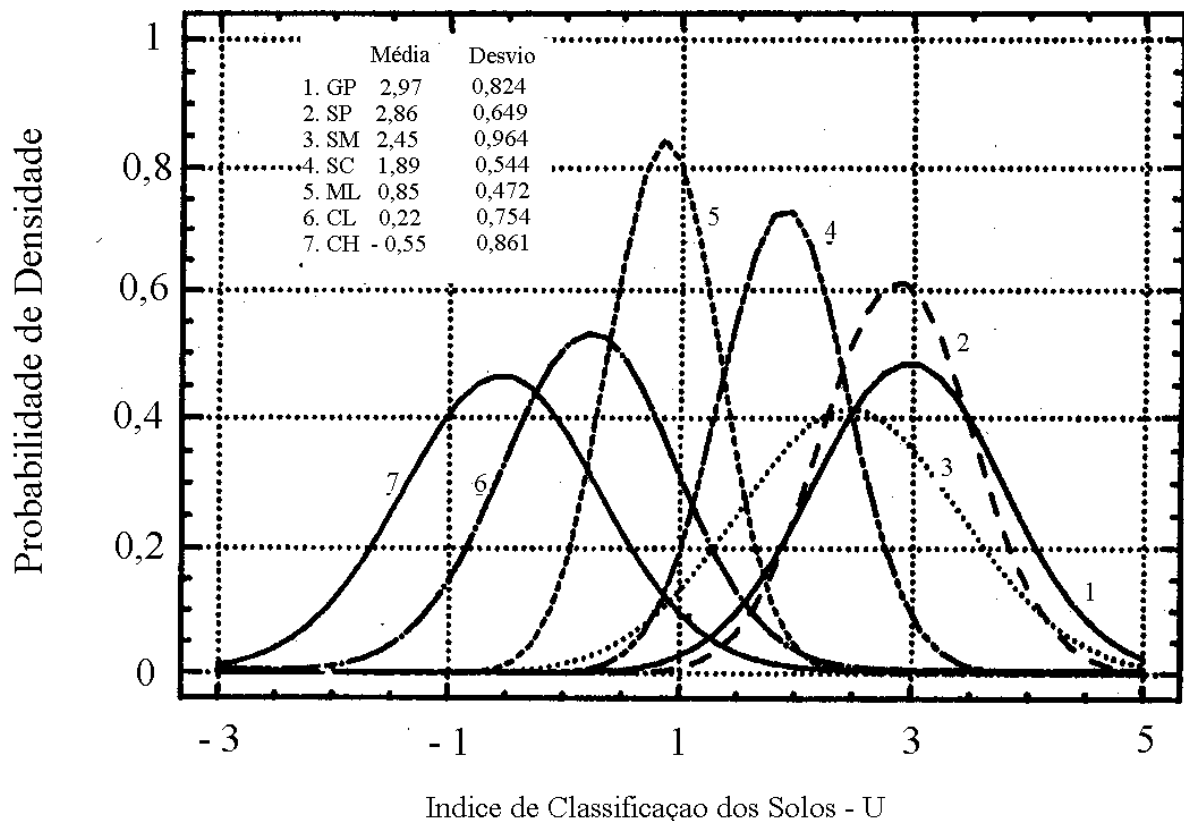


Figura 4.13 Curvas de probabilidade das classes de solo da classificação USCS com referência ao índice de classificação U (Zhang & Tumay, 1996)

O resultado da classificação com base na lógica fuzzy é apresentado através dos gráficos de U e V contra profundidade e do gráfico de probabilidade de ocorrência de tipos de solo, conforme mostrados na Figura 4.16. Em cor amarela é indicada probabilidade de areia, em cinza de silte e em marrom de argila.

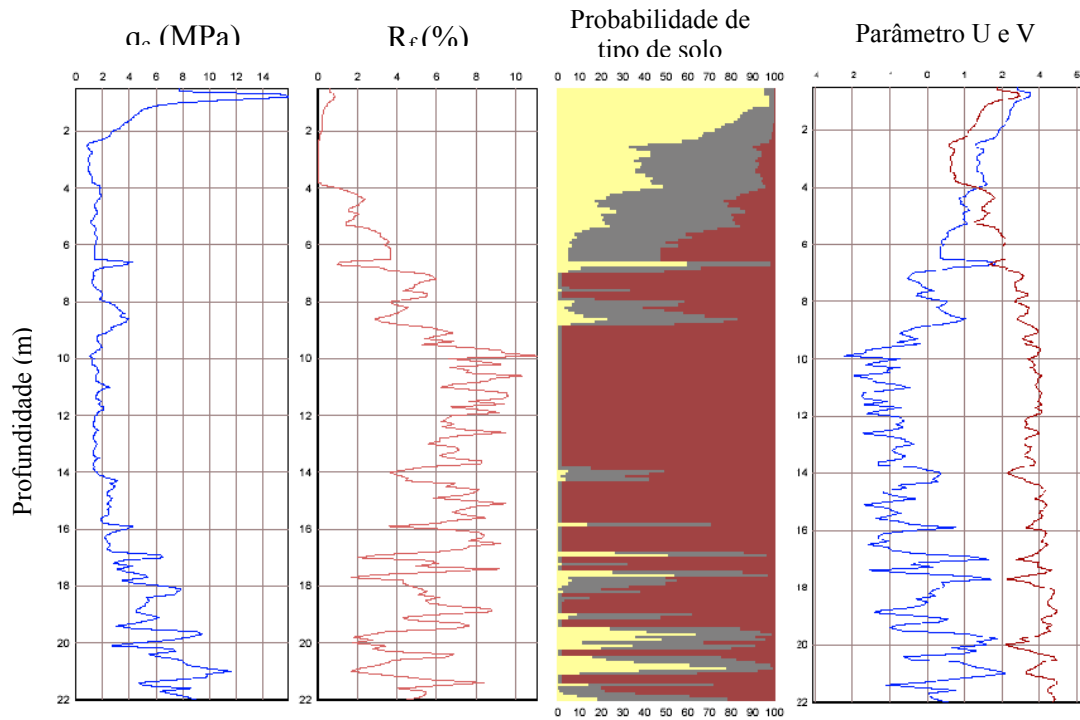


Figura 4.14 – Gráfico dos índices de classificação U e V, aplicados ao resultado de um ensaio de piezocone e interpretados na forma de um gráfico de probabilidade de ocorrência de tipos de solos (Zhang & Tumay, 1999)

A aplicação desta classificação probabilística foi feita utilizando software Pclass-CPT V.3.0, disponibilizado gratuitamente pela Louisiana State University, e desenvolvido com base em Zhang & Tumay (1999). Esse sistema de classificação foi aplicado aos resultados de todos os ensaios de cone elétrico realizados, analisando-os e comparando-os com as demais classificações, em função das variações das condições geológicas.

#### 4.4.4 Correlações entre ensaios e parâmetros

Existem diversos tipos de correlações desenvolvidas a partir dos resultados de ensaios de cone e piezocone. Devido a amplitude do tema e o foco do trabalho nos aspectos ligados à estratigrafia e à identificação dos solos, não foi estabelecido como objetivo deste trabalho uma análise detalhada das diversas correlações existentes. As correlações de diferentes ensaios são aqui abordadas com objetivo de ressaltar as diferenças em função da variabilidade natural dos solos e do tipo de correlação utilizada. Serão abordadas apenas relações  $q_c/N_{SPT}$  dos ensaios de cone e piezocone ( $q_c$ ) e das sondagens

de simples reconhecimento ( $N_{SPT}$ ), e as relações  $G_0/q_c$  determinadas nos ensaios sísmicos de “*cross-hole*” e de “*down-hole*” de piezocone sísmico. Estas correlações foram obtidas para resultados de ensaios que solicitam diferentes volumes de solo e, por consequência, diferentes escalas de variabilidade do maciço de solo, aspecto que será destacado neste trabalho.

#### 4.4.4.1 – Relação $q_c/N_{SPT}$

Nos sítios onde estão disponíveis sondagens de simples reconhecimento com ensaios SPT e ensaios de piezocone contíguos, foram testados diferentes critérios para estabelecer esta relação.

Em primeira instância foram estabelecidos três critérios de seleção dos valores de  $q_c$  e  $N_{SPT}$ , a saber:

- média de  $q_c$  no intervalo de 1 m equivalente à profundidade do ensaio SPT, a cada ensaio SPT realizado;
- média de  $q_c$  no intervalo de 0,3 m equivalente à profundidade de medição do valor de  $N_{SPT}$  (x,15 a x,45 m);
- média de  $q_c$  e  $N_{SPT}$  no intervalo das camadas definidas na interpretação de cada sítio.

Em segunda etapa foram selecionadas duas correlações entre os resultados de  $q_c$  e de  $N_{SPT}$ , conforme proposto Robertson et al. (1983) e Jefferies & Davies (1993). Estas propostas, apesar de criticadas por diversos pesquisadores, têm o objetivo de facilitar a utilização dos resultados dos ensaios de piezocone, com base na longa experiência desenvolvida para a sondagem de simples reconhecimento com ensaio SPT. Deve-se lembrar que estas correlações foram desenvolvidas a partir de bases de dados diversas, distintas daqueles resultados utilizados nessa pesquisa.

Os resultados destas abordagens são apresentados em gráficos onde tem-se  $q_c/N_{SPT}$  versus profundidade para cada um dos sítios investigados. Na discussão dos resultados serão avaliadas as diferentes respostas para as diversas condições geológicas estudadas.

#### 4.4.4.2 Relação $G_0/q_c$

A relação  $G_0/q_c$  tem sido considerada como indicativa da presença de cimentação, comparando o módulo de rigidez a baixa amplitude de deformação com um parâmetro de resistência, conforme relata Schnaid (2005). Desta forma, nos sítios com solos tropicais, onde estão disponíveis resultados de ensaios de “*cross-hole*” e de piezocone sísmico, foram avaliados diferentes critérios para aplicação desta relação.

Em uma primeira abordagem serão comparados resultados de ensaios de “*cross-hole*” ( $G_0$ ) com resultados de  $q_c$  obtidos em ensaios de piezocone próximos. Nesta situação são variados os critérios de obtenção de  $q_c$ , com objetivo de avaliar os efeitos da variabilidade natural na relação, conforme descrito a seguir:

- média de  $q_c$  em uma faixa de 0,25 m acima e 0,25 m abaixo da profundidade de execução do ensaios de “*cross-hole*”,
- média de  $q_c$  em uma faixa de 0,50 m acima e 0,50 m abaixo da profundidade de execução do ensaios de “*cross-hole*”,
- média de  $q_c$  na camada equivalente ao ensaio de “*cross-hole*”, definida com base nos ensaios de piezocone.

Em uma segunda abordagem a relação  $G_0/q_c$  é avaliada com base nos resultados dos ensaios de piezocone sísmico, onde teoricamente os efeitos da variabilidade natural são minimizados. Nestes os valores de  $q_c$  foram obtidos a partir da média de 1 metro acima da posição do geofone na cota de execução do ensaio sísmico.



## 5 RESULTADOS

### **5.1 Considerações gerais**

Neste capítulo são apresentados os resultados e as interpretações aplicados aos ensaios realizados em cada um dos sítios estudados. Os estudos foram realizados em cinco sítios com predominância de solos sedimentares e quatro sítios com predominância de solos tropicais. Os sítios foram agrupados em três classes que englobam sítios com sedimentos terciários de bacias tafrogênicas, sítios com sedimentos quaternários de planícies costeiras, e os sítios com solos tropicais. A descrição de cada sítio foi feita aplicando os procedimentos descritos em Materiais e Métodos e interpretando-os com base na história e características geológicas. Existem diferenças sensíveis entre os vários sítios, em função do tipo de abordagem e da disponibilidade de resultados de ensaios.

### **5.2 Sítios com sedimentos cenozóicos de bacias tafrogênicas**

#### **5.2.1 Sítio Curitiba**

##### **5.2.1.1 Considerações gerais**

O local estudado é o pátio da empresa que financiou grande parte dos ensaios de piezocone, situado no bairro Vila Hauer, em Curitiba (PR). Foram realizados seis ensaios de piezocone, sendo três com graxa, três com glicerina e um com medida da resistividade elétrica, uma sondagem de simples reconhecimento com medida de SPT, ensaios de caracterização do solo e cerca de quinze ensaios de dissipação da poro-pressão, onde foram comparados resultados utilizando o recurso do filtro de cavidade preenchido por graxa automotiva e a saturação convencional com glicerina. Tem-se ainda disponível nesse local um ensaio CPT mecânico tipo Begemann, um ensaio CPT mecânico tipo Delph e um ensaio DPSH, que não serão abordados

neste trabalho. A Figura 5.1 mostra a localização da área e dos ensaios utilizados nesta investigação.

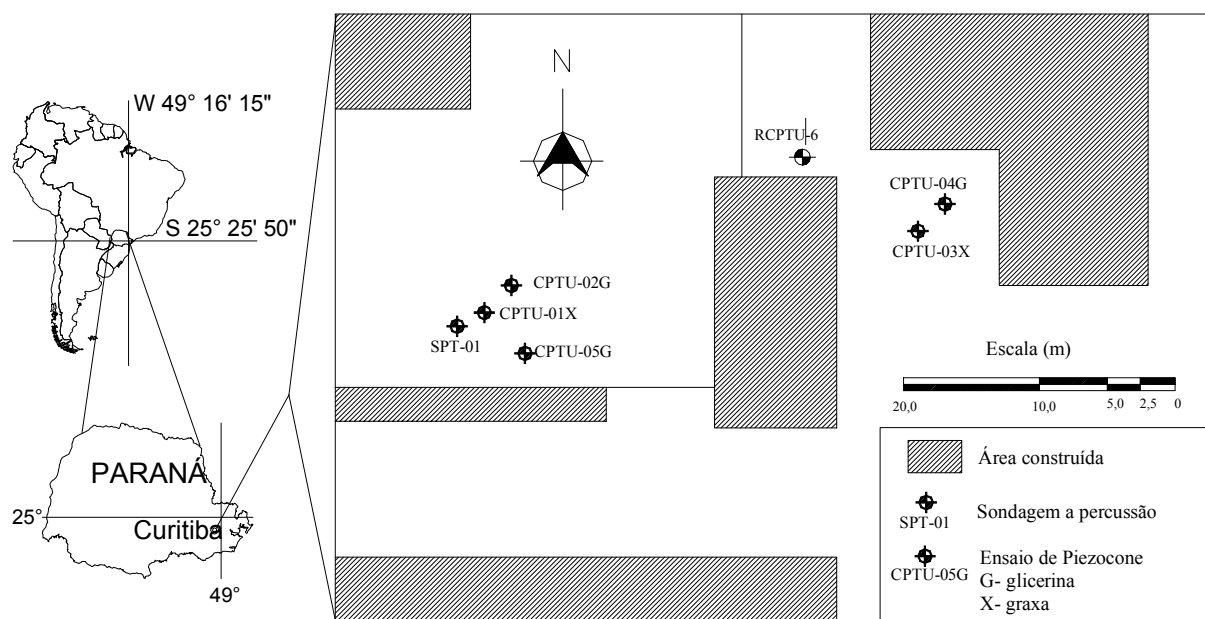


Figura 5.1 – Localização dos ensaios no Sítio Curitiba, no Bairro Hauer, em Curitiba-PR.

### 5.2.1.2 Caracterização geológica

A região está posicionada sobre sedimentos terciários da Formação Guabirotuba (Bigarella e Salamuni, 1969), com localidade-tipo próxima ao sítio de pesquisa. Abrangem sedimentos depositados em bacia tafrogênica com alinhamento regional N-NW, em climas áridos a semi-áridos, geneticamente semelhantes aos depósitos da Formação São Paulo, na cidade homônima. Os sedimentos são de constituição argilo-siltosa, com arenitos arcoseanos e cascalhos com poucos metros de espessura, principalmente nas bordas e na base da bacia. O perfil de solo, na posição dos ensaios aqui apresentados, é constituído por 4 a 6 m de colúvio argiloso, que recobre os sedimentos da Formação Guabirotuba. Esses solos são expansivos e com pré-adensamento provocado por erosão de sedimentos e por ressecção devida à exposição ao sol. A porção do solo abaixo do colúvio representa um solo residual da alteração dos argilitos e siltitos, que apresentam avançada diagênese, localmente com cimentação carbonática.

O adequado entendimento da distribuição espacial dos tipos de solos só é possível a partir da interpretação do contexto e história geológica. Nesta região da cidade de Curitiba, a distribuição dos solos está intimamente ligada à Bacia Sedimentar de Curitiba, quando foram depositados sedimentos da Formação Guabirotuba, sobre um embasamento pré-cambriano de rochas cristalinas. Principalmente, durante o Quaternário, ocorreram processos de morfogênese, sob influência de atividades neo-tectônicas e mudanças paleoclimáticas. A formação dos

depósitos das várzeas está ligada às mudanças do regime fluvial, já em condições de clima úmido, por reativação da falha N-S e basculamento dos blocos para E-SE. Este basculamento é evidenciado pelo desenvolvimento de um padrão de drenagem característico nas vertentes de cada bloco estrutural, pela ocorrência de gnaisses em cotas elevadas a leste da falha, e pela posição e distribuição das rampas de colúvio.

Para adequada interpretação dos ensaios é necessária a integração dos conhecimentos da geologia, pedologia, geomorfologia, engenharia, entre outros. Uma forma eficiente de integrar estas informações é utilizando carta geotécnica de semi-detalhe (1:10.000 ou 1:25.000). Nestas escalas é possível identificar os tipos de perfis geotécnicos associados a cada unidade de mapeamento, de forma a orientar a execução e interpretação dos ensaios de campo. Desta forma, a região do entorno do Sítio Hauer foi mapeada com objetivo de produzir uma carta geotécnica, mostrando a classificação tátil e visual dos solos, os tipos de perfis geotécnicos e a provável distribuição em planta das unidades de solo da área, exemplificando um formato de mapa útil para a programação e interpretação dos ensaios de campo. As unidades identificadas através do mapeamento geotécnico, mostrado na Figura 5.2, têm clara correspondência com os resultados de sondagens, evidenciando as relações que existem entre morfologia do terreno e tipos de solo, principalmente em solos tropicais com morfogênese associada. Nestes, a ausência de afloramentos rochosos devido ao espesso manto de intemperismo, favorece a utilização de métodos geomorfológicos nos mapeamentos geológicos e geotécnicos. Os processos de morfogênese registram seus padrões na forma da superfície do terreno que, quando adequadamente interpretadas, fornecem informações sobre a distribuição espacial dos tipos de solos. A distribuição dos principais tipos de solo é indicada na seção geológica interpretada, mostrada na Figura 5.3, gerada a partir de resultados de sondagens, poços profundos e mapeamento geológico, com posição indicada na Figura 5.2.

Na Figura 5.4 são mostrados três perfis estratigráficos característicos das Unidades 1, 2 e 4 e com provável ocorrência em toda extensão das unidades em mapa. Sugere-se que o elemento de conexão entre os dados de mapeamento e os resultados de sondagens e ensaios pontuais sejam feitos de forma semelhante a Figura 5.4. Com isto, as informações provenientes dos mapeamento orientam a interpretação das sondagens e o resultado das sondagens, adequadamente interpretados, permitem o detalhamento dos mapeamentos.

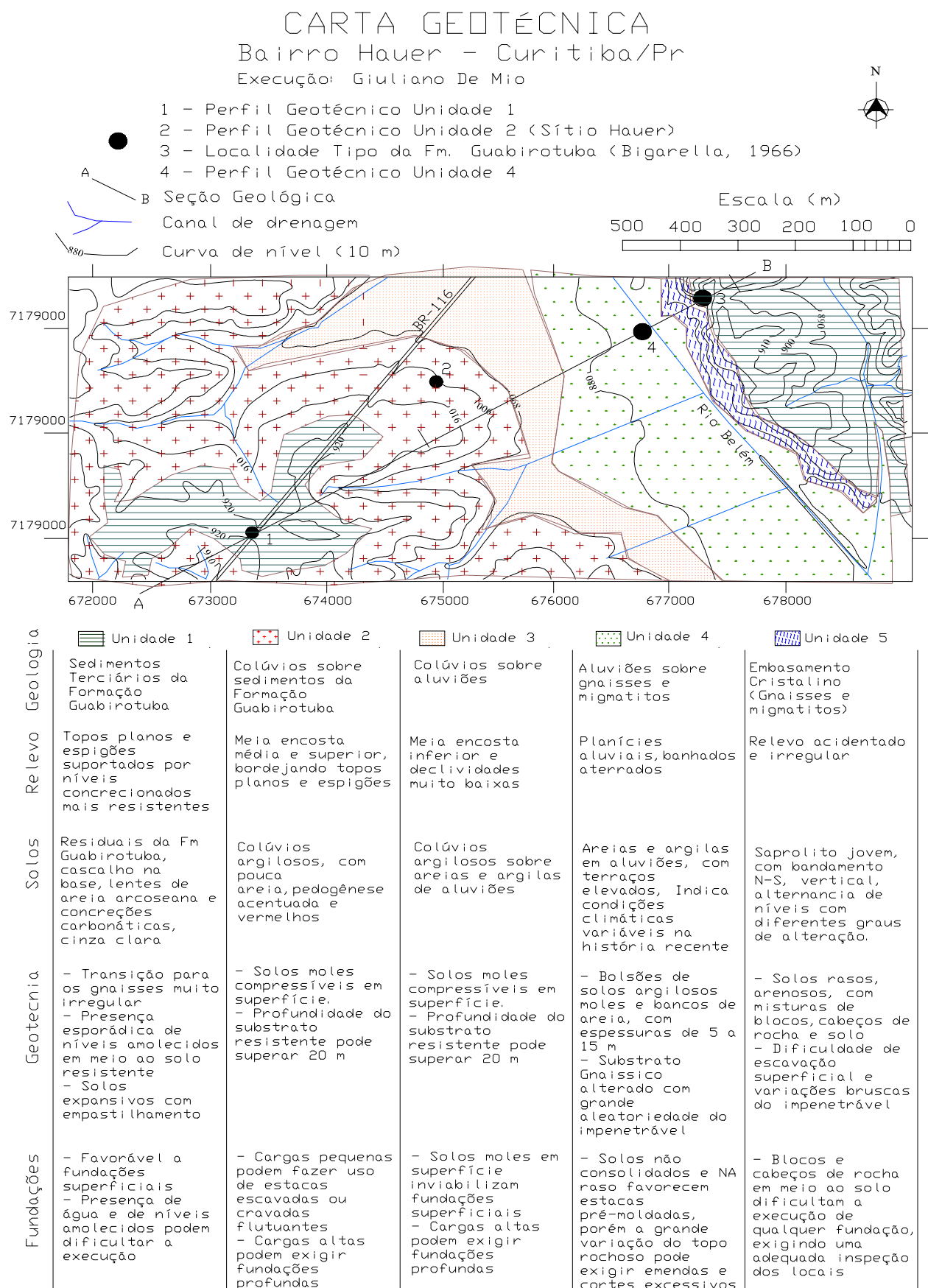


Figura 5.2 – Mapa Geotécnico, indicando as principais unidades do terreno e os perfis geotécnicos típicos.

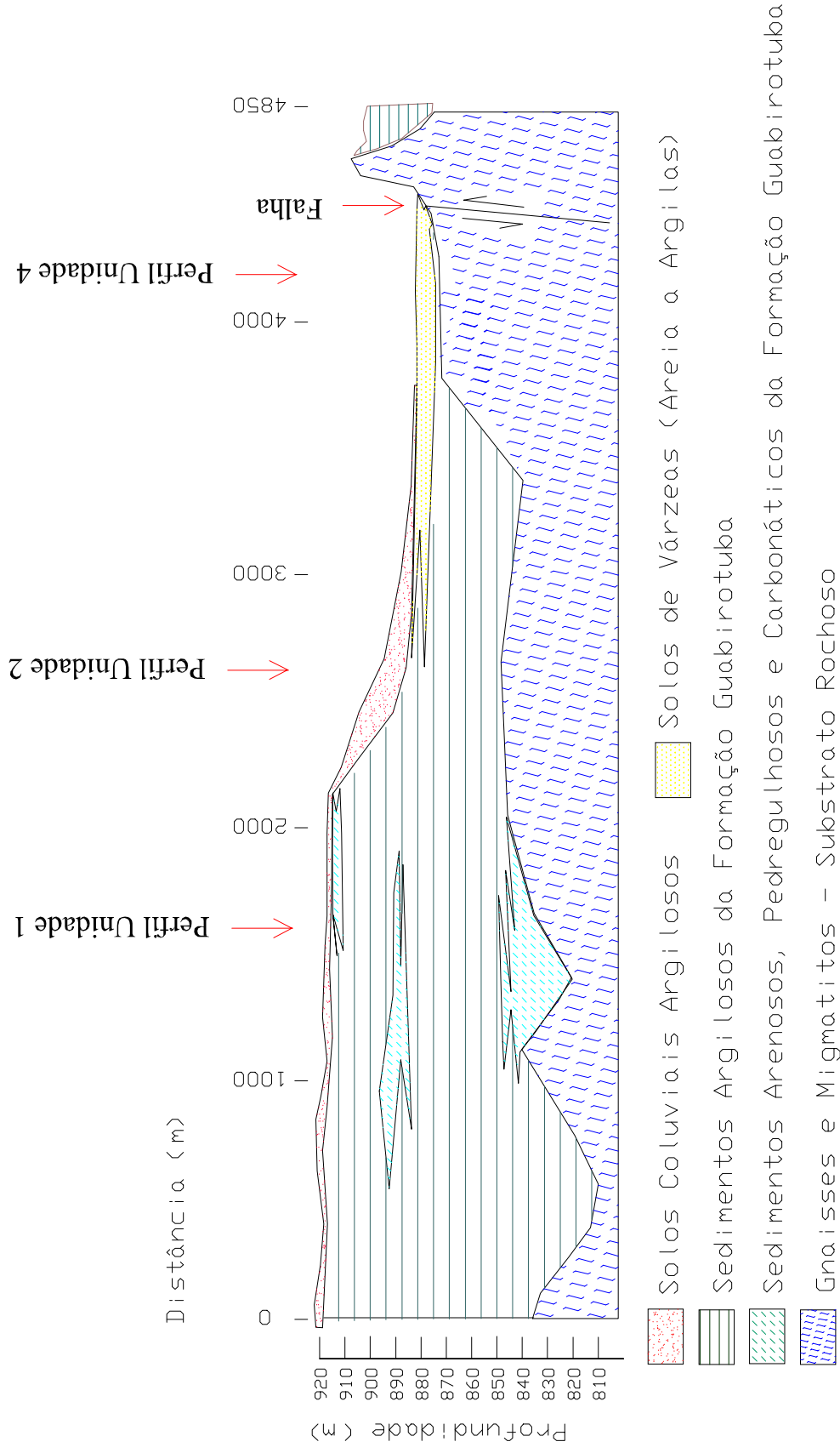


Figura 5.3 – Seção geológica da região do Sítio Curitiba, mostrando as relações estratigráficas entre os principais tipos de solo. São indicadas as posições dos perfis típicos das Unidades 1, 2 e 4, da Figura 5.2.

N - SPT	Transições (m)	Perfil Geotécnico - Unidade 1 Descrição do solo	Denominação	Gênese
22	1.9	Argila silto arenosa variegada	Formação Guabiruba (várias fases de deposição)	Processos de sedimentação e diagênese durante formação dos sedimentos
21	2.6	Argila arenosa variegada		
10	3.9	Areia argilosa, com pedregulho		
24	5.0	Argila silto arenosa, cinza clara		
15		Areia fina a grossa, argilosa, cinza clara		
14	7.5	Argila silto arenosa, variegada (cinza, vermelho, amarelado)		
25				
25	10.0	Argila silto arenosa, variegada (cinza com manchas vermelhas)		
45				
50				
39				
39				
90				
57				
56				
56				
57				
56				
60	20.0	Argila silto arenosa, cinza clara		Muda cor e resistência pelo intemperismo
53				
58				
56				
49				
60				
65				
120	27.3			

N - SPT	Transições (m)	Perfil Geotécnico - Unidade 2 Descrição do solo	Denominação	Gênese
7	0.5	Argila arenosa, com raízes, marrom	Solo vegetal	Pedogênese
2		Argila silto arenosa com pouca areia, média a grossa e pedregulhos, vermelho escuro, muito mole a média		
6	3.5	Argila silto arenosa com pouca areia fina, variegada (roxo, vermelho) mole a média	Solos Coluviais (2 fases de deposição ?)	Rastejo e erosão em rampa de colúvio
8		Argila silto arenosa com pouca areia fina, variegada (roxo, vermelho) mole a média		
5			Formação Guabiruba (várias fases de deposição)	Pedogênese
4				
5	7.8	Areia argilosa, média a grossa, variegada (vermelha e cinza) pouco a medianamente compacta		
10	9.4			
19	10.0	Argila plástica, variegada (cinza e rosa) média		
18				
14		Silte argiloso com pouca areia fina, cinza claro, rijo a duro		
21	13.0			
19		Argila silto arenosa, com areia fina a grossa, cinza, medianamente compacta a compacta		
25	15.8	Silte argiloso com pouca areia fina, cinza claro, duro. Níveis de areia silto arenosa, fina a grossa entre 17 e 17.70m		
23				
22				
31				
40				
50	20.4			Sedimentação e Diagênese

N - SPT	Transições (m)	Perfil Geotécnico - Unidade 4 Descrição do solo	Denominação	Gênese
4	0.9	Areia argilosa marrom escura	Aterro	Lançamento
2		Argila arenosa com manchas cinzas		
6	2.4	Areia média a grossa pouco argilosa, cinza claro	Solos Aluviais (várias fases de deposição)	Sedimentação em ambiente de rio meandrante
9	4.3	Argila silto arenosa, com areia, preta e restos vegetais		
6				
9	6.1	Areia grossa e média argilosa, cinza clara, com pedregulhos		
10			Embasamento cristalino (Gnaisses - bandamento vertical)	Intemperismo ressaltando estruturas e diferenças composicionais da rocha
8				
12				
13				
20		Silte arenoso, esverdeado, com mica disseminada. Fragmentos de rocha.		
21		Bandamento vertical N-S		
24				
29	14.8	Areia fina a grossa, micácea, com fragmentos de rocha, variegada		
39				
90	16.6			

Figura 5.4 Perfis geotécnicos típicos das Unidades 1, 2 e 4 da Figura 5.2, mostrando o perfil do solo, formação geológica, gênese e resistência a penetração (N<sub>SPT</sub>). Os perfis foram produzidos pela interpretação integrada das informações, com objetivo de possibilitar a conexão entre dados de mapeamento e resultados de ensaios.

### 5.2.1.3 - Identificação do perfil estratigráfico

O contexto macro geológico abordado anteriormente fornece os parâmetros iniciais para a compartimentação das sondagens e dos resultados dos ensaios de piezocone. A Figura 5.5 mostra uma comparação entre diferentes métodos para obter a profundidade das transições entre camadas a partir do resultado de ensaios de piezocone e de sondagens de simples reconhecimento. Observa-se que existe uma concordância geral, porém diferentes níveis de detalhamento e de precisão na identificação dos contatos. A seleção da compartimentação do perfil geotécnico pode ser feita utilizando todos estes recursos, porém com critérios de engenharia para selecionar o número de camadas, em função da variabilidade do solo e do detalhe exigido em cada projeto.

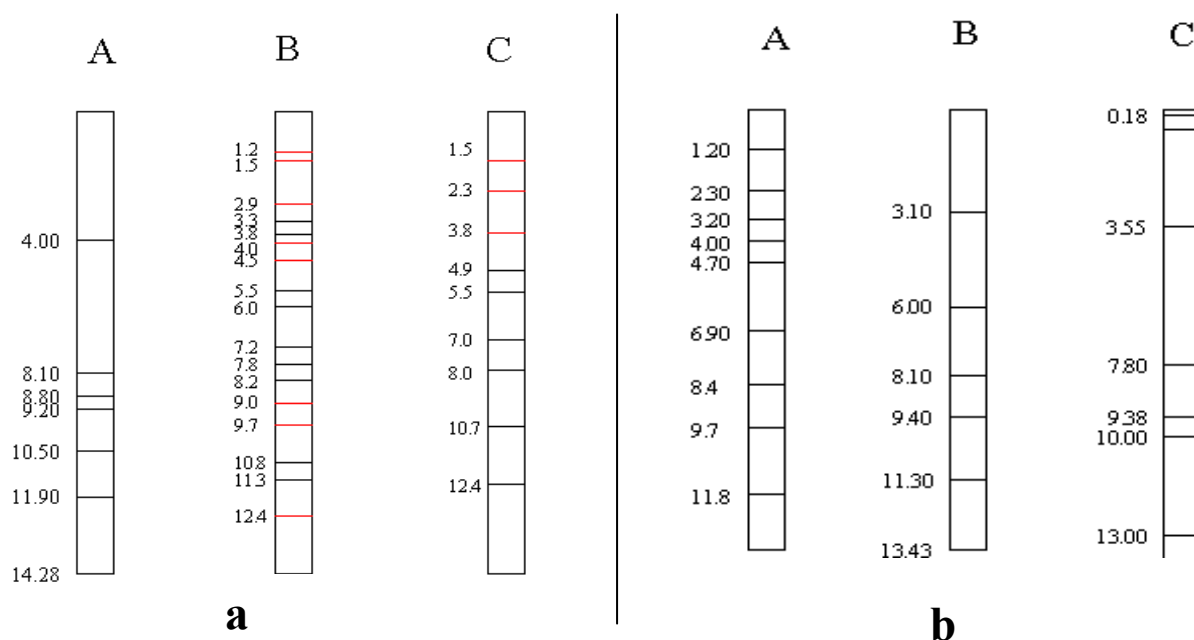


Figura 5.5 **(a)** Comparação entre diferentes métodos para obter a profundidade das transições entre camadas a partir do resultado de ensaio de piezocone (CPTU-05G). A – inspeção visual dos resultados, B – teste estatístico D<sup>2</sup> com janela de 1 m, C - teste estatístico D<sup>2</sup> com janela de 2 m. **(b)** Comparação entre diferentes métodos para obter a profundidade das transições entre camadas a partir do resultado de ensaio de piezocone (CPTU-01X) e sondagem a percussão (SPT-01): A – teste estatístico D<sup>2</sup> com janela de 2 m, B – Inspeção visual CPTU, C – Sondagem de simples reconhecimento.

As classificações dos solos que ocorrem no perfil, segundo métodos distintos, são apresentadas na Figura 5.6, onde se tem o resultado de ensaios de laboratório, descrição tátil visual das amostras de sondagens de simples reconhecimento, os ábacos de classificação (Robertson et al., 1986) e a classificação com base na lógica fuzzy apresentada de forma probabilística, com base nos resultados de ensaios de piezocone.

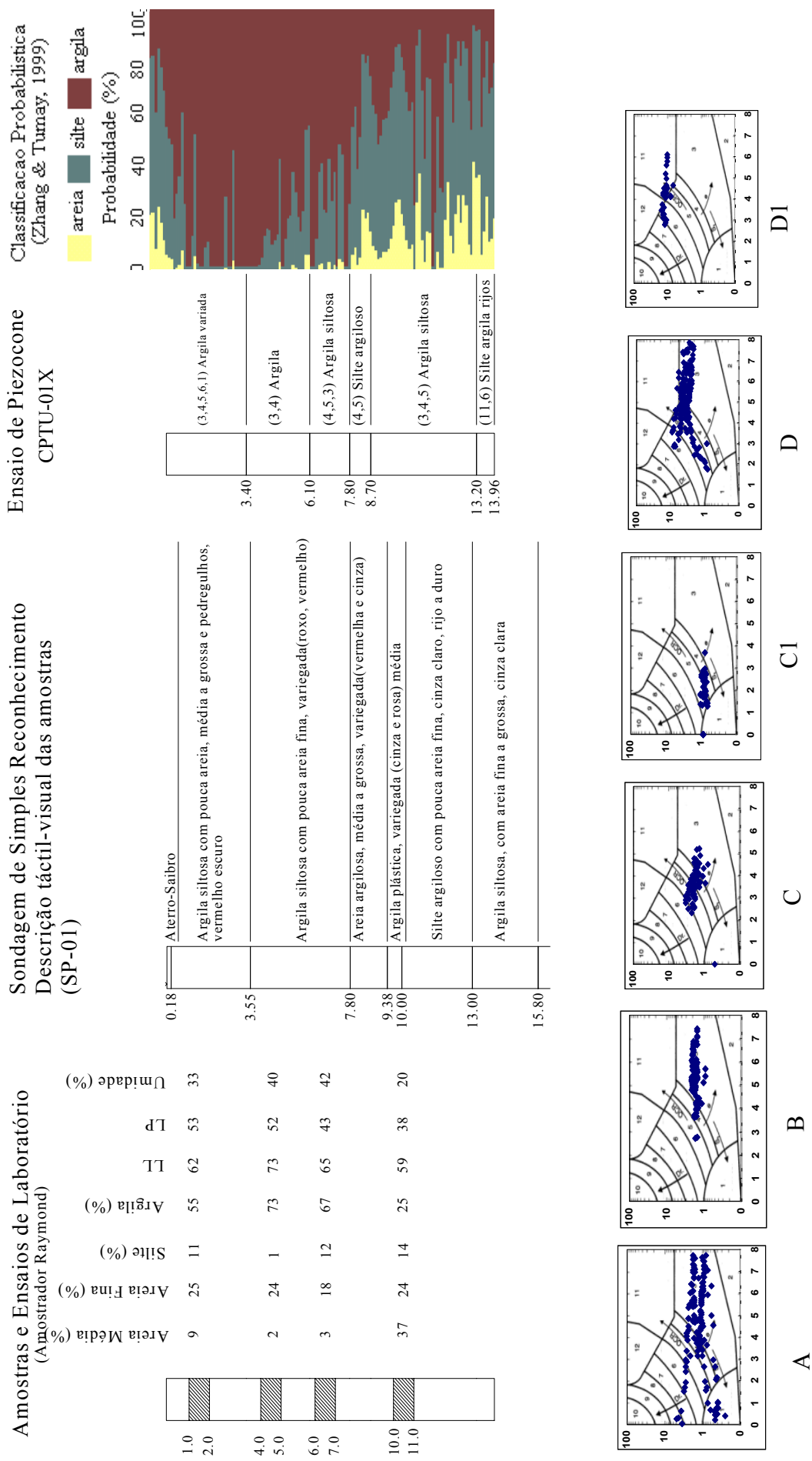


Figura 5.6 - Comparação entre resultados de métodos distintos de classificação do solo: ensaios de laboratório, sondagens de simples reconhecimento e ensaios de piezocone. Sítio Curitiba



Estes critérios de classificação foram aplicados a todos os ensaios da área, sendo identificada uma razoável homogeneidade na distribuição dos estratos de solo, de acordo com as interpretações geológicas regionais.

Nos ensaios de piezocone, a identificação dos tipos de solo foi feita empregando ábacos classificatórios indiretos, utilizando as relações entre  $q_c$  e  $R_f$  para estimar o tipo de solo. Desta forma, o trabalho com ábacos permite avaliar a homogeneidade da distribuição dos resultados dos ensaios de piezocone ao longo da área investigada. Na Figura 5.7 é mostrada a representação, no ábaco de classificação de Robertson et al. (1986), dos resultados de ensaios de piezocone em uma camada específica, comparando todos os ensaios executados e um único ensaio. A distribuição dos pontos no ábaco indica que são mantidas as mesmas tendências de distribuição para toda a área, considerando uma mesma camada. Com isto, mostra-se que o critério de subdivisão em camadas é coerente para estas condições de solo, e que a extrapolação de camadas para toda a área investigada é válida.

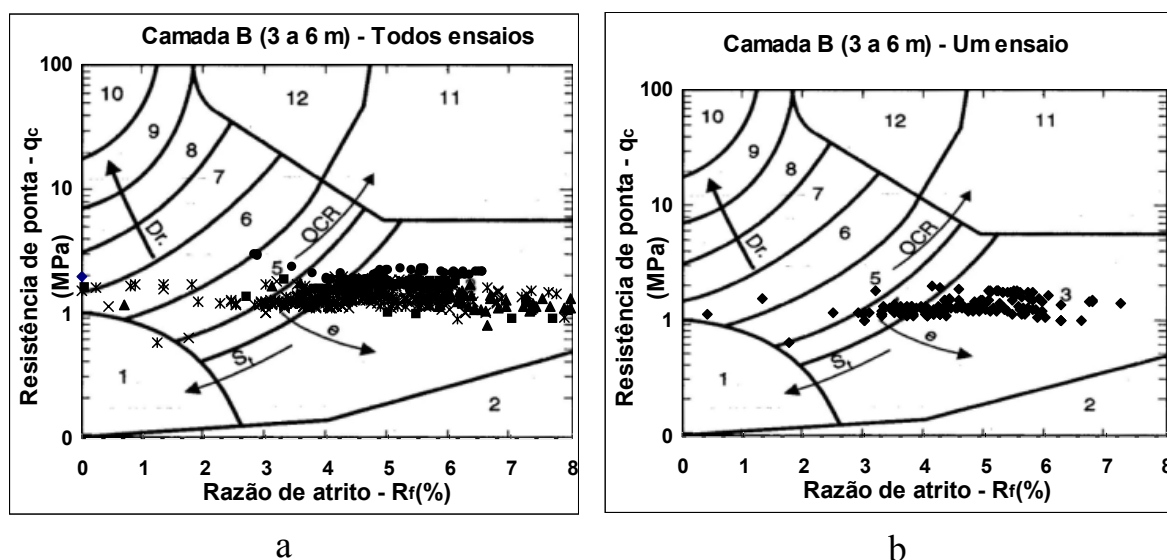


Figura 5.7 – Representação, no ábaco de classificação de Robertson et al (1986) dos resultados de ensaios de piezocone em uma camada específica. (a) para todos os ensaios executados, (b) para um único ensaio.

Nas situações em que a variação lateral é grande e o padrão de distribuição dos pontos varia muito ao longo da área, o critério de extrapolação lateral utilizando camadas pode não ser válido.

#### 5.2.1.4 Análise estatística

Com objetivo de avaliar a variabilidade lateral ao longo da área investigada os valores de  $q_c$  foram tratados em análise estatística aplicada a todos os ensaios, compartimentando-os

em camadas denominadas A, B, C e D. A Tabela 5.1 mostra o resultados destes testes estatísticos, agrupados por camadas, com indicação das médias de cada parâmetros para todas as camadas ao longo da área.

Tabela 5.1 Resultado da aplicação de testes estatísticos aos valores de  $q_c$  para as camadas definidas no Sítio Curitiba

Valores de $q_c$ (MPa)											
Camada	Media das medidas		Desvio padrão médio		COV		Escala de flutuação (cm)		Camada		
									Topo	Base	Ensaio
A	1.05		0.43		0.41		7.8		0	3.1	CPTU-01X
	1.37		0.38		0.28		27.27		0	3.6	CPTU-05G
	1.37	<b>1.26</b>	0.78	<b>0.53</b>	0.57	<b>0.42</b>	19.44	<b>18.17</b>	0	3.4	CPTU-6
A1	0.67		0.1		0.15		11.2		0	1.1	CPTU-03X
A2	0.97		0.31		0.32		21.73		1.1	2.7	CPTU-03X
A3	0.83	<b>0.82</b>	0.16	<b>0.19</b>	0.19	<b>0.22</b>	5.03	<b>12.65</b>	2.7	3.8	CPTU-03X
B	1.46		0.22		0.15		31.77		3.1	6	CPTU-01X
	1.06		0.77		0.25		10.97		3.4	5.8	CPTU-02G
	1.19		0.23		0.19		44.55		3.8	8.2	CPTU-03X
	1.8		0.3		0.17		24.55		3.6	5.8	CPTU-05G
	1.47		0.24		0.16		27.41		3.4	6.1	CPTU-6
	1.15	<b>1.36</b>	0.21	<b>0.33</b>	0.18	<b>0.18</b>	59.95	<b>33.20</b>	4	8.1	CPTU-04G
C	1.56		0.27		0.17		11.32		6	8.1	CPTU-01X
	2.98		0.5		0.17		33.51		5.8	7.9	CPTU-02G
	2.67		0.82		0.31		16.98		8.2	10.9	CPTU-03X
	1.62		0.35		0.22		8.83		5.8	8.6	CPTU-05G
	1.9		0.64		0.33		16.11		6.1	7.8	CPTU-6
	2.44	<b>2.20</b>	1	<b>0.60</b>	0.41	<b>0.27</b>	8.6	<b>15.89</b>	8.1	10.5	CPTU-04G
C1	1.18		0.15		0.13		16.47		8.1	9.4	CPTU-01X
	4.67		1.39		0.3		20.22		7.9	8.8	CPTU-02G
	0.74	<b>2.20</b>	0.11	<b>0.55</b>	0.15	<b>0.19</b>	6.32	<b>14.34</b>	7.8	8.7	CPTU-6
D	3.19		0.86		0.27		24.21		9.4	11.3	CPTU-01X
	4.4		0.66		0.15		16.03		10.9	12	CPTU-03X
	3.75		0.78		0.21		16.3		10.5	11.9	CPTU-04G
	3.39		0.74		0.22		31.44		8.6	11.2	CPTU-05G
	3.19	<b>3.58</b>	1.29	<b>0.87</b>	0.4	<b>0.25</b>	20.59	<b>21.71</b>	8.7	13.2	CPTU-6
D1	5.83		1.77		0.3		21.3		11.3	13.43	CPTU-01X
	6.21		4.82		0.78		13.32		12	14.1	CPTU-03X
	6.1		1.69		0.28		11.69		11.2	12.03	CPTU-05G
	10.87		1.91		0.18		5.86		13.2	13.96	CPTU-6
	2.16	<b>6.23</b>	0.72	<b>2.18</b>	0.33	<b>0.37</b>	25.19	<b>15.47</b>	11.9	14.28	CPTU-04

Estas informações podem auxiliar na análise da variabilidade do sítio, seja em profundidade ou nas extensões laterais na área investigada. Aspecto importante é que os dados estão agrupados por camadas, e estas tem suas profundidades variáveis em cada ponto de ensaio, sendo portanto, uma análise mais fiel do que aquelas que simplesmente comparam os resultados sem compartimentar o maciço de solo em camadas ou unidades homogêneas.

Na Figura 5.8 é mostrado um gráfico indicando a variação do valor médio de  $q_c$  em cada ensaio de piezocone e para cada camada previamente definida. As profundidades indicadas são aproximadas, pois variam para cada posição de ensaio. É também indicado o valor da média dos desvios padrões de  $q_c$  em cada camada. Nas camadas mais superficiais os

valores de  $q_c$  não variam sensivelmente ao longo das camadas, mostrando que existe razoável homogeneidade. Já na camada mais profunda, entre 12 e 14 m., ocorre variação sensível no valor de  $q_c$ , indicando variações na profundidade do impenetrável ao piezocone.

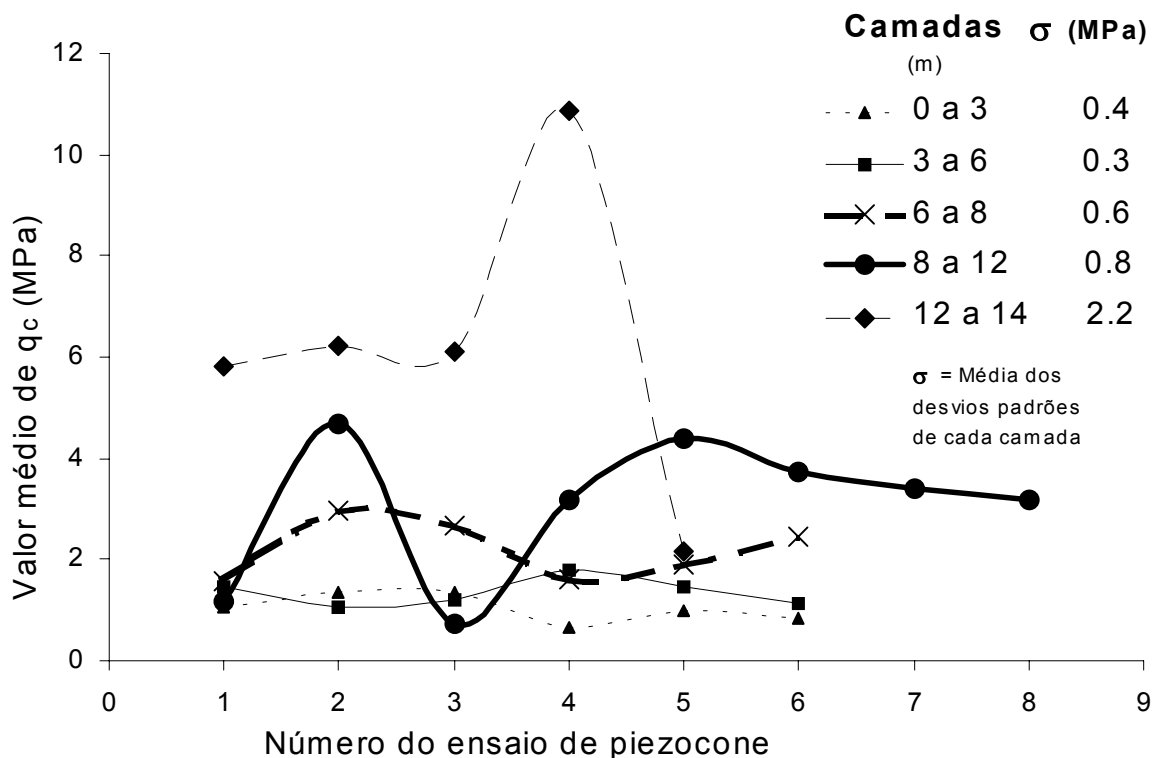


Figura 5.8 – Representação da variação dos valores médios de  $q_c$  em função do número de ensaios de piezocone realizados, para cada uma das camadas previamente definidas.

### 5.2.1.5 Correlações entre parâmetros

Neste sítio são avaliadas as relações  $q_c/N_{SPT}$ , medidas nos ensaios de piezocone e nas sondagens de simples reconhecimento realizadas na área, utilizando os três critérios descritos no capítulo 4, Materiais e Métodos. Estes também foram comparados com as previsões obtidas a partir das propostas de correlação de Robertson et al. (1983) e Jefferies & Davies (1993). A Figura 5.9 mostra o resultado da aplicação dos diferentes critérios para definir a relação  $q_c/N_{SPT}$  entre ensaios SPT e CPTU contíguos. Neste caso, os resultados mostram que não ocorrem variações sensíveis na relação  $q_c/N_{SPT}$ , mesmo com a variação de critérios de seleção de  $q_c$  e  $N_{SPT}$ . No entanto, o emprego da proposta de Robertson et al (1986) para estimativa do  $N_{SPT}$  a partir de  $q_c$ , levam a valores de  $N_{SPT}$  mais baixos daqueles medidos nos ensaios, principalmente para profundidades menores que 8 m, enquanto a proposta de

Jefferies & Davies (1993) fornece valores sistematicamente maiores que aqueles medidos em campo, principalmente para profundidades superiores a 8 m.

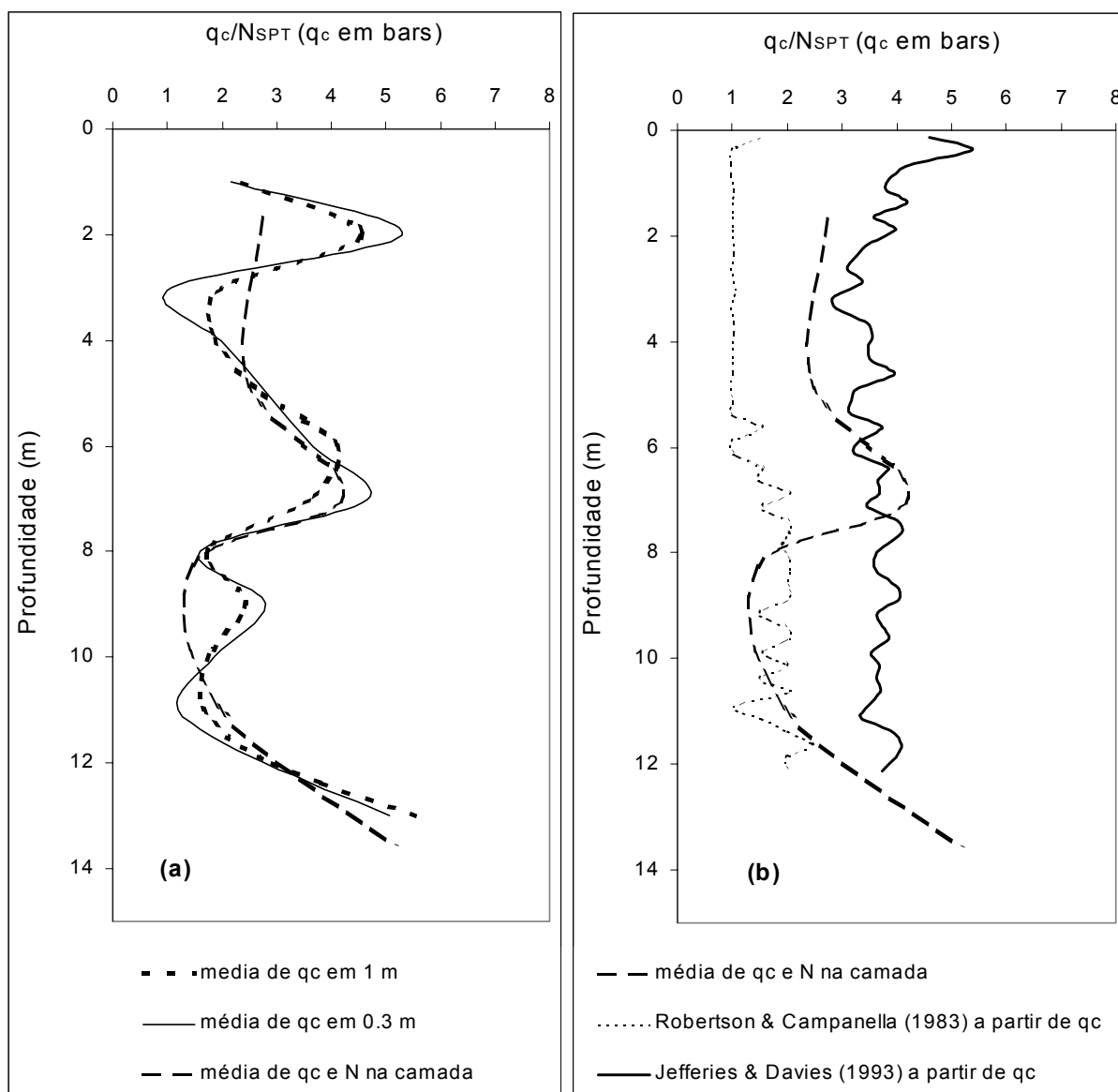


Figura 5.9 – Relação  $q_c/N_{SPT}$  versus profundidade. (a) variação dos critérios de seleção de  $q_c$  e  $N_{SPT}$  obtidos de ensaios de piezocone e de sondagens de simples reconhecimento contíguos, (b) previsões a partir do registro de  $q_c$  das propostas de Robertson et al. (1986) e Jefferies & Davies (1993). Sítio Curitiba – CPTU-01X.

A pequena variação na relação  $q_c/N_{SPT}$  com a variação do critério de seleção de  $q_c$  e  $N_{SPT}$  (Figura 5.9.a) é indicativa de uma variabilidade baixa do terreno, onde os contatos entre camadas são pouco marcados e as diferenças nos registros de  $q_c$  ao longo do perfil não são intensas. Já, a proposta de Robertson et al. (1983), aplicada aos registros de  $q_c$ , fornece valores diferentes daqueles obtidos a partir dos ensaios CPTU e SPT, enquanto a proposta de Jefferies & Davies (1993) fornece valores semelhantes aos obtidos dos ensaios CPTU e SPT, somente nas profundidades entre 8 e 12 m (Figura 5.9.b). As propostas de Robertson et al.

(1986) e Jeffereis & Davies (1993), aplicadas aos mesmos registros de  $q_c$ , fornecem resultados distintos, provavelmente devido a diferentes bases de dados que foram utilizadas para definir cada uma das propostas.

### 5.2.1.6 Ensaio com piezocone de resistividade e com uso do filtro de cavidade preenchido com graxa

A Figura 5.10 mostra o resultado de um ensaio de piezocone característico, com registro da resistividade e medição da poro-pressão utilizando o filtro de cavidade preenchido com graxa automotiva. O nível d'água, identificado a partir da sondagem de simples reconhecimento varia de 4 a 5 m, após estabilizado, e não foi possível determiná-lo diretamente por nenhum dos sensores do piezocone. Os registros de resistividade, a partir dos quais esperava-se poder identificar claramente a posição do nível d'água freático, só tiveram uma redução abrupta abaixo de 8 m de profundidade, enquanto que nas porções mais superficiais os valores variaram de 200 a 800 ohm.m. Esta transição coincide aproximadamente com o limite inferior do sedimento, que mostra evidências de transformações pedogenéticas.

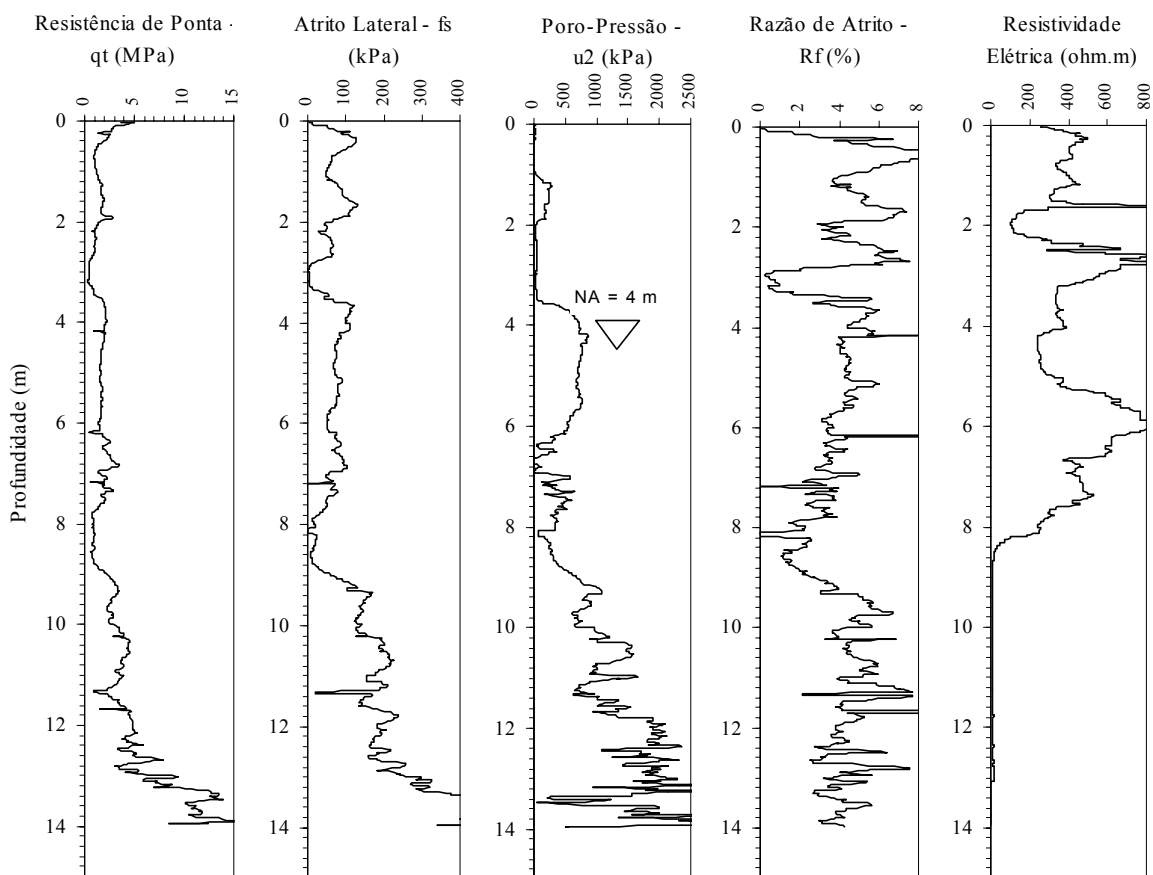


Figura 5.10 – Resultado de ensaio de piezocone de resistividade no sítio Curitiba, com medição da resistividade e utilização do filtro de cavidade preenchido com graxa.

O registro da poro-pressão é contínuo e apresenta resposta considerada adequada abaixo dos 6 m de profundidade. Aspecto interessante é que a posição do nível d'água também não pode ser identificada diretamente pelos registros de poro-pressão. Na Figura 5.11 é apresentada uma comparação entre resultados de ensaios de piezocone adjacentes com destaque para os registros de poro-pressão utilizando graxa e glicerina, este último realizado após pré-furo para atingir o nível d'água. Os registros de  $q_c$  e  $R_f$  mostram que o perfil de solo é semelhante, no entanto, os registros de  $u$  mostram que os picos de poro-pressão são sistematicamente maiores no ensaio com graxa, principalmente nas profundidades maiores do que 10 m.

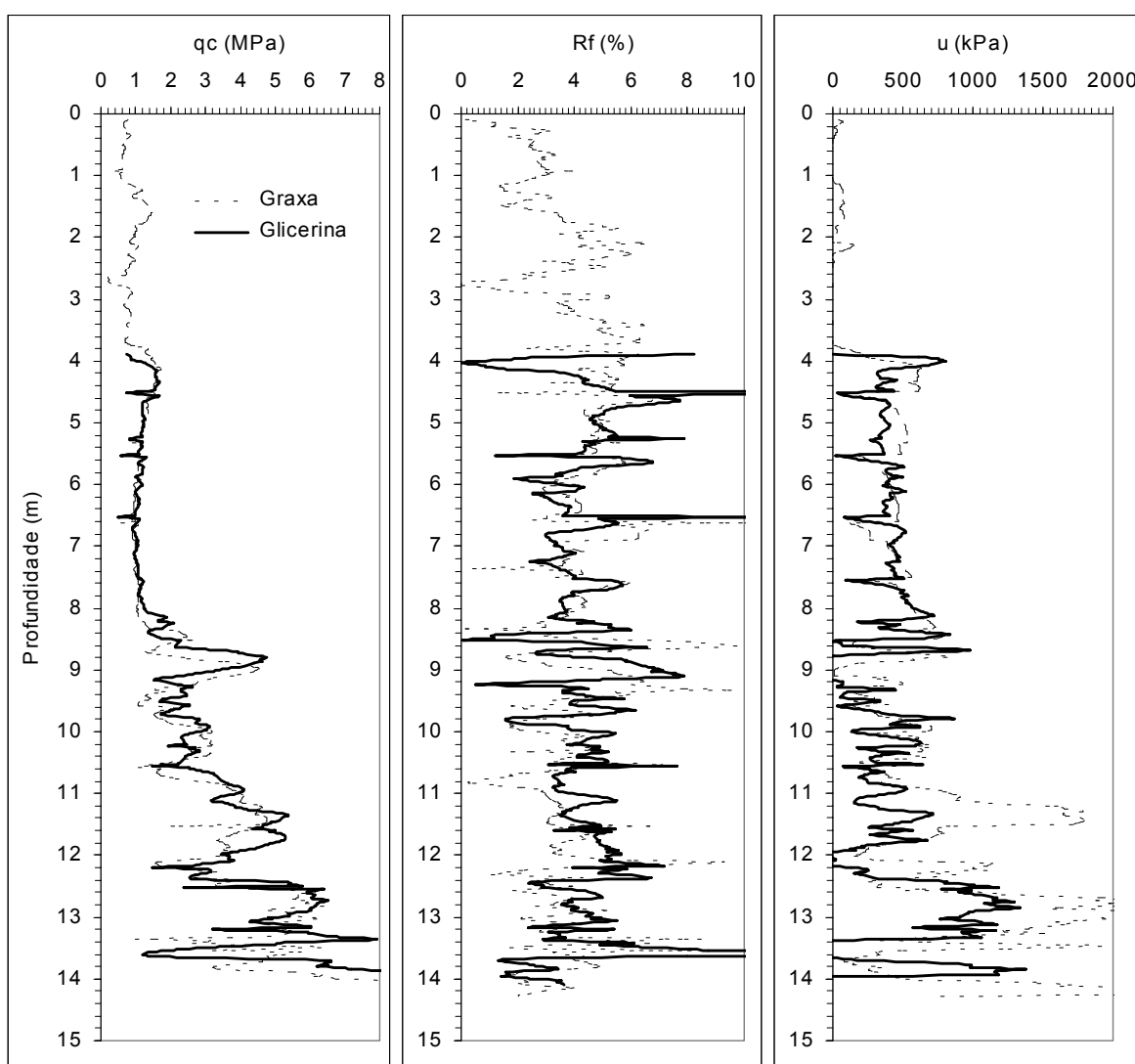


Figura 5.11 - Comparação entre resultados de ensaios de piezocone adjacentes com destaque para os registros de poro-pressão utilizando graxa (CPTU-03X) e glicerina (CPTU-04G).

No intervalo de 4 a 10 m de profundidade (Figura 5.11) as diminuições bruscas nos registros de poro-pressão estão relacionadas às paralisações para realização de ensaios de

dissipação do excesso da poro-pressão. Observa-se que o tempo de retorno da poro-pressão é maior nos ensaios com graxa, provavelmente devido ao fenômeno da histerese e devido a faixa de permeabilidade do solo investigado.

Na Figura 5.12 é mostrada a comparação entre registros de poro-pressão e ensaios de dissipação da poro-pressão, em ensaios de piezocone contíguos, utilizando pedra porosa saturada com glicerina e filtro de cavidade preenchido com graxa automotiva. Os ensaios de dissipação que utilizam glicerina, nos sedimentos pré-adensados aqui estudados, indicam sistematicamente uma elevação da poro-pressão, com posterior início da dissipação. Este comportamento não é identificado em nenhum dos ensaios de dissipação da poro-pressão que utilizam graxa.

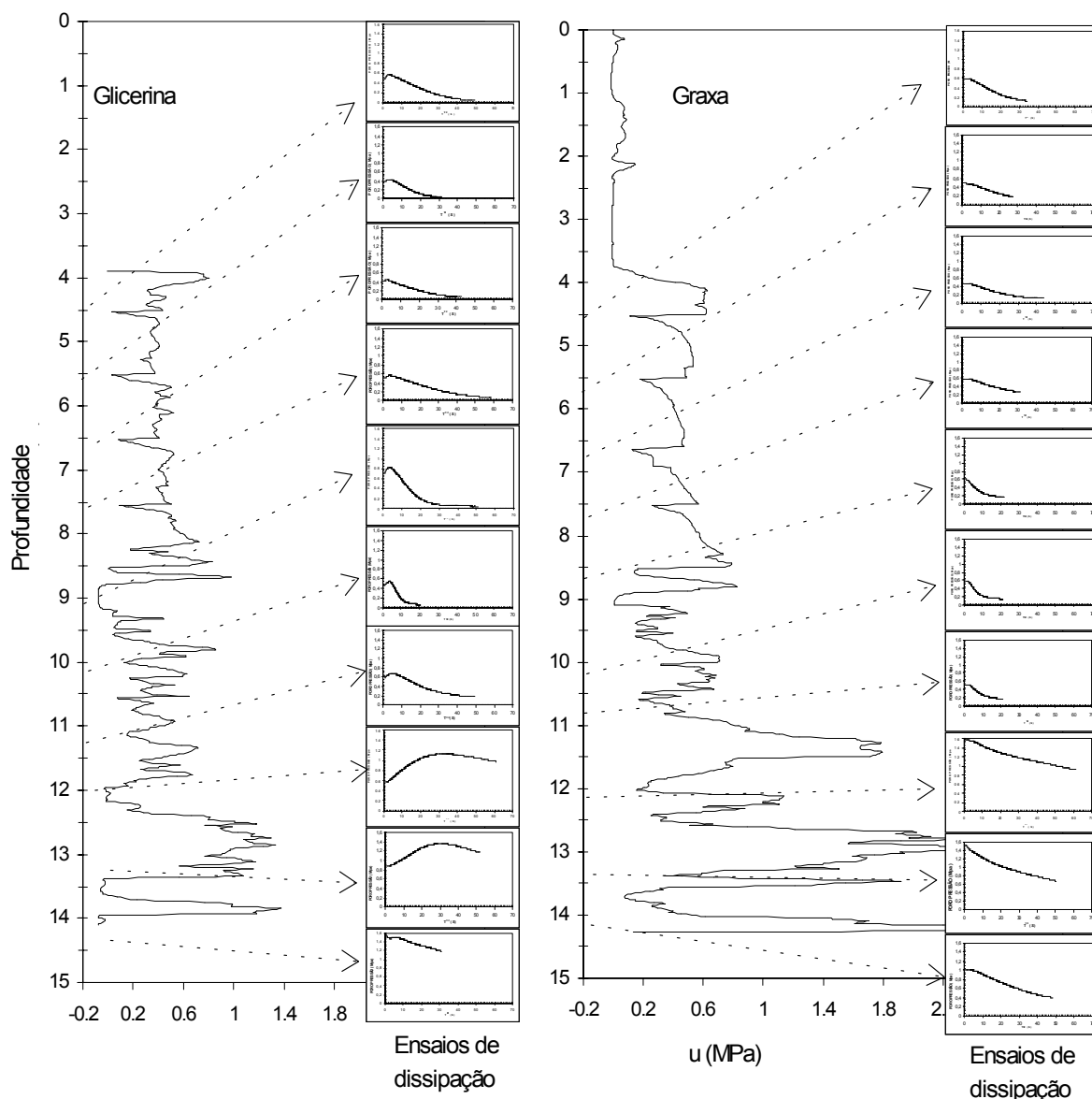


Figura 5.12 – Comparação entre registros de poro-pressão e ensaios de dissipação de seu excesso, em ensaios de piezocone contíguos, utilizando pedra porosa saturada com glicerina e filtro de cavidade preenchido com graxa.

Na Figura 5.13 são apresentados resultados de ensaios de dissipação de excesso de poro-pressão em dois ensaios de piezocone adjacentes, executados com graxa e glicerina.

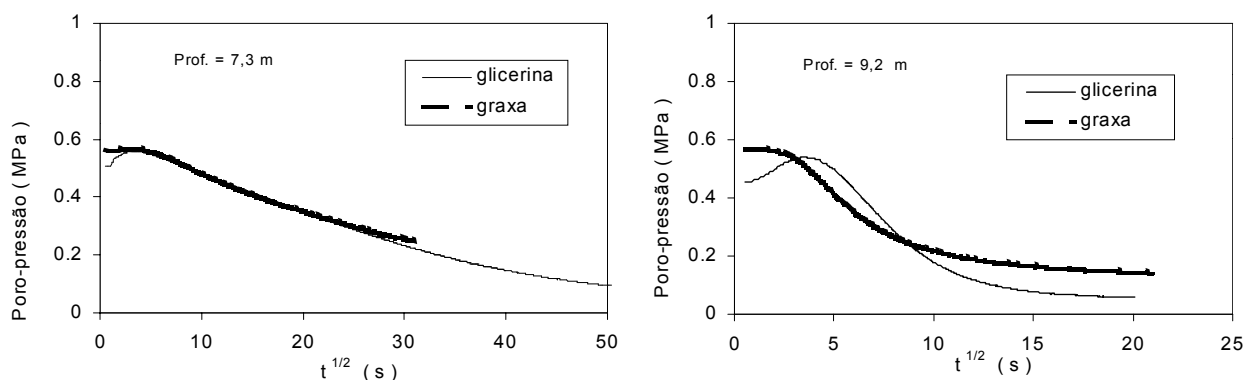


Figura 5.13 - Resultados de ensaios de dissipação de excesso de poro-pressão em dois ensaios de piezocone adjacentes, executados com graxa e glicerina

Os resultados dos ensaios de dissipação (Figura 5.13) mostram semelhança considerável, quando são comparados os resultados de ensaios executados com graxa e com glicerina. A tendência das curvas é praticamente a mesma, com diferenças nos trechos iniciais, onde, com o uso da glicerina, ocorre elevação inicial nos registros de poro-pressão, para posterior decaimento.

Os resultados dos registros de poro-pressão, em ensaios de piezocone e de dissipação do excesso de poro-pressão, nos solos do sítio Curitiba, mostram que a utilização da graxa e da glicerina conduzem a resultados semelhantes, porém com diferenças na forma das curvas de dissipação. Este aspecto deve ser observado com cuidado durante a interpretação dos ensaios de piezocone que utilizam filtro de cavidade preenchido com graxa automotiva, pois, quando não se tem garantia de saturação do piezo-elemento, fica comprometida essa hipótese fundamental para aplicação da teoria do adensamento em solos saturados.



## 5.2.2 Sítio São Paulo

### 5.2.2.1 Considerações gerais

São aqui apresentados resultados da interpretação de ensaios de piezocone de resistividade e sondagens de simples reconhecimento, com amostragem integral, associadas a ensaios SPT, executados no Campo Experimental de Estudos Geofísicos do Instituto Astronômico e Geofísico da USP, localizado na Cidade Universitária, em São Paulo, e com posições indicadas na Figura 5.14. Abrangem seis ensaios de piezocone de resistividade e três sondagens de simples reconhecimento com descrição detalhada do perfil estratigráfico. Os resultados destas sondagens foram utilizados como referência para a caracterização geológica e para interpretação dos resultados dos ensaios com piezocone de resistividade, contíguos à estas sondagens. O Campo Experimental do IAG-USP foi implantado com objetivo de testar métodos e avaliar resultados de ensaios geofísicos executados a partir da superfície e em perfilagens nos furos de sondagem. Descrições detalhadas sobre os ensaios realizados e sobre a programação futura de ensaios podem ser obtidas em Porsani (2003) e Porsani et al. (2004).

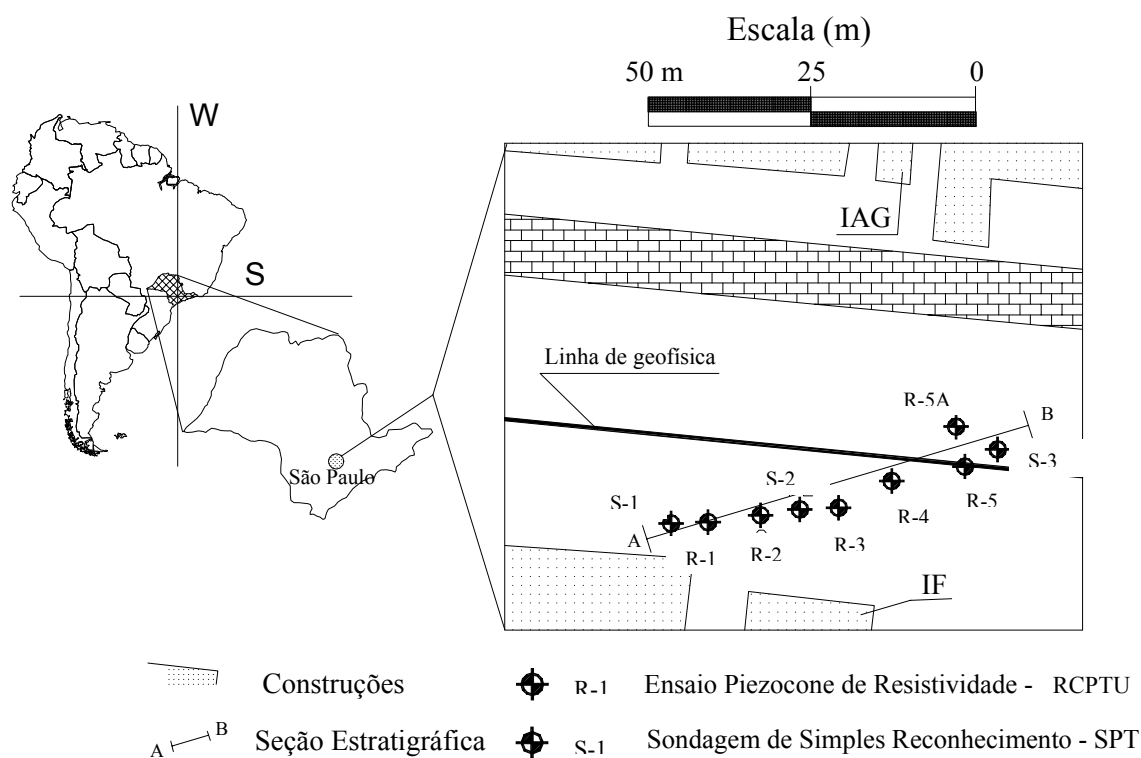


Figura 5.14 – Localização da área e dos ensaios de campo realizados na Cidade Universitária – USP, em São Paulo, próximo ao Instituto Astronômico e Geofísico (IAG). Sítio São Paulo.

### 5.2.2.2 - Caracterização geológica

O local situa-se em terrenos pertencentes a Bacia Sedimentar Cenozóica de São Paulo. O histórico de formação e de evolução da bacia é complexo com incertezas na interpretação da distribuição espacial das unidades e nas suas relações estratigráficas. A subdivisão mais aceita é aquela proposta por Riccomini (1989), utilizada neste trabalho, como referência. São considerados como sedimentos continentais cenozóicos depositados em uma bacia tafrogênica integrante do rift continental do Sudeste do Brasil, que é uma feição tectônica de idade Cenozóica, orientação ENE, desenvolvida entre as cidades de Curitiba (PR) e Barra de São João (RJ). O substrato da bacia é essencialmente constituído por rochas graníticas, migmatitos e rochas metamórficas diversas, recortados por falhamentos gravitacionais e transcorrentes, responsáveis pela abertura das bacias deposicionais de São Paulo e de Curitiba.

Os sedimentos apresentam arcabouço estrutural e litológico que indica formação da bacia vinculada a tectonismo, com influência de mudanças nas condições climáticas durante o Cenozóico, que controlaram os ambientes de sedimentação, as taxas de sedimentação e a distribuição espacial das unidades. Na estratigrafia proposta por Riccomini (1989) os sedimentos que ocorrem na região de São Paulo pertencem ao Grupo Taubaté, que engloba as Formações Resende, Tremembé e São Paulo, além dos sedimentos pertencentes a Formação Itaquaquetuba, todos de idade Terciária, recobertos pelas associações colúvio aluviais de idade Quaternária.

Na Bacia de São Paulo, a Formação Resende representa cerca de 80% da área de ocorrência da bacia, englobando depósitos de leques aluviais com diamictitos e conglomerados imersos em matriz lamito-arenosa, gradando nas porções mais centrais para lamitos arenosos, além de depósitos relacionados a planícies aluviais de rios entrelaçados. A Formação Tremembé representa camadas tabulares de argilas verdes maciças intercalada com argilas escuras e com matéria orgânica. A Formação São Paulo corresponde a sedimentos formados em um sistema fluvial meandrante constituído por duas litofáceis principais. A primeira com arenitos conglomeráticos grossos, granodecresença ascendente para siltitos e argilitos, com muita matéria orgânica e ocorrência de linhitos. A segunda por arenitos de granulação média a grossa granodecrescente para areia finas, siltitos e argilitos, apresentando camadas de carácter rítmico.

Já, os depósitos correspondentes a Formação Itaquaquetuba, representam um sistema fluvial entrelaçado e o aspecto fundamental que os diferencia das demais formações são os contatos erosivos e tectônicos, sempre com as rochas do embasamento cristalino. Existem referências da ocorrência de sedimentos da Formação São Paulo junto a Prefeitura da Cidade

Universitária da USP, no entanto, na área da raia olímpica os sedimentos são referidos como pertencentes a Formação Itaquaquetuba, coincidindo com os resultados de sondagem executada junto ao Instituto de Geociências - USP, que mostrou espessura mínima de 40 m de sedimentos.

As sondagens executadas junto no IAG-USP, indicam espessuras de sedimento entre 47 e 52 m, em contato direto com as rochas gnáissicas porfiríticas fraturadas do embasamento cristalino. A Figura 5.15 mostra um perfil do local estudado obtido a partir da sondagem P-3 até 80 m de profundidade. As características deste depósito e semelhanças com a sondagem realizadas no IAG – USP sugerem que eles podem pertencer à Formação Itaquaquetuba, recoberta por sedimentos colúvio-aluviais quaternários e aterros. Porsani et al. (2004) interpretam estes sedimentos como pertencentes a Formação São Paulo.

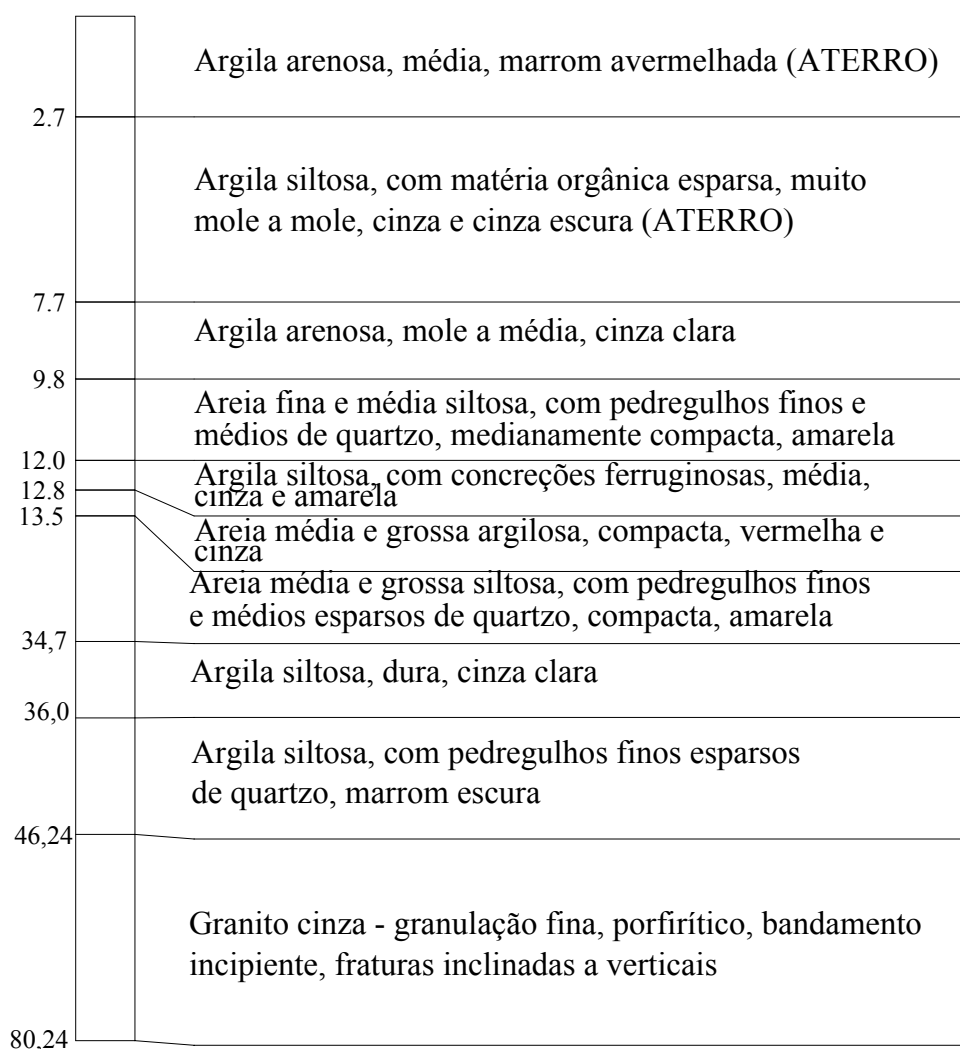


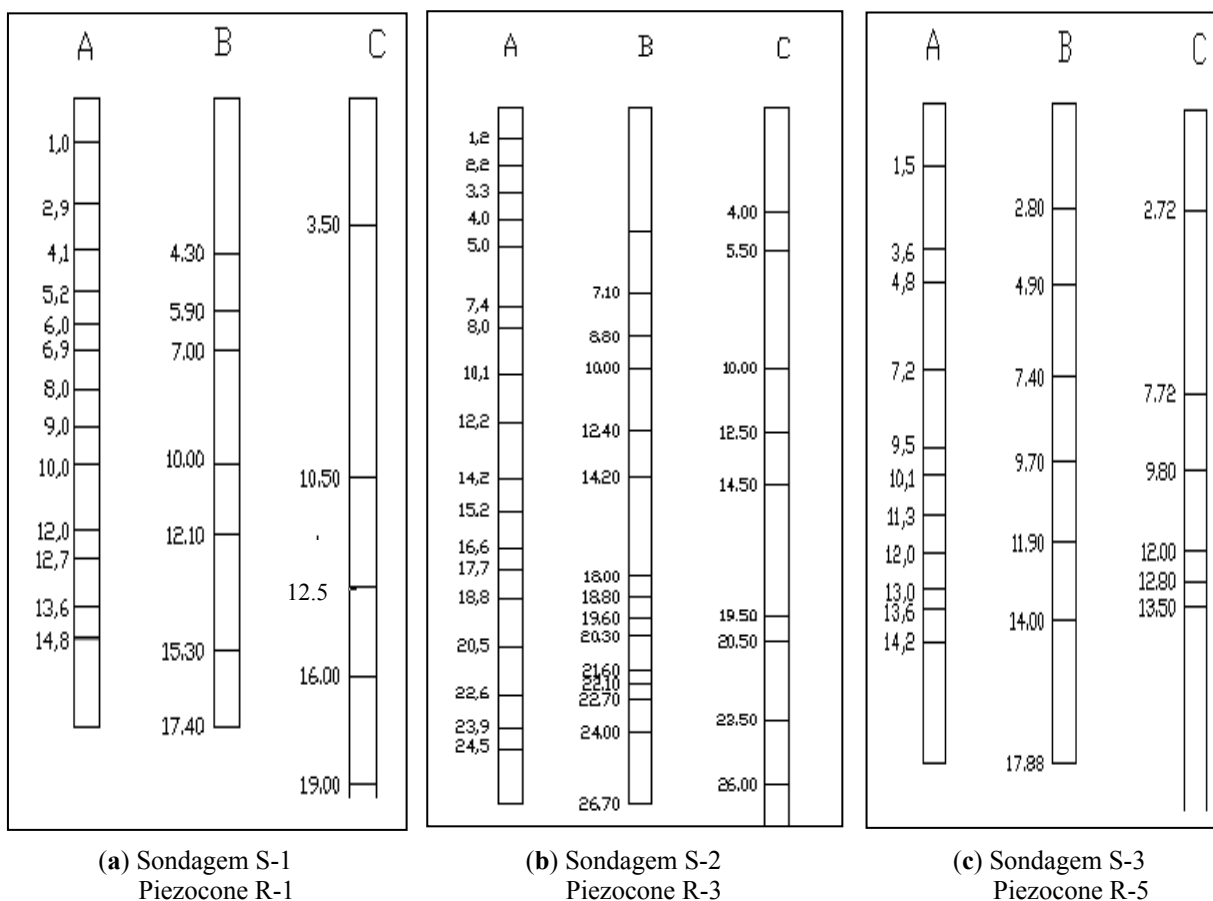
Figura 5.15 – Descrição do perfil do terreno obtido a partir de sondagem com amostragem integral (S-3).

As condições de formação deste perfil devem ter sido variáveis, pois verificam-se heterogeneidades na composição, com transições bruscas entre camadas, localmente ocorrendo granodecrescência ascendente de areias conglomeráticas para areias siltosas até siltes arenosos. As amostras coletadas nas sondagens de simples reconhecimento foram descritas com razoável detalhe, porém sem considerar aspectos sedimentológicos e estruturas sedimentares, fato que limitou análises mais específicas na comparação com os resultados dos ensaios de piezocone.

### 5.2.2.3 - Identificação do perfil estratigráfico

A identificação precisa da distribuição espacial dos pacotes de solo, mesmo em situações como as deste sítio, onde as camadas são relativamente bem definidas, ainda é uma tarefa complexa. A disponibilidade de três locais com ensaios de piezocone, adjacentes às sondagens de simples reconhecimento, permitem comparar de forma objetiva as transições e as classificações dos solos com base em diferentes métodos. A Figura 5.16 mostra os limites entre camadas, comparando os resultados de três sondagens de simples reconhecimento e três ensaios de piezocone executados a distâncias entre si de até 3 m. Existe boa correspondência entre as transições estabelecidas na inspeção visual dos resultados do ensaio de piezocone e nos limites identificados a partir da sondagem de simples reconhecimento. As diferenças principais se devem provavelmente a precisão de cada método empregado. As transições definidas a partir das amostragens dependem do nível de detalhamento da descrição e da continuidade das amostragens, enquanto que os resultados dos ensaios de piezocone podem ser interpretados, mesmo após a geração do perfil, em nível de detalhe desejado, porém embute imprecisões devidas aos efeitos de escala, por exemplo, em função do diâmetro da ponteira cônica empregada. O resultado do teste de correlação intraclasses multivariado ( $D^2$ ) com janela de 2 m mostra grande semelhança com as identificações feitas pela inspeção visual dos resultados dos ensaios de piezocone ou com os das sondagens de simples reconhecimento. Neste caso, a identificação das transições é feita de forma razoavelmente simples, porém quando são combinados diferentes métodos com níveis de detalhe distintos, a incerteza pode aumentar, exigindo análises mais detalhadas que considerem a variabilidade interna de cada camada.

Nas Figuras 5.17, 5.18 e 5.19 tem-se a comparação entre as classificações e os limites obtidos das sondagens e dos ensaios de piezocone.



Figuras 5.16 - Comparação entre os limites das camadas em perfis de solo, utilizando métodos distintos. A – Teste estatístico  $D^2$  com janela de 2 m, B – Inspeção visual de resultados de RCPTU, C – Resultados de sondagens SPT, no Sítio São Paulo.

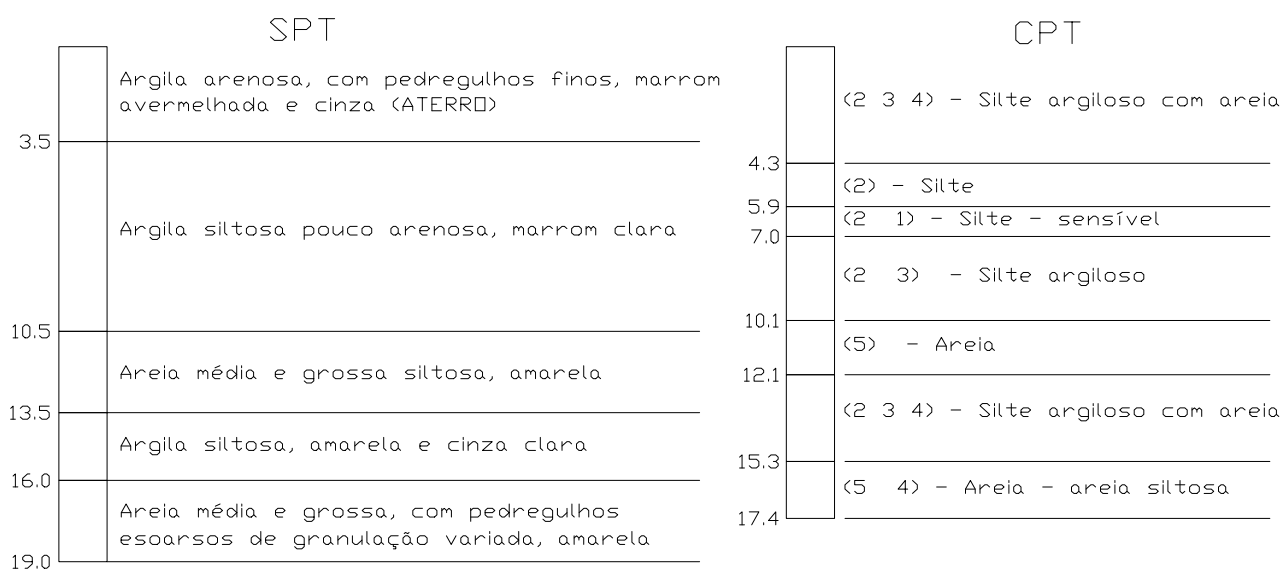


Figura 5.17 – Comparação entre classificação de solos obtida em sondagens de simples reconhecimento (S-1), e classificação do ensaio de piezocone (R-1) utilizando o ábaco de Robertson et al. (1986). Sítio São Paulo.

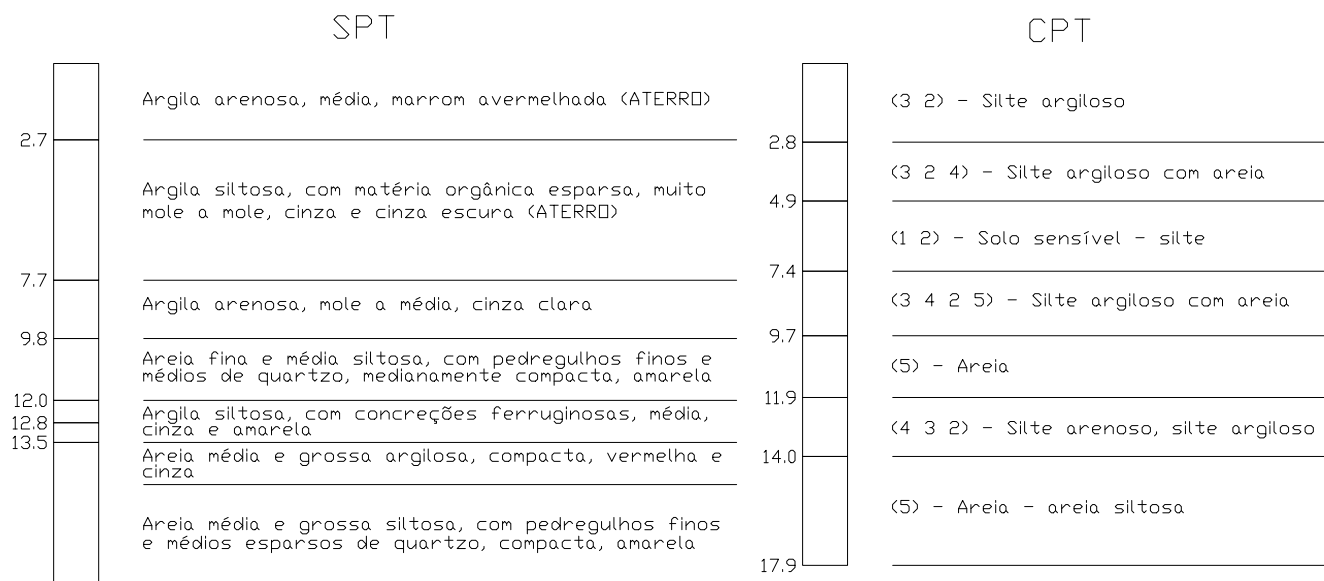


Figura 5.18 – Comparação entre classificação de solos obtida em sondagens de simples reconhecimento (S-3), e classificação do ensaio de piezocone (R-5) utilizando o ábaco de Robertson et al. (1986). Sítio São Paulo.

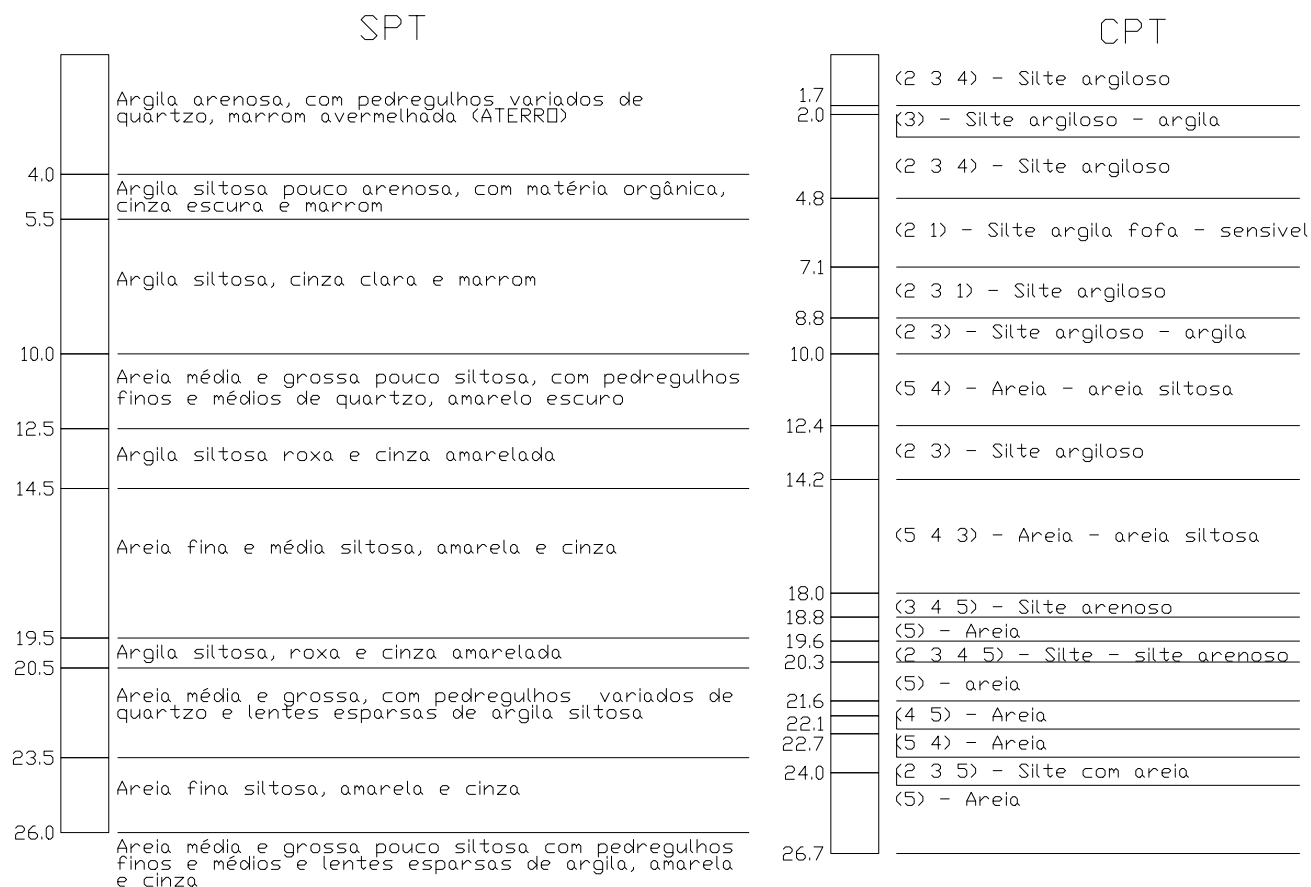


Figura 5.19 – Comparação entre classificação de solos obtida em sondagens de simples reconhecimento (S-2), e classificação do ensaio de piezocone (R-3) utilizando o ábaco de Robertson et al. (1986). Sítio São Paulo

Observa-se uma clara distinção entre as camadas, na classificação dos materiais e na posição das transições, mostrada nos perfis individuais (Figuras 5.17, 5.18 e 5.19) e na seção estratigráfica que abrange todos os ensaios (Figura 5.20), interpretada com base nos resultados das sondagens e dos ensaios de piezocone de resistividade.

A compartimentação foi feita com base nas respostas do piezocone, que mostram diferenças de comportamento. Ao comparar as transições e as classificações das sondagens de simples reconhecimento e ensaios de piezocone constatou-se boa correspondência, porém com alguma discrepância. Na delimitação dos aterros e dos depósitos aluviais, que concentram argilas moles a muito moles, as informações das transições entre as camadas não coincidem perfeitamente, principalmente na região onde foram executadas a sondagem S-3 e o ensaio de piezocone R-5, provavelmente em função da mistura de materiais durante o lançamento dos aterros e da diferença de precisão entre os métodos de investigação.

Nas porções mais profundas do perfil, entre 18 e 26 m, tem-se o resultado de apenas um ensaio de piezocone, e abaixo dos 26 m de profundidade somente o resultado das sondagens de simples reconhecimento, fato que limita a comparação entre os ensaios distintos. O nível de detalhamento para subdivisão do perfil fornecido pelo ensaio do piezocone é maior do que a descrição tátil-visual dos solos feita nas amostras das sondagens, conforme pode ser observado na Figura 5.21. Intercalações de camadas com espessuras de 0,2 a 0,8 m, claramente indicadas pelo razão de atrito e pela poro-pressão, não são marcadas nas descrições das sondagens de simples reconhecimento, mostrando que nos solos mistos e locais com intercalações de pequenas camadas, as variações nos percentuais das frações granulométricas do solo nem sempre são percebidas pela descrição tátil-visual, porém comportamentos diferentes, são registrados em ensaio de piezocone.

A classificação com base na proposta de Zhang & Tumay (1999) reflete as incertezas através da probabilidade de ocorrência de tipos de solo com comportamento mais provável de areia ou argila, ressaltando claramente os locais com solos intermediários, transições e intercalações, representadas pela designação silte na legenda da classificação. As Figuras 5.21 e 5.22 mostram a classificação probabilística, os pontos no ábaco de Robertson et al (1986), os resultados da descrição tátil-visual de amostras e parâmetros estatísticos relativos a  $q_c$  para cada camada do ensaio em questão. Existe uma dispersão de pontos representados nos ábacos de cada camada, o que é refletido em definição mais clara do perfil probabilístico do solo.

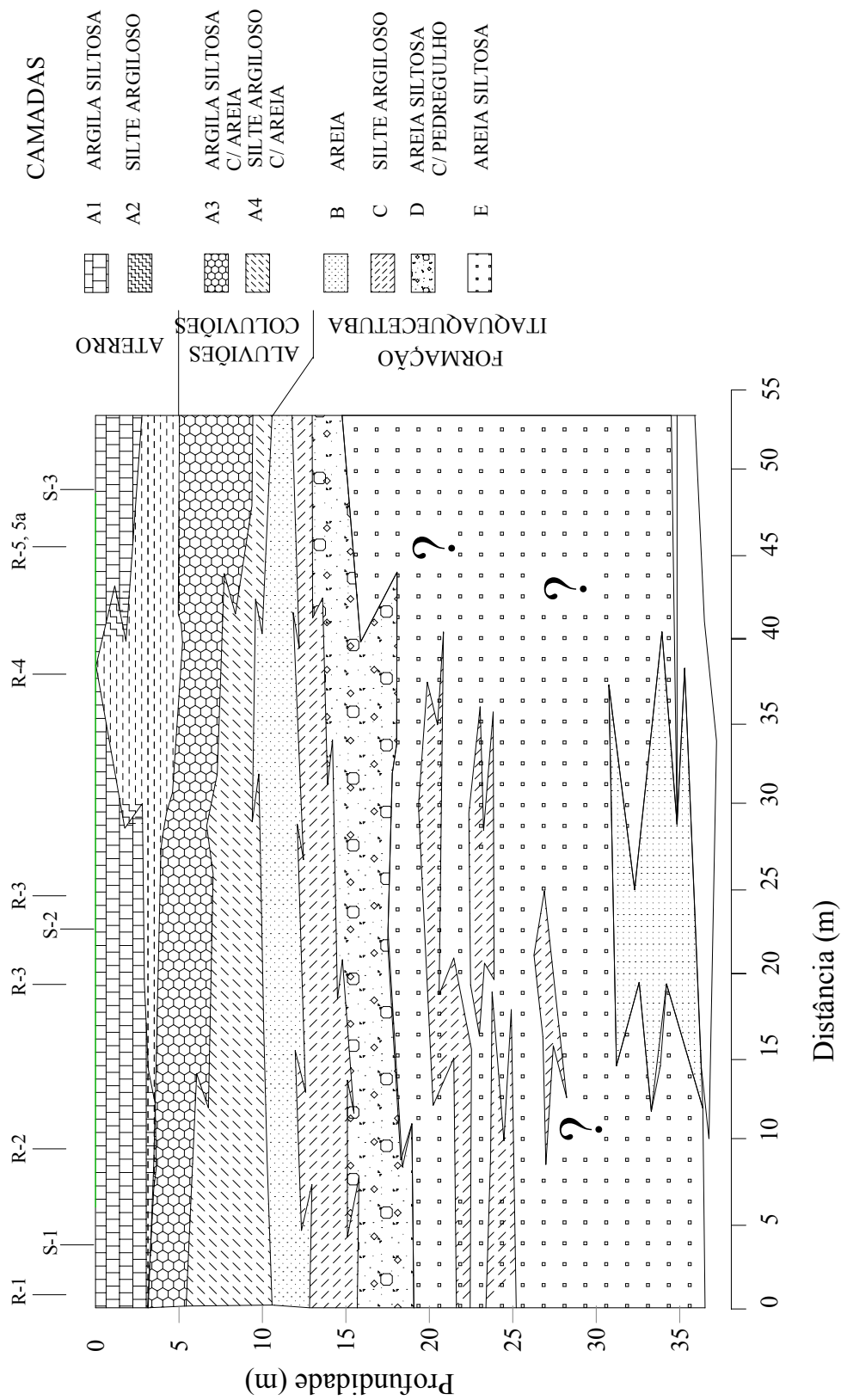


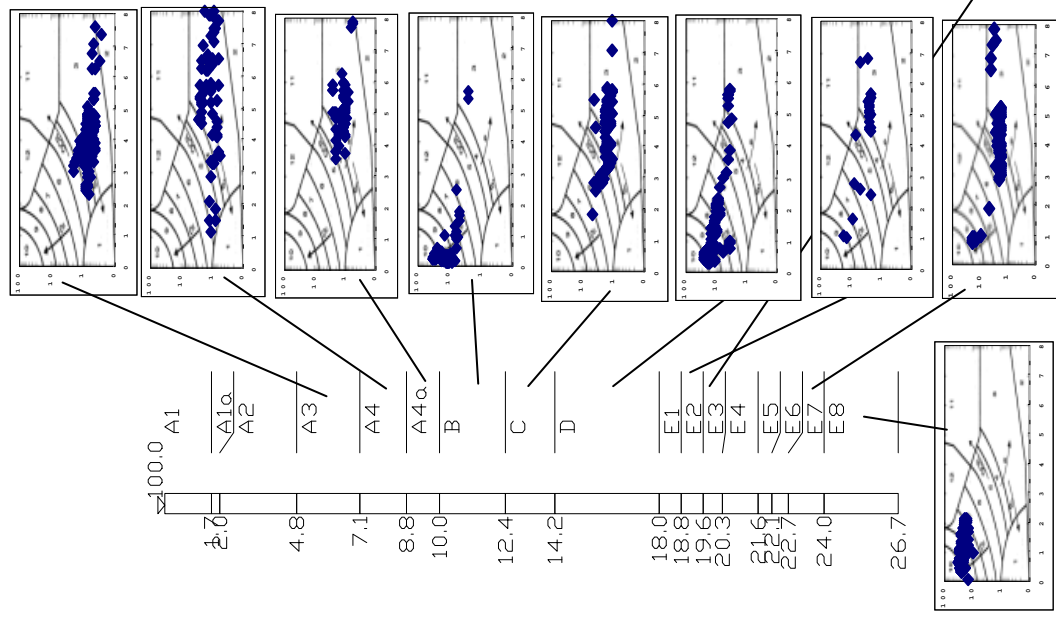
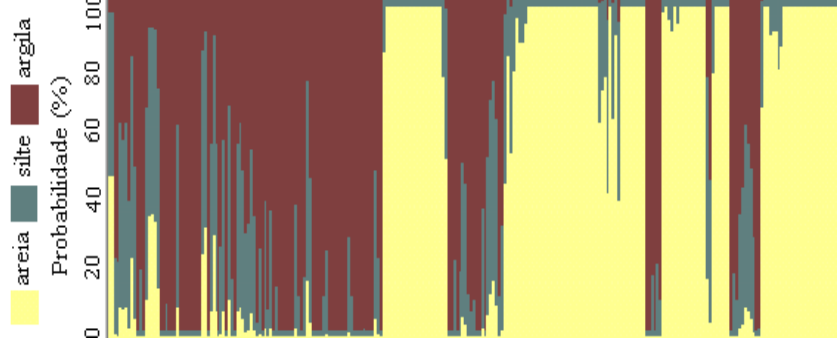
Figura 5.20 Seção estratigráfica integrando todos os pontos de investigação indicados na Figura 5.14 e interpretada com base nos resultados das sondagens, ensaios de piezocône e interpretação geológica. Sítio São Paulo.



Os locais do perfil com maior incerteza probabilística são aqueles onde ocorrem percentuais variados de cada classe de solo no interior de uma mesma camada. As distâncias de correlação, indicadas pela escala de flutuação, são maiores quanto maior a homogeneidade da camada. Esta análise mostra que o processo de subdivisão em camadas é efetivo em reduzir a variabilidade interna do maciço, identificando estratos mais homogêneos, porém requer sempre análise criteriosa de engenharia, função dos objetivos, para definição da melhor compartimentação.

Na Figura 5.23 estão representados os resultados de um ensaio de piezocone e sua interpretação segundo as classificações de Fellenius & Eslami (2000), Robertson et al. (1986), Olsen & Malone (1988) e Zhang & Tumay (1999), mostrando os parâmetros estatísticos de cada camada, para os valores de  $q_c$ . Observa-se, nessa figura, que nos locais onde as probabilidades de ocorrência de areia ou argila são próximas a 100% a distribuição dos pontos nos ábacos é mais concentrada, abrangendo menor número de classes definidas no ábaco.

Classificacao Probabilistica  
(Zhang & Tumay, 1999)



- 100.00
- 4.00 Argila arenosa, com pedregulhos variados de quartzo, marrom avermelhada (ATERRO)
- 5.50 Argila siltosa pouco arenosa, com matéria orgânica, cinza escura e marrom
- 10.00 Argila siltosa, cinza clara e marrom
- 12.50 Areia média e grossa pouco siltosa, com pedregulhos finos e médios de quartzo, amarelo escuro
- 14.50 Argila siltosa roxa e cinza amarelada
- 19.50 Areia fina e média siltosa, amarela e cinza
- 20.50 Argila siltosa, roxa e cinza amarelada
- 23.50 Areia média e grossa, com pedregulhos variados de quartzo e lentes esparsas de argila siltosa
- 26.00 Areia fina siltosa, amarela e cinza
- 26.70 Areia média e grossa pouco siltosa com pedregulhos finos e médios e lentes esparsas de argila, amarela e cinza

Figura 5.21 Comparação entre resultados de diferentes métodos de classificação do solo com base em sondagem de simples reconhecimento (S-2) e ensaio de piezocone (R-3), e na proposta de Robertson et al (1986) e Zhang & Tumay (1999). Sítio São Paulo.

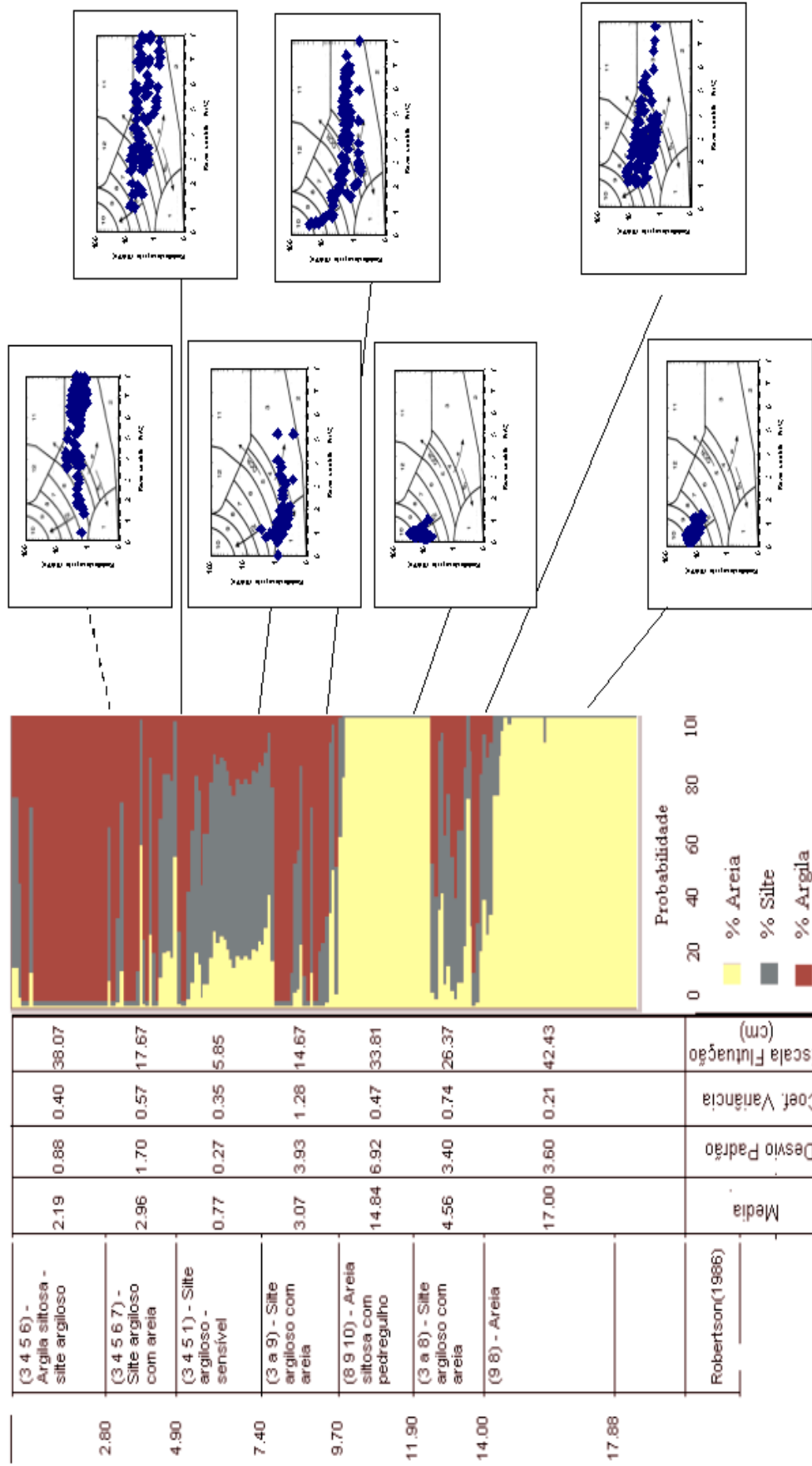


Figura 5.22 - Comparação entre resultados de diferentes métodos de classificação do solo a partir de ensaios de piezocone (R-5), com base na proposta de Robertson et al (1986) e Zhang & Tumay (1999), com parâmetros estatísticos calculados a partir de  $q_c$ . - Sítio São Paulo.

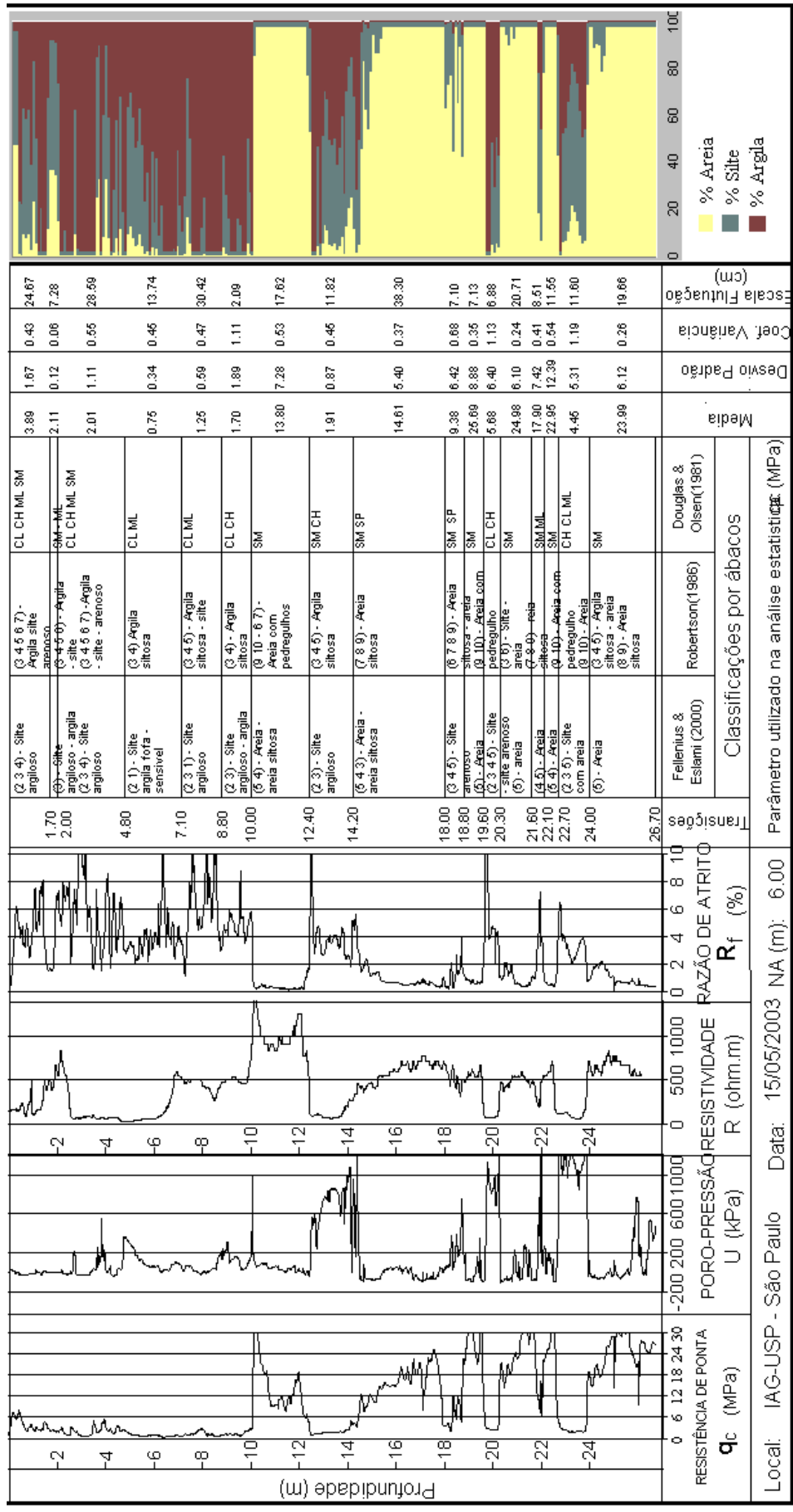


Figura 5.23 – Comparação entre resultados de diferentes métodos de classificação do solo com base em resultado de ensaio de piezocone de resistividade (R-3), aplicando as propostas de Fellenius & Eslemi (2000), Robertson et al (1986), Olsen & Malone (1988) e Zhang & Tumay (1999), indicando ainda os parâmetros estatísticos de cada camada com base nos registros de qc. Sítio São Paulo

### 5.2.2.4 Análise estatística

As análises estatísticas foram aplicadas aos seis ensaios de piezocone executados no sítio São Paulo, considerando os registros de  $q_c$ . Estas análises permitem avaliar a interferência da subdivisão em camadas na variabilidade dos resultados do piezocone e na variação de  $q_c$  ao longo da seção investigada. Na Tabela 5.2 são mostrados resultados de testes estatísticos aplicados ao resultado de  $q_c$  do ensaio de piezocone R-3, comparando diferentes subdivisões para este mesmo ensaio. O perfil foi compartimentado em 5 camadas principais, denominadas A, B, C, D e E. As camadas A e E foram subdivididas em sub-camadas e analisadas individualmente.

Tabela 5.2 – Resultados de testes estatísticos aplicados a camadas definidas a partir dos resultados de  $q_c$  do ensaio CPTU – R3, mostrando os efeitos da subdivisão em camadas nos parâmetros estatísticos. Sítio São Paulo.

	<b>Camada</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Variância</b>	<b>Escala de Flutuação</b>
Prof (m)					
0 a 26,7	Integral	10.06	10.28	1.02	0
0 a 10	A	1.85	1.55	0.84	63.62
0 a 4,8	A1	2.67	1.58	0.59	39.11
4,8 a 7,1	A2	0.7	0.31	0.44	12.96
7,1 a 8,8	A3	1.23	0.6	0.49	30.84
8,8 a 10	A4	1.63	1.87	1.15	2.03
10 a 12,4	B	13.78	7.27	0.53	17.6
12,4 a 14,2	C	1.61	0.86	0.53	10.95
14,2 a 18	D	14.61	5.43	0.37	38.13
18 a 26,7	E	18.08	11.16	0.62	51.04
18 a 18,8	E1	9.29	6.43	0.69	7.04
18,8 a 19,6	E2	25.71	8.89	0.35	7.14
19,6 a 20,3	E3	5.38	6.51	1.21	6.84
20,3 a 21,6	E4	24.98	6.09	0.24	20.64
21,6 a 22,1	E5	17.7	7.52	0.42	8.62
22,1 a 22,7	E6	22.85	12.52	0.55	11.49
22,7 a 24	E7	4.04	5.46	1.35	11.5
24 a 26,7	E8	23.95	6.12	0.26	19.65

Observa-se, nesta tabela, que a subdivisão do perfil em camadas normalmente reduz o desvio padrão e a variância e aumenta a escala de flutuação, o que indica um aumento da homogeneidade individual de cada camada. No entanto, comparando os resultados da camada A com os da sub-camadas A1, A2, A3 e A4 verifica-se que a divisão em sub-camadas não garante a redução da variabilidade. A Tabela 5.3 mostra o resultados de testes estatísticos aplicados aos registros de  $q_c$  de todos os ensaios de piezocone, agrupados por camadas com indicação das médias de cada parâmetro para todas as camadas ao longo da área. A subdivisão do perfil deve

ser feita até que a variabilidade interna de cada camada seja aceitável, porém respeitando obrigatoriamente a variabilidade granulométrica natural imposta pelas condições de gênese de cada tipo de solo.

Tabela 5.3 – Resumo dos parâmetros estatísticos para os registros de  $q_c$  dos ensaios de piezocone, compartmentados em camadas. Sítio São Paulo

Valores de $q_c$ (MPa)											
Camada	Ensaio	Média de $q_c$ por ensaio	Média das médias	Desvio padrão de $q_c$ por ensaio	Média dos Desvios padrões	Variancia por ensaio	Média das Variancias	Escala de flutuação (cm)	Média das Esc. Flut.	Camada	
										Topo	Base
A1	R-3	3.89		1.67		0.43		24.67		0	1.7
	R-1	2.45		1.62		0.66		16.21		0	4.3
	R-2	3.99		1.82		0.45		19.86		0	1.4
	R-5	1.96		0.88		0.45		52.94		0	2.8
	R-5A	2.19		0.88		0.40		38.07		0	2.8
	R-3	2.11		0.12		0.06		7.28		1.7	2
	R-2	4.24	<b>2.77</b>	1.74	<b>1.17</b>	0.41	<b>0.41</b>	8.23	<b>26.51</b>	1.4	2.1
A2	R-3	2.01		1.11		0.55		28.59		2	4.8
	R-2	3.09		1.58		0.51		38.07		2.1	4.4
	R-4	2.14		1.14		0.54		37.77		0	5
	R-5	2.88		1.32		0.46		10.61		2.8	4.9
	R-5A	2.96	<b>2.62</b>	1.70	<b>1.37</b>	0.57	<b>0.53</b>	17.67	<b>26.54</b>	2.8	4.9
A3	R-5	0.76		0.20		0.26		40.76		4.9	7.3
	R-1	0.48		0.24		0.51		20.98		4.3	5.9
	R-3	0.75		0.34		0.45		13.74		4.8	7.1
	R-2	0.88		0.34		0.39		11.10		4.4	7.1
	R-4	0.53		0.15		0.29		38.84		5	7.4
	R-5A	0.77	<b>0.70</b>	0.27	<b>0.26</b>	0.35	<b>0.38</b>	5.85	<b>21.88</b>	4.9	7.4
A4	R-1	1.78		1.38		0.78		29.83		7	10.1
	R-5	1.79		1.53		0.85		6.32		7.3	9.3
	R-3	1.25		0.59		0.47		30.42		7.1	8.8
	R-2	1.59		0.86		0.54		26.21		7.1	10.1
	R-4	1.39		0.77		0.55		29.72		7.4	9.6
	R-5A	3.07	<b>1.81</b>	3.93	<b>1.51</b>	1.28	<b>0.75</b>	14.67	<b>22.86</b>	7.4	9.7
B	R-3	13.80		7.28		0.53		17.62		10	12.4
	R-1	13.66		3.58		0.26		15.39		10.1	12.1
	R-2	13.55		6.32		0.47		14.35		10.1	12.3
	R-4	15.51		7.23		0.47		13.84		9.6	12
	R-5	14.82		7.15		0.48		35.96		9.3	11.8
	R-5A	14.84	<b>14.36</b>	6.92	<b>6.41</b>	0.47	<b>0.45</b>	33.81	<b>21.83</b>	9.7	11.9
C	R-3	1.91		0.87		0.45		11.82		12.4	14.2
	R-1	1.65		0.80		0.49		16.82		12.1	15.3
	R-2	3.35		3.37		1.01		12.63		12.3	14.7
	R-4	2.16		2.18		1.01		3.79		12	13.8
	R-5	1.77		0.58		0.33		2.78		11.8	13
	R-5A	4.56	<b>2.57</b>	3.40	<b>1.87</b>	0.74	<b>0.67</b>	26.37	<b>12.37</b>	11.9	14
D	R-1	14.98		6.46		0.43		36.66		15.3	17.4
	R-3	14.61		5.40		0.37		38.30		14.2	18
	R-2	16.83		9.15		0.54		27.07		14.7	17.26
	R-4	15.30		6.18		0.40		28.70		13.8	17.6
	R-5	9.30		3.63		0.39		14.92		13	14.18
	R-5A	17.00	<b>14.67</b>	3.60	<b>5.74</b>	0.21	<b>0.39</b>	42.43	<b>31.35</b>	14	17.88
E1	R-3	9.38		6.42		0.68		7.10		18	18.8
E2	R-3	25.69		8.88		0.35		7.13		18.8	19.6
E3	R-3	5.68		6.40		1.13		6.88		19.6	20.3
E4	R-3	24.98		6.10		0.24		20.71		20.3	21.6
E5	R-3	17.90		7.42		0.41		8.51		21.6	22.1
E6	R-3	22.95		12.39		0.54		11.55		22.1	22.7
E7	R-3	4.45		5.31		1.19		11.60		22.7	24
E8	R-3	23.99	<b>16.88</b>	6.12	<b>7.38</b>	0.26	<b>0.60</b>	19.66	<b>11.64</b>	24	26.7

Os níveis mais homogêneos são aqueles que apresentam um coeficiente de variação baixo e escala de flutuação alta, parâmetros que devem ser analisados em conjunto pois este último sofre influência direta da espessura da camada.

A formação dos sedimentos em camadas não garante a continuidade e homogeneidade lateral, pois neste ambiente de deposição podem ocorrer mudanças bruscas tanto na direção vertical como na horizontal, resultando em variações nos valores médios de  $q_c$  dos ensaios de piezocone. Na Figura 5.24, confeccionada com base nos dados da Tabela 5.3, é mostrada a variação das médias dos valores de  $q_c$ , nos ensaios de piezocone, para as camadas definidas acima. Nessa figura é indicada a profundidade aproximada das camadas e a média dos desvios padrões de cada ensaio de piezocone para cada camada, onde é mostrado um resumo de todos os parâmetros estatísticos obtidos a partir de  $q_c$  dos ensaios de piezocone, compartmentados em camadas

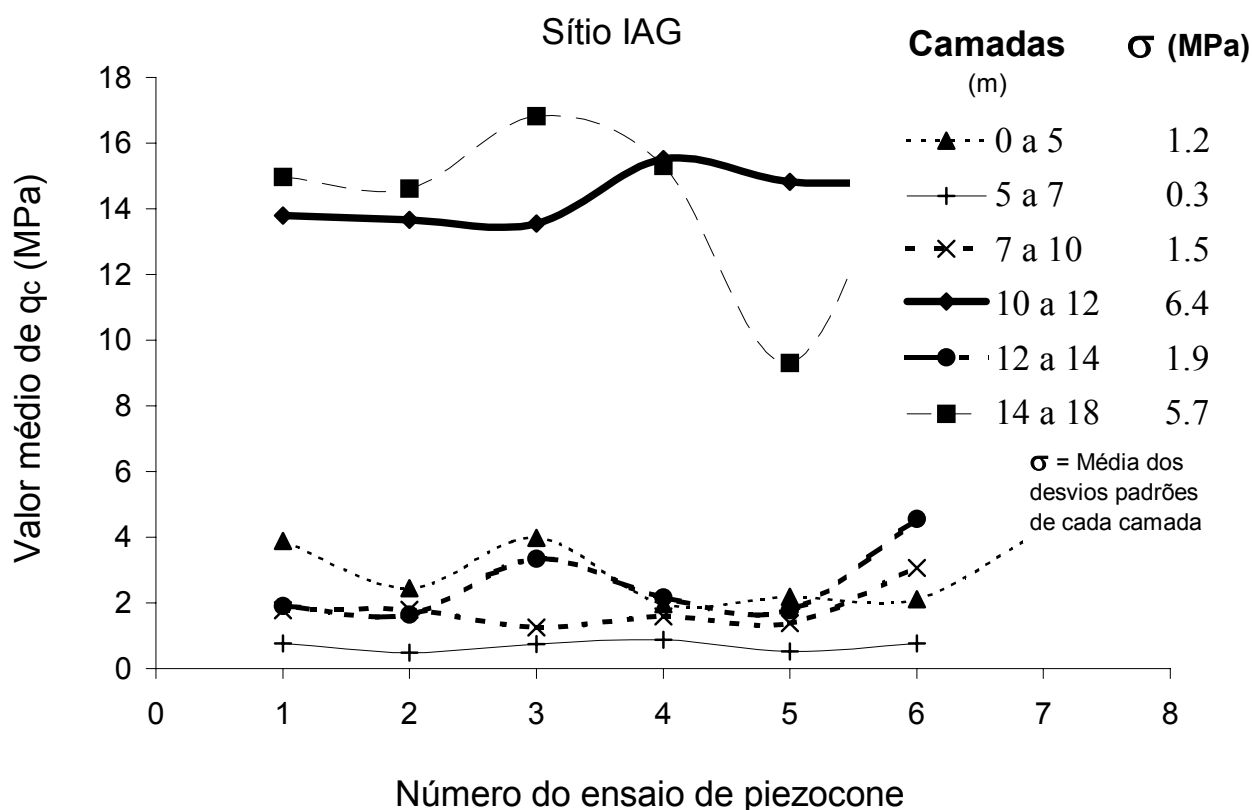


Figura 5.24 Representação da variação do valor médio de  $q_c$ , dos ensaios de piezocone, nas camadas definidas na Figura 5.23, para todos os ensaios de piezocone. Sítio São Paulo.

Observa-se, nessa figura, clara separação entre as camadas arenosas mais resistentes, e as argilosas, menos resistentes. As camadas apresentam continuidade lateral consistente, porém com variações consideráveis na média e desvio padrão dos valores de  $q_c$ . A camada de 5 a 7 m apresenta desvio padrão baixo, indicando continuidade e homogeneidade lateral nessa camada, na área de abrangência dos ensaios.

### 5.2.2.5 Correlações entre parâmetros

Neste sítio foi analisada a correlação  $q_c/N_{SPT}$  a partir de ensaio de piezocone e sondagem de simples reconhecimento distantes 2 m um do outro. Os gráficos mostrados na Figura 5.25 indicam que ocorrem algumas variações no resultado da correlação quando é alterado o critério de seleção do parâmetro  $q_c$  para uso na correlação (Figura 5.25.a). O critério que utiliza os valores médios na camada mostra comportamento mais coerente e tendência semelhante ao da correlação de Robertson et al. (1986) (Figura 5.25.b) apesar do valor do  $N_{SPT}$  não ter sido corrigido para as diferenças de energias do ensaio SPT.

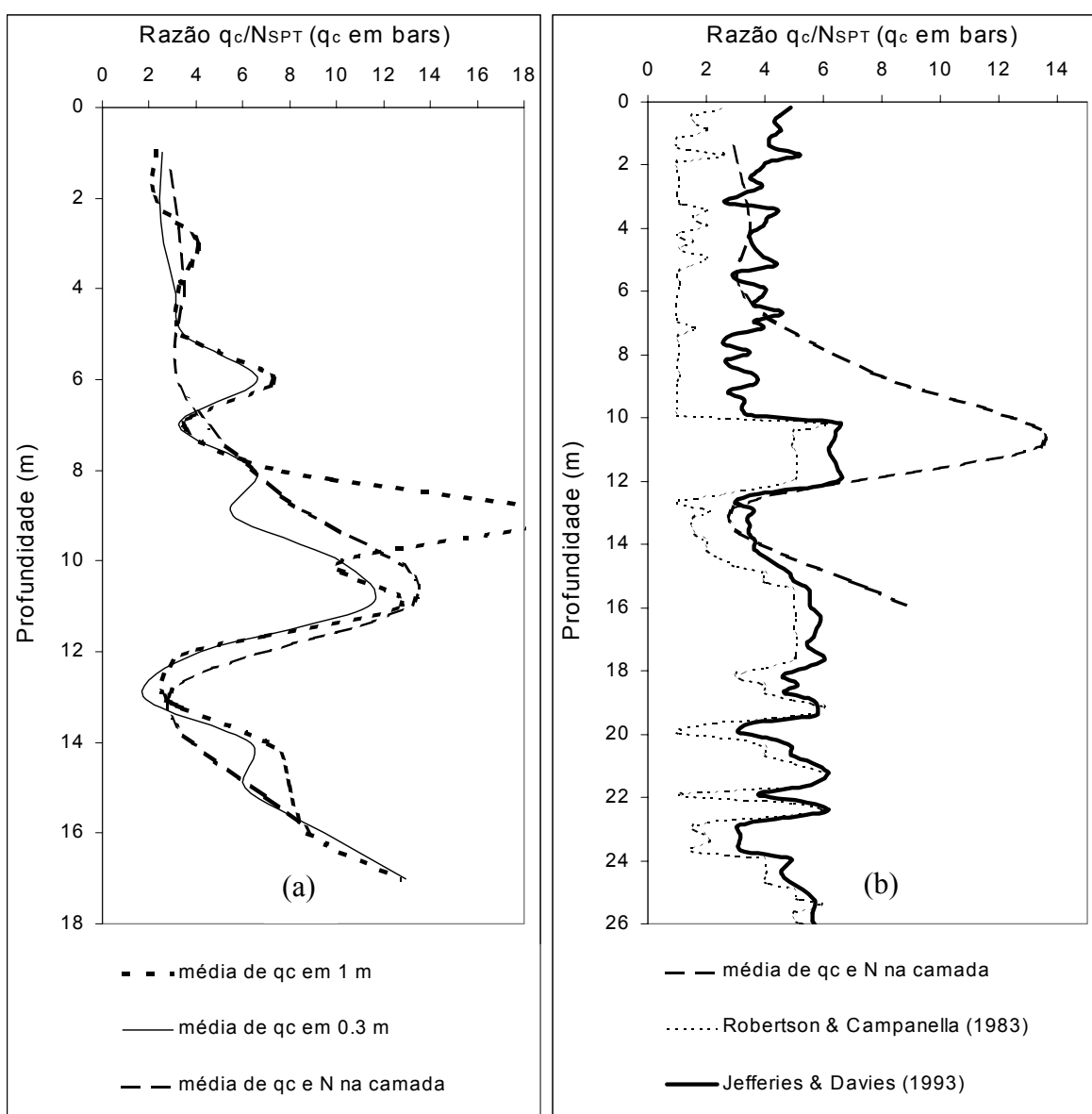


Figura 5.25 - Relação  $q_c/N_{SPT}$  versus profundidade. (a) variação dos critérios de seleção de  $q_c$  e  $N_{SPT}$  obtidos de ensaios de piezocone (R-3) e de sondagens de simples reconhecimento (S-2) contíguos, (b) previsões a partir do registro de  $q_c$ , das propostas de Robertson et al (1986) e Jefferies & Davies (1993). Sítio São Paulo.



Algumas das variações nos resultados da correlação podem estar ligadas a ensaios SPT executados nas regiões de contato entre camadas com diferentes propriedades, e o resultado do ensaio não é representativo de nenhuma delas. O resultado da aplicação da proposta de Jefferies & Davies (1993) mostra a mesma tendência da proposta de Robertson et al. (1986) (Figura 5.25.b), porém os valores da razão  $q_c/N_{SPT}$  são sistematicamente maiores.

#### 5.2.2.6 – Ensaios com piezocone de resistividade elétrica

Um resultado típico de um ensaio de piezocone de resistividade realizado na área é apresentado na Figura 5.23. Na Figura 5.26 são apresentados todos os resultados dos ensaios de piezocone de resistividade realizados neste sítio..

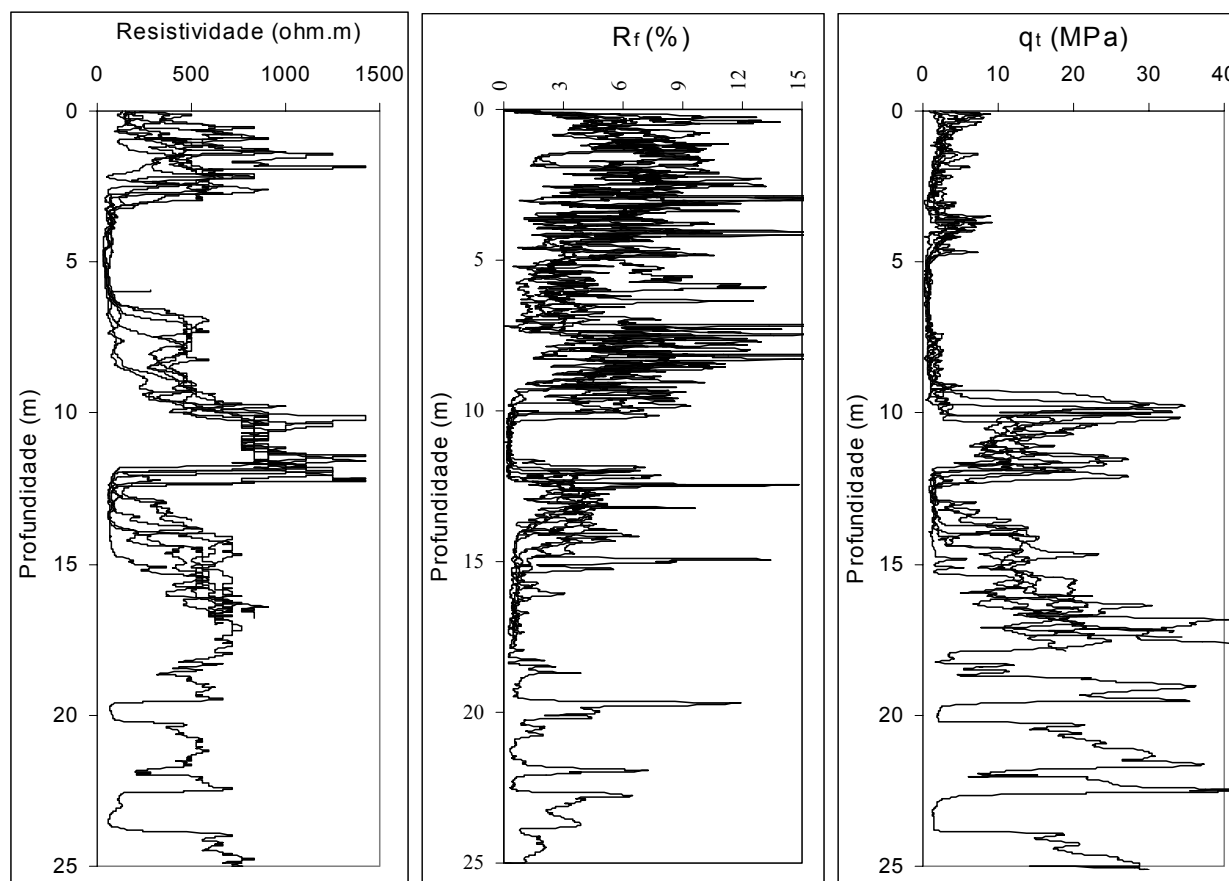


Figura 5.26 Resultados de todos os ensaios de piezocone de resistividade realizados no sítio São Paulo, com destaque para as medidas de resistividade.

Nessa figura observa-se que existe comportamento muito semelhante entre os seis perfis de resistividade determinados, sendo que esses resultados auxiliam na identificação do perfil

estratigráfico, marcando com bom nível de contraste as transições entre pacotes areno-siltosos e aqueles silto-argilosos.

As camadas arenosas apresentam resistividade alta, variando entre 500 a 1000 ohm.m, sendo que no nível arenoso, na profundidade entre 10 e 12 m, tem-se um valor característico de resistividade muito elevado, com picos de até 1400 ohm.m. As camadas argilosas e siltosas mostram resistividade baixa, tipicamente menores que 50 ohm.m.

Os registros da resistividade marcam com pouca clareza a posição do nível d'água, nas profundidades entre 6 e 7 m mudando para 7 a 8 m na região dos ensaios R-5 e R-5a. Aspecto interessante é o registro de valores de resistividade muito variáveis, entre 500 a 700 ohm.m, na camada mais superficial do terreno, entre 0 e 3 m de profundidade. Esta região é formada por um aterro, podendo estes valores estar vinculados a maior saturação do solo ou à presença de diferentes materiais que interferem na resistividade do solo, porém não existem dados disponíveis para uma melhor avaliação.

#### 5.2.2.7 – Ensaios com filtro de cavidade preenchido com graxa

Os ensaios de piezocone R-1 e R-2 foram executados utilizando elemento poroso saturado com glicerina, e os ensaios R-3, R-4, R-5 e R-5a foram executados utilizando o recurso do filtro de cavidade preenchido com graxa automotiva. A posição dos ensaios permitiu comparações entre os dois procedimentos e a avaliação da repetibilidade do ensaio quando é utilizada graxa.

A Figura 5.27 mostra o resultado dos registros de poro-pressão, comparando diferentes fluídos. Para realização dos ensaios utilizando elemento poroso e saturação com glicerina (Figura 5.27.a), de forma a garantir a saturação, foram realizados pré-furos até o nível d'água, encontrado a 6 m de profundidade. Apesar de todos os cuidados as respostas nos dois ensaios foram consideradas inadequadas, não retratando a variação das camadas indicadas pelos registros de  $R_f$  e de resistividade.

De forma oposta, os resultados dos registros de poro-pressão obtidos com o uso do filtro de cavidade preenchido com graxa (Figura 5.27.b,c) mostram comportamento adequado e coerente com as interpretações dos registros de  $R_f$  e da resistividade, analisados previamente. Considera-se o registro coerente quando os picos são claros e bem definidos, marcando a transição de camadas e fornecendo dados importantes para a interpretação estratigráfica.

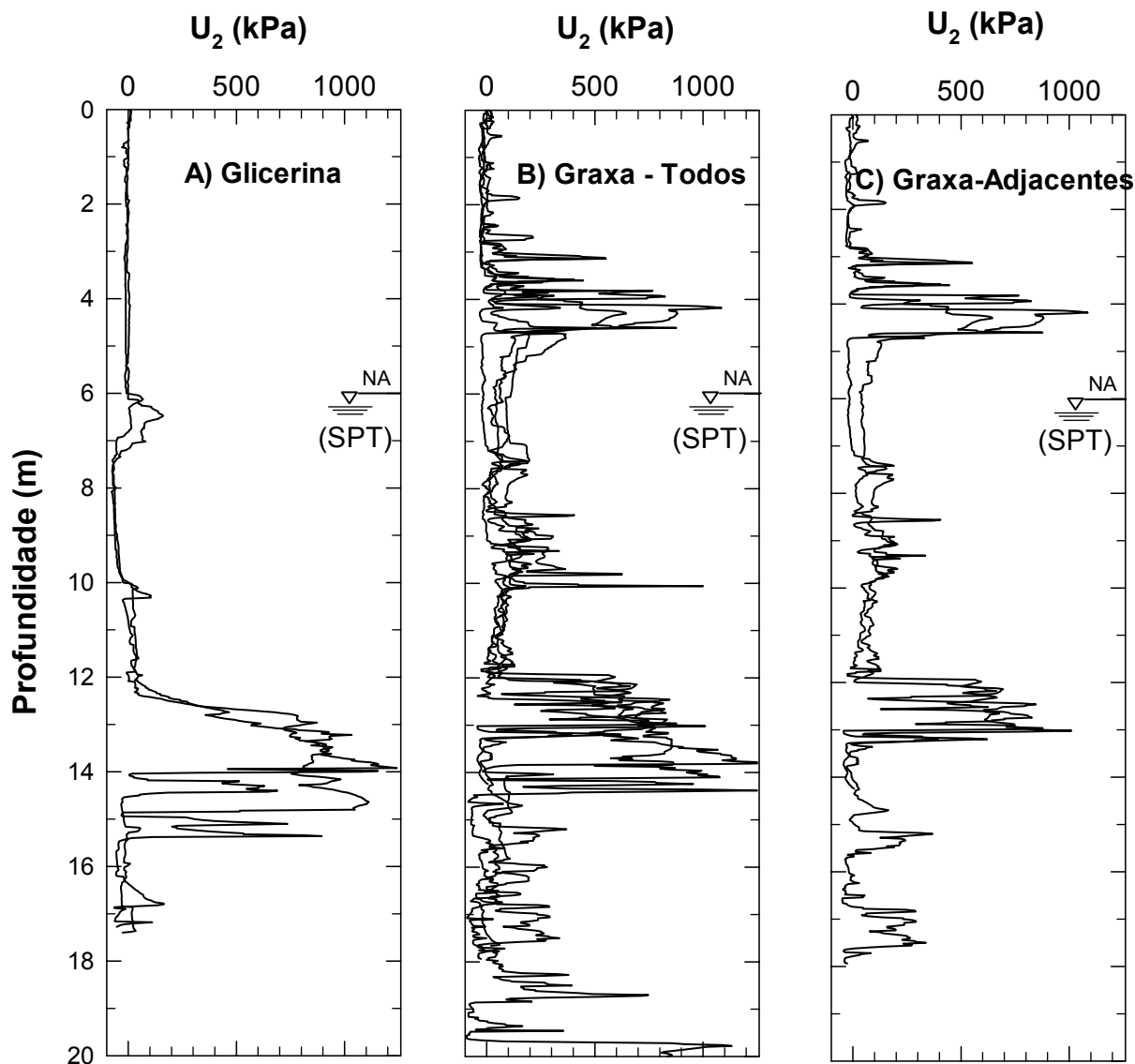


Figura 5.27 - Registro de poro-pressão obtidos a partir dos ensaios de piezocone. (A) Ensaio realizado com glicerina, (B) com graxa e (C) com graxa próximos entre si. Sítio São Paulo.

Os resultados mostrados na Figura 5.27.c, são de ensaios executados a uma distância de 1 m, ambos utilizando o filtro de cavidade preenchido com graxa automotiva e executados diretamente a partir da superfície do terreno, sem pré-furos. Verificou-se que existe boa repetibilidade e as tendências e valores da poro-pressão são muito semelhantes, mostrando que o recurso de graxa apresentou respostas melhores que o procedimento convencional com glicerina, neste tipo de sedimento. Larson (1995) mostra diversas situações onde o uso do filtro de cavidade com graxa é recomendado em substituição ao filtro convencional com glicerina, mostrando respostas mais coerentes. A presença de solos muito abrasivos pode fechar as cavidades do elemento poroso impedindo o registro da poro-pressão, principalmente no tipo de filtro utilizado confeccionado com latão sinterizado, que apresenta elevada ductilidade. Isto pode

ser relacionado ao tipo de solo, de constituição com fragmentos de rochas e pedregulhos, indicativos de ambiente de elevada energia, conforme descrito na caracterização geológica do sítio.

Simultaneamente aos ensaios de piezocone de resistividade foram realizados ensaios de dissipação do excesso da poro-pressão, que permitem determinar o coeficiente de adensamento e a permeabilidade em solos argilosos saturados. As Figuras 5.28 e 5.29 mostram o resultado de comparações entre dois ensaios de dissipação. Aspecto interessante, é que neste sítio as elevações da poro-pressão, que indicam solos pré-adensados, são também registradas nos ensaios com graxa, diferente dos resultados obtidos no Sítio Curitiba.

Na Figura 5.28 são mostrados resultados de ensaios de dissipação comparando o uso da glicerina e o uso da graxa, em gráfico da poro-pressão contra o tempo. As curvas apresentam mesmo comportamento, com elevação inicial da poro-pressão mais pronunciada no ensaio com graxa, porém com resultados no tempo de dissipação diferentes. Este comportamento pode estar ligado ao registro inadequado da poro-pressão nos ensaios executados com glicerina, conforme abordados anteriormente.

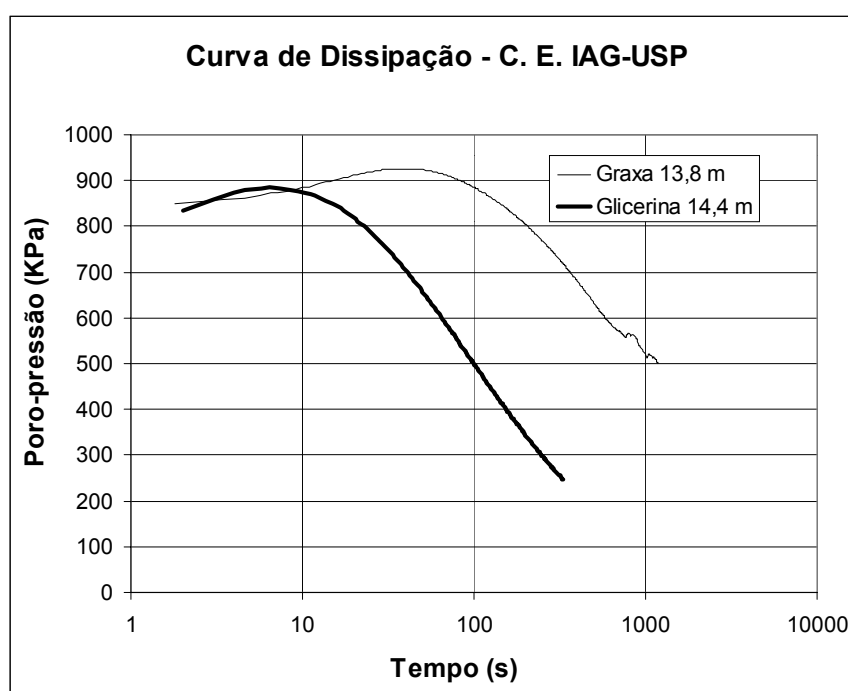


Figura 5.28 Comparação entre resultados de dois ensaios de dissipação realizados com graxa e glicerina. Poro-pressão *versus* tempo. Sítio São Paulo.

Na Figura 5.29 ensaios de dissipação executados com graxa e com glicerina são comparados com a curva teórica definida por Houlsby & Teh (1988), em gráfico da poro-pressão

normalizada contra fator tempo, e mostram resultados razoavelmente coerentes entre curvas teórica e experimental, tanto para graxa como para glicerina.

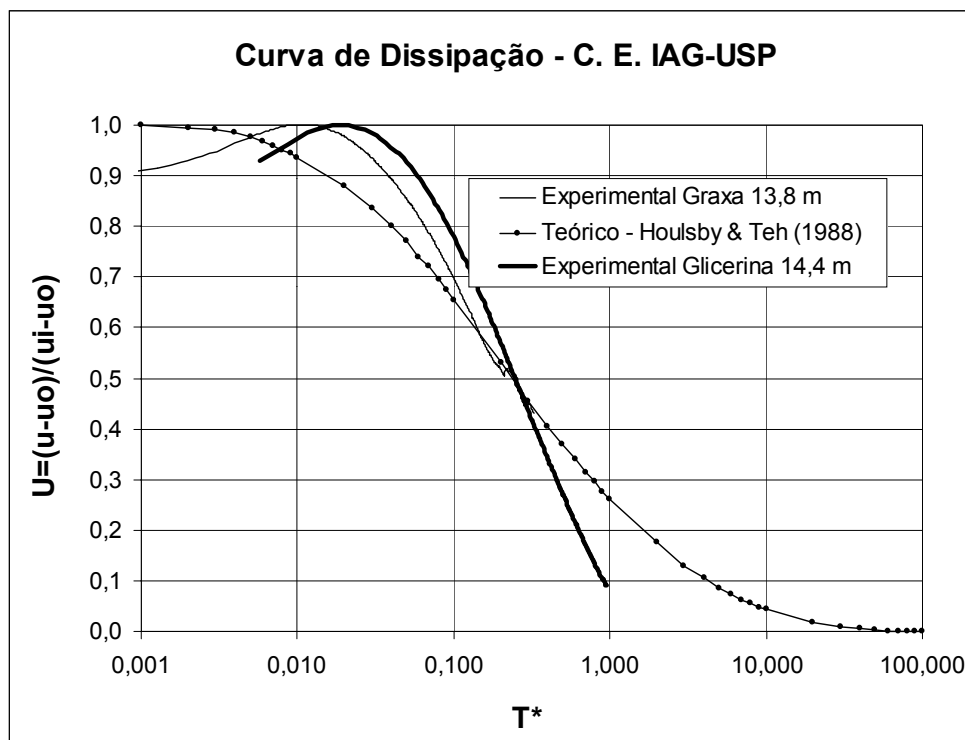


Figura 5.29 Comparação entre resultados de dois ensaios de dissipação realizados com graxa e glicerina. Poro-pressão normalizada *versus* fator tempo. Sítio São Paulo.

Na Tabela 5.4 são comparados parâmetros de adensamento e coeficiente de permeabilidade, determinados a partir dos resultados de dois ensaios que empregaram técnicas distintas para registro da poro-pressão, graxa e glicerina. O resultado mostra valores razoavelmente semelhantes, especialmente para o coeficiente de permeabilidade, com diferença menor que uma ordem de grandeza.

Tabela 5.4 - Parâmetros obtidos a partir dos ensaios de dissipação do excesso de poro-pressão realizados com diferentes técnicas no Sítio São Paulo.

<b>Fluído</b>	<b>Prof. (m)</b>	<b><math>c_h</math> (<math>m^2/s</math>)</b>	<b><math>k</math> (m/s)</b>
<i>Glicerina</i>	14,4	$9,1 \times 10^{-6}$	$6,0 \times 10^{-7}$
<i>Graxa</i>	13,8	$8,7 \times 10^{-7}$	$2,1 \times 10^{-7}$

### **5.3 Sítios em sedimentos quaternários de planícies litorâneas**

#### **5.3.1 – Considerações gerais**

Os dois sítios apresentados até aqui, Curitiba e São Paulo, são característicos de solos sedimentares de Bacias Terciárias Tafrogênicas com modificação pouco intensa pela ação do intemperismo e da morfogênese. Os próximos três sítios: Paranaguá, Guarujá e Caravelas representam terrenos tipicamente sedimentares quaternários de planícies costeiras, ou litorâneas, formadas em ambientes litorâneos, sob influência das flutuações do nível médio dos mares nos últimos 120.000 anos, e sem influência direta do intemperismo. As abordagens aplicadas tem enfoque estratigráfico porém, são também analisados a identificação de plumas de contaminação (Sítio Paranaguá), a influência nas correlações de parâmetros geotécnicos (Sítio Guarujá) e o uso dos resultados do piezocone para análises estratigráficas e paleoambientais (Sítio Caravelas).

#### **5.3.2 Sítio Paranaguá**

##### **5.3.2.1 Localização e abrangência da pesquisa**

O local estudado situa-se próximo ao cais do porto de Paranaguá (PR) (Figura 5.30), em sedimentos quaternários da planície litorânea, caracterizados pela alternância de camadas argilosas e arenosas que recobrem rochas granito-gnássicas do embasamento cristalino pré-cambriano. O interesse específico por este sítio surgiu em função de problemas de contaminação da água de poços tubulares rasos para uso industrial na região do Porto de Paranaguá, especialmente nos terrenos da Cooperativa Coamo. A perfuração indiscriminada de poços e o bombeamento excessivo resultaram na contaminação do aquífero pela intrusão de cunhas de água salgada. Análises e monitoramentos em diversos poços indicaram que os teores de sal variaram sensivelmente ao longo do ano, podendo esta variação estar vinculada à intensidade de bombeamento, aos níveis de precipitação pluviométrica ou às variações das marés, contribuindo simultaneamente para o problema. Foram programados ensaios para identificar a extensão e nível das contaminações, e orientar a locação de novos poços. Estudos em imagens de satélite indicaram grandes lineamentos estruturais, que orientaram a locação das linhas para os ensaios geofísicos de caminhamento elétrico em superfície e condicionaram a locação de poços profundos. Os resultados destes ensaios geofísicos de superfície conduziram à identificação de grandes contrastes de resistividade, porém não apresentaram resolução suficiente para identificar a estratigrafia da área. Para detalhamento do perfil estratigráfico foram realizados ensaios com

piezocone de resistividade (RCPTU), localdos sobre as linhas de caminhamento elétrico, e posicionados em função dos contrastes indicados nos resultados dos ensaios de geofísica de superfície.

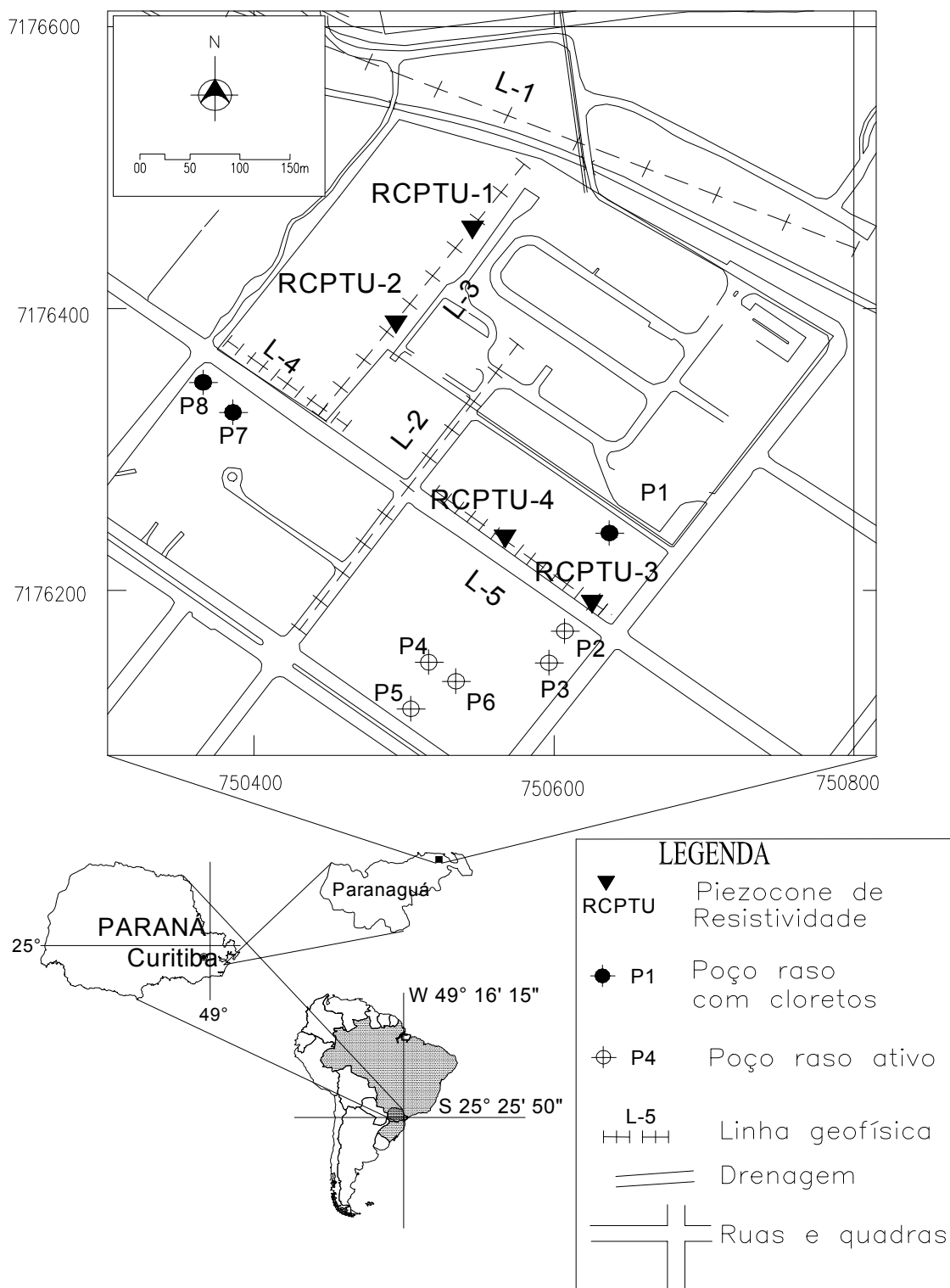


Figura 5.30 Mapa com a localização da área e dos ensaios executados, indicando os poços ativos e aqueles paralisados por contaminação com cloretos. Sítio Paranaguá.

Foram levantadas cinco linhas de sondagens geofísicas pela técnica de caminhamento elétrico, arranjo dipolo-dipolo, quatro ensaios RCPTU e análises físico-químicas em amostras de água coletadas nos poços rasos. Os ensaios com o piezocone de resistividade avançaram até a capacidade de reação do penetrômetro e atingiram profundidades que variaram de 27 a 34 m. Os resultados dos ensaios RCPTU foram interpretados utilizando a proposta de Robertson *et al.* (1986), que classifica os solos a partir dos valores da razão de atrito e da resistência de ponta, possibilitando assim fazer a interpretação do perfil estratigráfico perfurado.

Na Figura 5.31 tem-se os resultados de dois ensaios RCPTU realizados na área investigada. Nela tem-se a variação com a profundidade da resistência de ponta corrigida ( $q_t$ ), da razão de atrito ( $R_f$ ), da poro-pressão ( $u$ ), da resistividade ( $R$ ) e de seu inverso, a condutividade elétrica ( $C$ ). A interpretação dos resultados dos 4 ensaios RCPTU realizados, indica um comportamento semelhante das unidades em toda a área investigada, caracterizada basicamente por camada arenosa superficial até 13 a 14 m de profundidade, seguida de camada argilosa até profundidades de 23 a 27 m, e novamente uma camada arenosa a partir desta profundidade, até o limite dos ensaios.

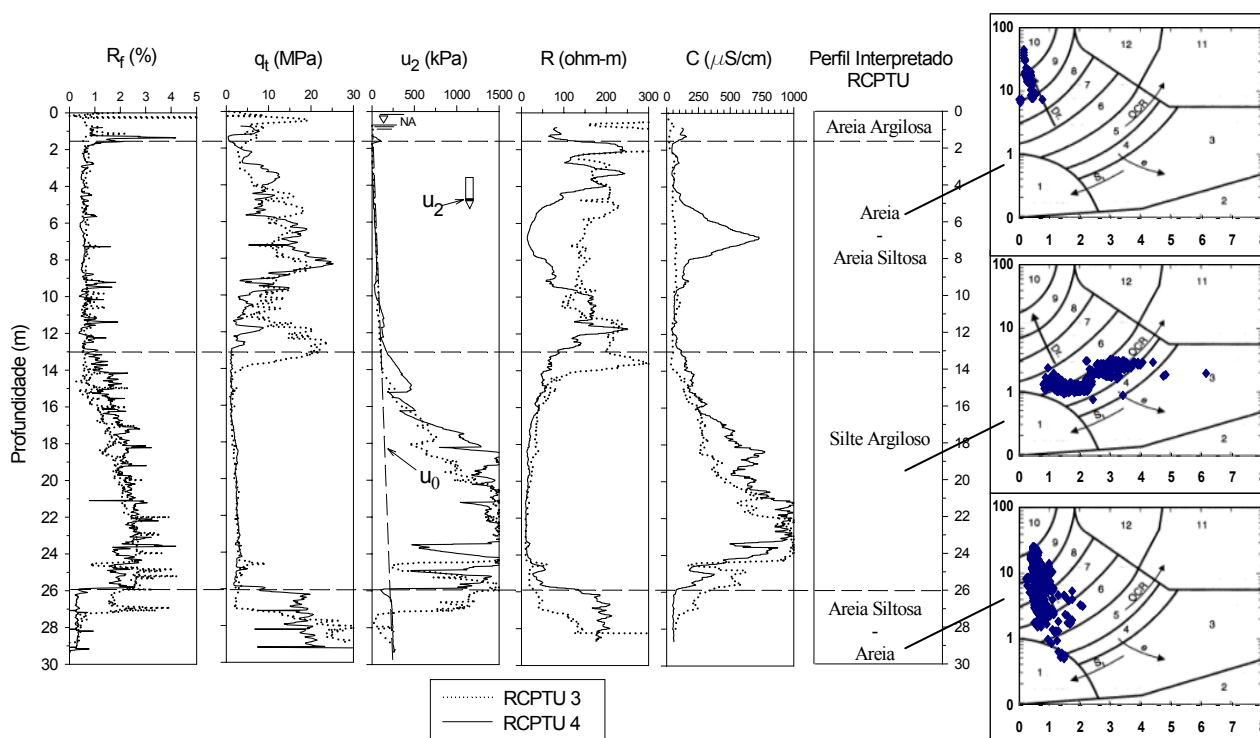
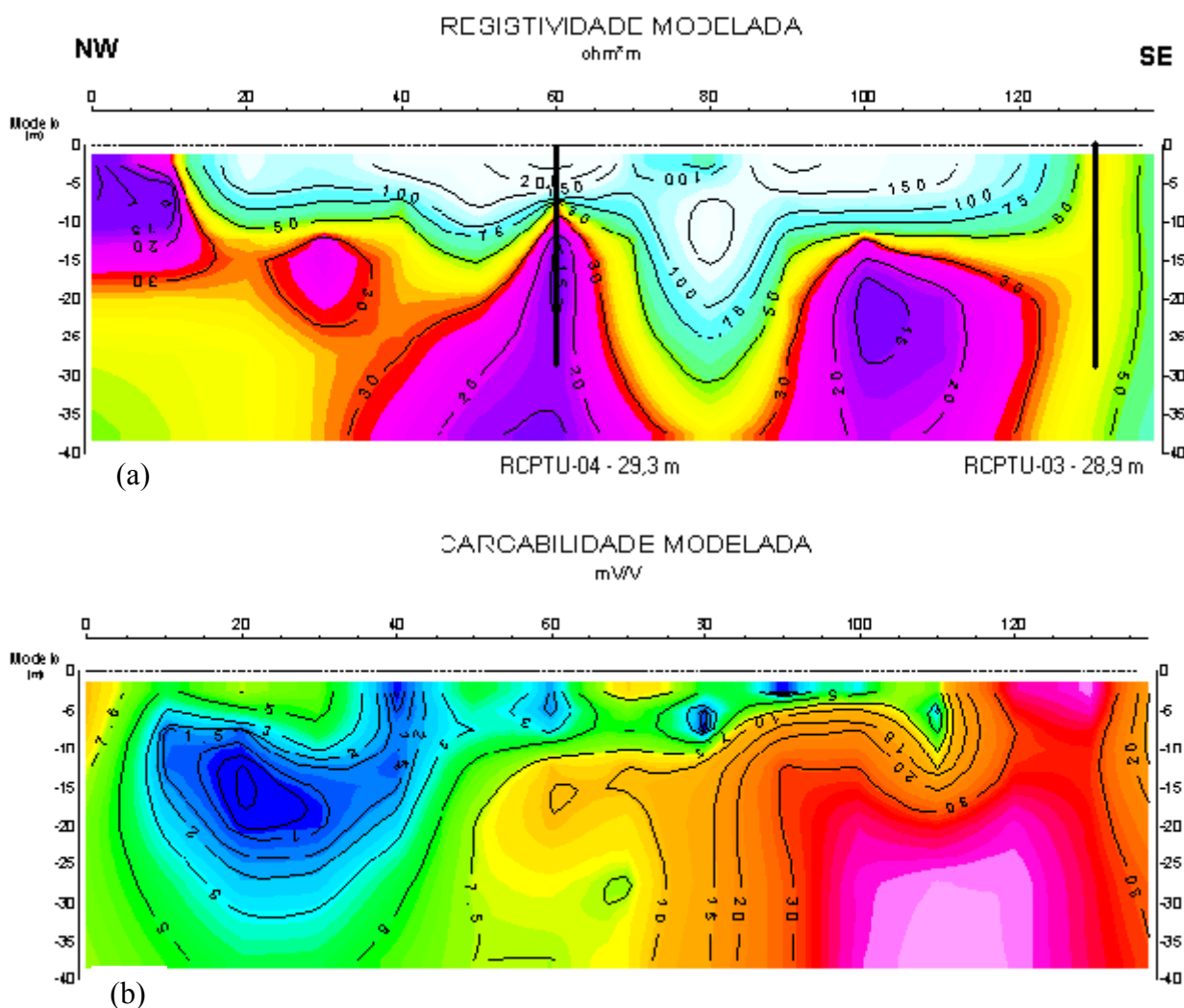


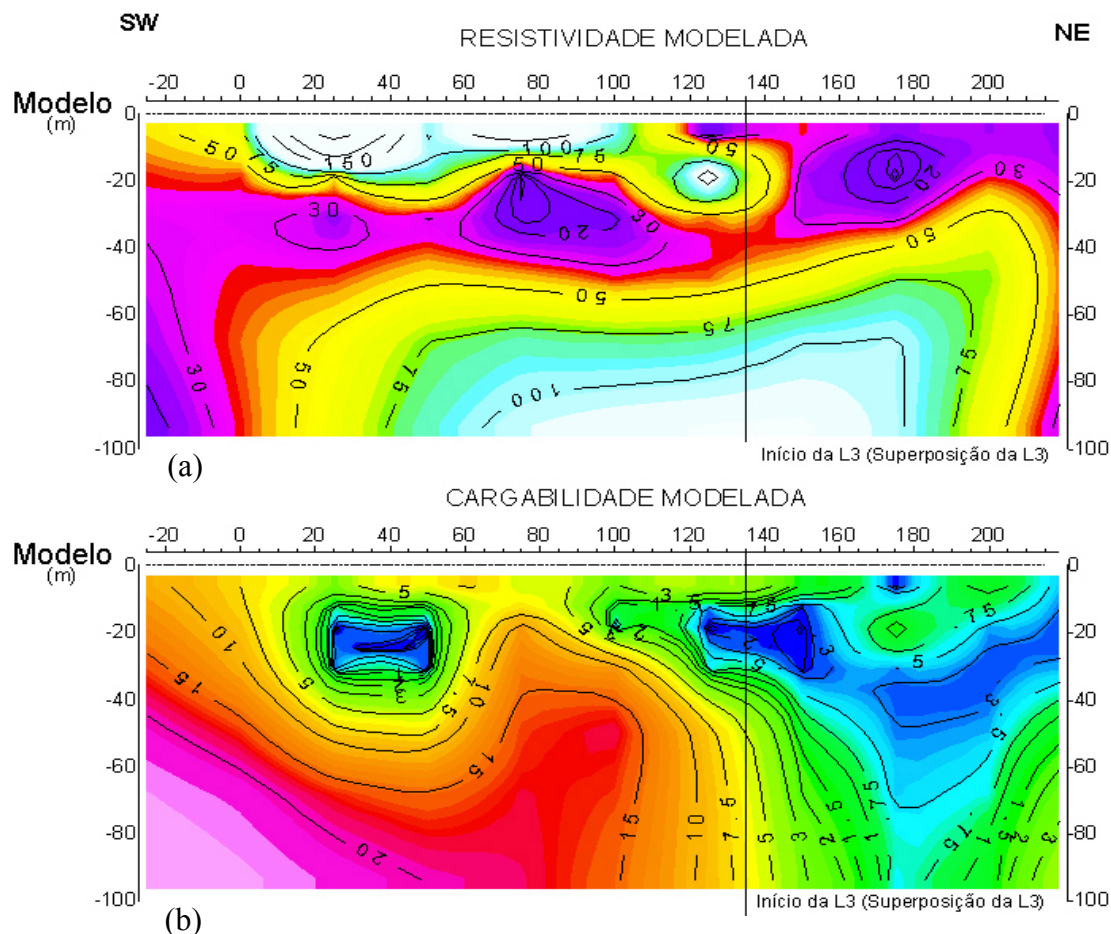
Figura 5.31 Resultado dos ensaios com o piezocone de resistividade RCPTU-3 e RCPTU-4 interpretados para identificação do tipo de solo utilizando o ábaco de classificação proposto por Robertson *et al.* (1986)



A interpretação dos resultados dos ensaios RCPTU foi realizada segundo duas abordagens distintas. A primeira inclui a interpretação do perfil estratigráfico, com reconhecimento das transições entre as camadas e as classificações dos sedimentos. A segunda analisa os resultados do perfil de resistividade, confrontando-os com o perfil estratigráfico e com os valores de referência disponíveis na literatura. Os resultados dos ensaios de caminhamento elétrico são apresentados na forma de pseudo-seções e modelos de profundidade, obtidos pelo método da inversão. Para cada um dos perfis foi possível elaborar os modelos de resistividade e de cargabilidade. As Figuras 5.32 e 5.33 mostram os resultados interpretados dos ensaios de caminhamento elétrico realizados nas linhas L-5 e L-2, que são representativas do comportamento da resistividade (a) e da cargabilidade (b) na área investigada.



Figuras 5.32 Interpretação dos resultados dos ensaios de caminhamento elétrico na linha L-5 mostrando a posição do ensaio RCPTU-4 e RCPTU-3, com indicação dos modelos de profundidade, obtidos por inversão, (a) da resistividade e (b) da cargabilidade. Sítio Paranaguá.



Figuras 5.33 Interpretação dos resultados dos ensaios de caminhamento elétrico na linha L-2, com indicação dos modelos de profundidade, obtidos por inversão, (a) da resistividade e (b) da cargabilidade. Sítio Paranaguá.

Foram realizadas análises físico-químicas para controle e monitoramento da qualidade da água em diferentes épocas do ano e em diferentes poços existentes no local. A Tabela 5.5 mostra o resultado de algumas das análises realizadas, em três datas distintas, para cada um dos poços indicados, mostrando variações sensíveis nos teores de cloreto e nas medidas de condutividade elétrica.

Tabela 5.5: Teores de cloreto e condutividade elétrica da água coletada em diferentes poços e em diferentes épocas.

Poço	Prof.(m)	19/03/02		30/10/02	10/06/03	
		C	Cl	Cl	C	Cl
1	20.00	1382.00	310,84	788,16		
2	20.00	144,8	28,25	35,2	314.00	44,67
3	20.00	149,9	21,19	37,28	194,3	20,64
4	21.00	296.00	49,45	79,92		
5	19.00	313.00	49,45	76,28	449.00	54,44
6	20.00	196,3	35,32	44,04	254.00	33,68
7	24.00	3900.00	1186,84	651,92	1961.00	306,97
8	18.00	1872.00	1208,03	312,88	2810.00	512,32

Cl – Cloretos (mg/l), C – Condutividade elétrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

### 5.3.2.2 Caracterização geológica

O perfil geológico do local investigado é característico de extensas regiões litorâneas brasileiras, com intercalações de camadas de material fino (argilas e siltes) e camadas de material grosso (areias e pedregulhos), refletindo a história de formação destes sedimentos, que está ligada aos ciclos de transgressão e regressão marinhos ocorridos durante o Quaternário (Massad et al., 1996). Os trabalhos de Angulo & Suguio (1994) e Angulo & Lessa (1997) mostram que a deposição dos sedimentos, bem como a natureza dos diversos ambientes sedimentares está associada às flutuações do nível médio dos mares, ocorridas principalmente durante os últimos 120.000 anos. Os perfis dos ensaios RCPTU indicam claramente estas alternâncias de materiais, além disto os resultados dos ensaios de caminhamento elétrico indicam um contexto geológico mais complexo, inclusive com um provável fraturamento vertical, que pode estar controlando a migração da água salgada, identificada também em um poço profundo (150 m), com entradas de água em fraturas das rochas cristalinas pré-cambrianas.

Tendo como base a interpretação geológica do terreno, a investigação detalhada do subsolo conduziu à identificação do perfil estratigráfico, com base na interpretação dos valores de  $q_c$ ,  $f_s$ ,  $u$  e resistividade, essa última permitiu identificar regiões da área em estudo onde ocorrem diferentes concentrações salinas. Os resultados dos ensaios com o piezocone de resistividade contribuíram efetivamente para este estudo, pois forneceram informações sobre a estratigrafia e resistividade elétrica simultaneamente. Amorosi & Marchi (1999) correlacionam resultados de 234 ensaios de piezocone com 17 sondagens com amostragem integral e descrição criteriosa, na planície aluvial do Rio Pó (Itália), concluindo que os resultados dos ensaios de piezocone tem elevado potencial para a avaliação e interpretação estratigráfica, desde que devidamente calibrados com amostragens contínuas do solo e com uso do conhecimento da história e dos ambientes geológicos. Considerando alguns conceitos expostos por estes autores o perfil estratigráfico da área foi interpretado com base nos resultados dos ensaios de piezocone de resistividade. O resultado do ensaio RCPTU-1, apresentado na Figura 5.34, por ser o que atingiu maior profundidade e por ser semelhante aos demais, é discutido com detalhes para a descrição dos estratos.

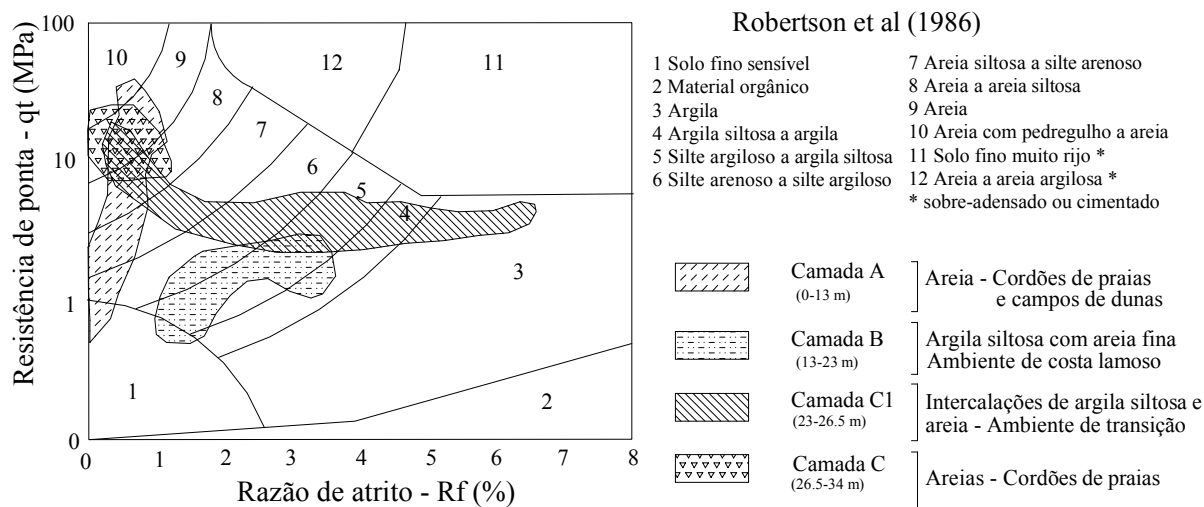
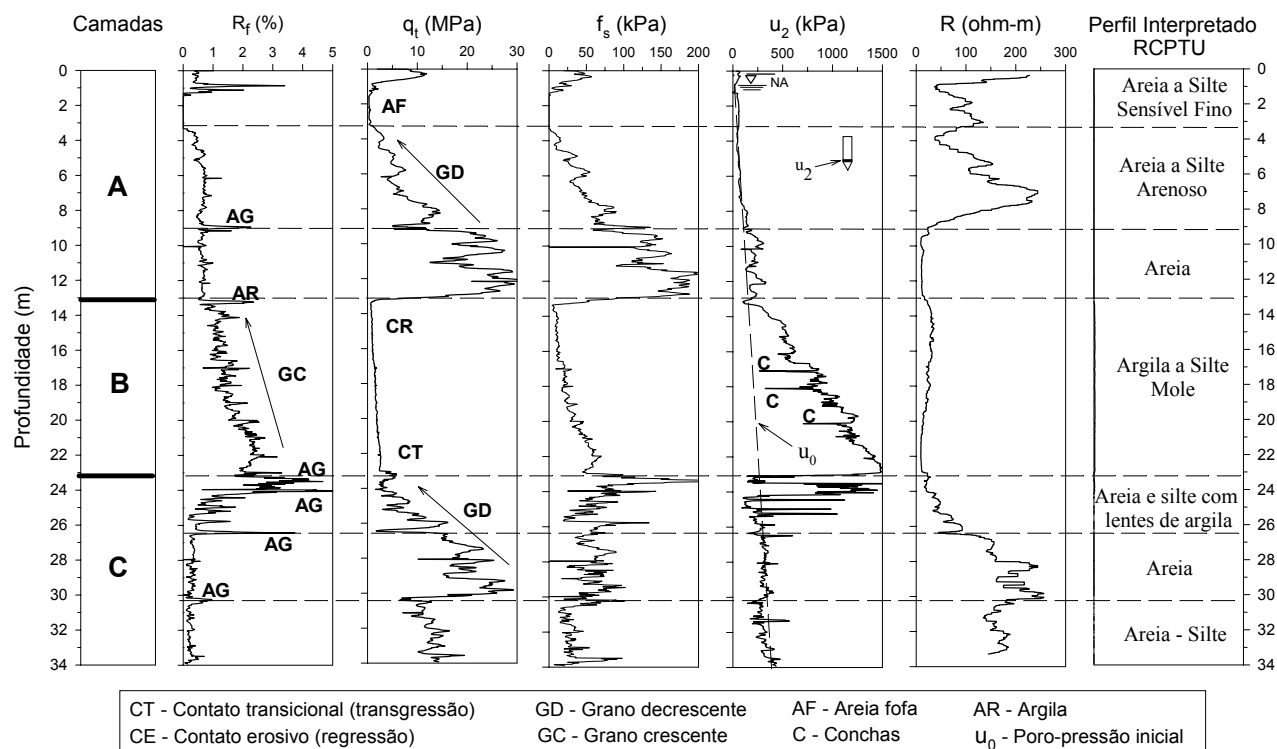


Figura 5.34. Resultado de ensaio de piezocone de resistividade RCPTU-1 com interpretação para definição de perfil estratigráfico utilizando o ábaco de classificação de Robertson et al. (1986), com indicação dos prováveis ambientes de sedimentação. Sítio Paranaguá.

Assim, de uma maneira geral, o perfil pode ser compartimentado em três principais horizontes, sendo o horizonte A de 0 a 13 m, arenoso; o horizonte B de 13 a 23 m, argilo-siltoso; e o horizonte C de 23 a 34 m também arenoso (Figura 5.34). Cada uma destas camadas de sedimento é descrita pelo grau de homogeneidade, tipo de contato, composição granulométrica (através da  $R_f$ ), resistência (através de  $q_t$  e  $f_s$ ) e permeabilidade (através de  $u$ ).

Na camada inferior (C) predominam areias com resistência de ponta entre 5 e 25 MPa. Os principais indicadores que permitem esta classificação são a razão de atrito baixa ( $R_f$  entre 0,5 e 1 %) e a ausência de excesso de poro-pressão ( $\Delta u = u_2 - u_0$ ). Nas porções mais superiores desta camada, entre 23 e 25 m, ocorrem intercalações de camadas argilo-siltosas. Estas intercalações são indicativas do início da transgressão marinha e representam prováveis ambientes lagunares formados em picos de ingressão marinha, durante a fase transgressiva. No interior deste pacote arenoso, podem ser identificadas duas interfaces, uma a 26 m e outra a 30 m de profundidade, que podem ser indicativas de flutuações do nível médio marinho (NMM), em um mesmo ambiente, porém com intensidade de energia distinta. Como a razão de atrito ( $R_f$ ) é praticamente constante e observam-se variações nos valores da resistência de ponta e do atrito local, considera-se que a camada de areia, entre 30 a 34 m, tem granulometria mais fina que a camada de areia, entre 23 m e 30 m. Nesta última camada a granulometria é granodecrescente, em rumo ao topo, com transição gradual para o pacote B, tipicamente de constituição argilo-siltosa. Na camada intermediária (B), predominam solos finos com resistência de ponta variável entre 1 e 3 MPa. Os principais indicadores da camada são as resistências de ponta e atrito lateral baixos, com  $R_f$  variável de 1 a 2,5 % e excesso de poro-pressão durante a cravação do piezocone. A poro-pressão e a razão de atrito crescentes rumo a base, podem sugerir que o teor de argila seja mais elevado nas porções inferiores da camada, com alguma contribuição da tensão vertical efetiva. A constituição granulométrica e o grau de homogeneidade indicam ambiente tranquilo de deposição, provavelmente em baías fechadas, com pouca interferência de tempestades. Nas profundidades de 17, 18 e 20 m ocorrem quedas abruptas da poro-pressão, com pouco ou nenhum reflexo nos demais sensores. Amorosi & Marchi (1999) identificaram feições semelhantes em níveis conchas. A transição para o pacote A é abrupta, de caráter erosivo e marcada fortemente pelos valores de  $q_b$ ,  $f_s$  e  $u$ . Picos de 3 a 6 % na razão de atrito ( $R_f$ ) podem indicar camadas francamente argilosas, formadas em ambientes lagunares de transição.

Na porção superior (A), entre 0 e 13 m de profundidade, predominam solos arenosos. Observa-se um caráter granodecrescente rumo ao topo. No trecho de 1 a 3 m ocorre material de resistência muito baixa, provavelmente areia fofa de dunas ou praias, devido ao baixo  $R_f$ , penetração drenada ( $\Delta u=0$ ) e  $q_t$  muito baixo.

### 5.3.2.3 Caracterização da contaminação

A presença de poços de abastecimento que originalmente apresentavam água potável e que atualmente estão contaminados com água salobra, é o principal indício de ocorrência de intrusões com teores elevados de cloretos no aquífero superficial, estendendo-se inclusive para o aquífero de fissura profundo no embasamento cristalino pré-cambriano. Considerando que o modelo de fluxo preferencial é no sentido do continente (água doce) para o mar (água salgada), presume-se que a perfuração e o bombeamento dos poços tiveram influência marcante no desenvolvimento dessas plumas, com eventuais interferências das variações climáticas sazonais e das movimentações de maré. Contrastes marcantes de resistividade podem ser verificados, tanto nos perfis obtidos dos ensaios de caminhamento elétrico, como nas perfilagens com os ensaios RCPTU.

A resistividade modelada da linha de caminhamento elétrico L-2 (Figura 5.33) indica uma interface na profundidade de 20 m, separando terrenos mais resistivos em superfície, de terrenos mais condutivos em profundidade. Esta interface deve representar o contato entre águas doce e salobra. No extremo NE da L-2 (Figura 5.33) esta interface mais condutora tende a aflorar, sendo esta interpretação corroborada pela existência de vários poços contaminados e desativados (P-7 e P-8 na Figura 5.3.1). Na posição 80 m da linha L-5 esta interface tem aprofundamento abrupto, sugerindo um controle por fraturamentos. As medidas tomadas nas linhas L-4 e L-5 foram obtidas aproximadamente dois meses após o levantamento realizado nas linhas L-1, L-2 e L-3. Existe uma diferença de profundidade da interface resistiva entre as duas campanhas que sugere um processo hidrodinâmico intenso, onde os teores de sal podem variar em função do bombeamento dos poços, das condições climáticas sazonais e das variações das marés.

Na Figura 5.35 tem-se a interpretação dos quatro ensaios RCPTU realizados com o objetivo de identificar o perfil estratigráfico e a intrusão de água salgada. Na posição do ensaio RCPTU-1, o trecho entre 9 e 13 m de profundidade, de constituição arenosa, resistividade de 12 a 16 ohm.m, corresponde à região contaminada por água salobra. Uma camada de areia semelhante, no trecho de 25 a 37 m, mostra valores de resistividade mais elevados, de 200 a 250 ohm.m, que são valores típicos para água doce, conforme Davies & Campanella (1995).

A comparação entre os valores da resistividade, obtidos das sondagens com piezocone, com aqueles obtidos a partir do caminhamento elétrico, resultados semelhantes e variáveis de 2 a 200 ohm.m. As diferenças observadas entre os valores podem ser atribuídas ao caráter de maior detalhe nos ensaios RCPTU e às variações das plumas de contaminação.

A interpretação da estratigrafia a partir dos resultados dos ensaios RCPTU indica que a distribuição das camadas de areia e argila ou silte é relativamente homogênea, sem mudanças sensíveis na profundidade das camadas entre os ensaios realizados. A Figura 5.35 mostra uma seção geológica com indicação dos prováveis locais de intrusão de água salina no aquífero, que é responsável pela restrição ao uso de diversos poços de abastecimento. Os resultados dos ensaios de caminhamento elétrico mostraram contrastes de resistividade, com bolsões resistivos (100-200 ohm.m) em meio a porções condutivas. Estes bolsões devem estar associados a concentrações de água doce.

Campanella & Weemees (1990), em ensaios realizados no campo experimental da Fazenda *Mac Donald*, em depósitos arenosos glácio-marinhos da região de Vancouver (Canadá), encontraram valores de resistividade abaixo de 50 ohm.m correspondentes a sólidos dissolvidos totais acima de 500 mg/l, e valores de resistividade de 0,5 ohm.m correspondem à água salgada. No ensaio RCPTU-2, na camada arenosa, entre 9 e 14 m de profundidade, os valores de resistividade chegam a 3,3 ohm.m (condutividades elétricas de até 3000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), que são interpretados como região com presença de água salgada. Strutynsky *et al.* (1999), indicaram que concentrações máximas na água potável de 250 ppm de cloretos, devem corresponder a valores de resistividade entre 5 a 5,5 ohm.m. Os resultados das análises químicas realizadas nas amostras de água coletada dos poços indicaram teores variados de concentração salina nos diversos poços em diferentes épocas, conforme mostra os dados apresentados na Tabela 5.5. Esses resultados também indicam que ocorrem variações destes teores ao longo do ano.

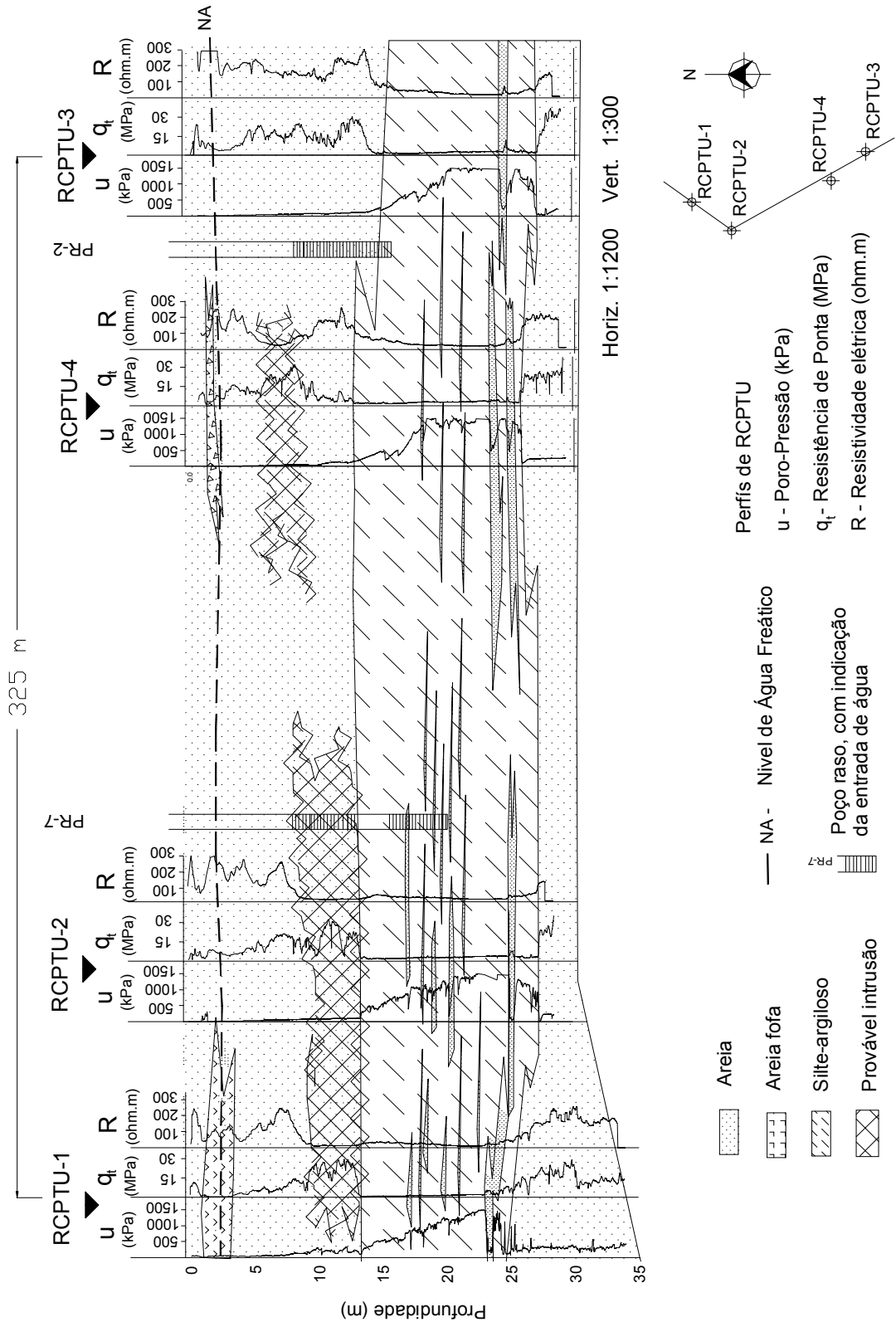


Figura 5.35. Interpretação de perfil estratigráfico, com base nos ensaios de piezocone de resistividade e indicação dos prováveis locais onde ocorre contaminação por água salgada no aquífero superficial. Sítio Paranaguá



### 5.3.3 Sítio Guarujá

#### 5.3.3.1 Considerações gerais

O sítio está localizado na região do Porto do Guarujá e os resultados aqui utilizados fizeram parte de trabalhos de investigação geotécnica para implantação da infraestrutura portuária. Foram selecionados um ensaio de piezocone, uma sondagem de simples reconhecimento com ensaio SPT e um perfil com cinco coletas de amostras indeformadas das argilas para ensaios de caracterização em laboratório. Os resultados desses ensaios são representativos das condições de solo de extensas áreas na região do Porto do Guarujá.

#### 5.3.3.2 Caracterização geológica

Os solos da região constituem sedimentos depositados em ambiente marinho e de transição principalmente durante o Quaternário, com influência marcante das variações climáticas e do nível médio dos mares ocorridas neste período (Suguio et al., 1985 e Angulo & Lessa, 1997), mostradas em maior detalhe, a seguir, na descrição do Sítio Caravelas (item 5.3.4). A relação entre a gênese dos solos do litoral do Brasil e suas características geotécnicas foi exposta em um simpósio realizado no Instituto de Engenharia do Rio de Janeiro, que congregou profissionais multidisciplinares e elucidou alguns aspectos genéticos de interesse para a geotecnia (Massad et al., 1996).

A Tabela 5.6 mostra as características dos sedimentos da área, indicando os ambientes e épocas de formação de cada tipo de sedimento. O mapa da Figura 5.36 mostra a distribuição dos sedimentos da planície litorânea no entorno do sítio investigado.

Massad et al. (1996) reconheceu íntimas correlações entre a gênese do solo e suas características geotécnicas. Esta relação permitiu interpretar mais de um ciclo de deposição dos sedimentos da planície litorânea, corroborando dados de variações do nível do mar no período (Suguio et al., 1985) e explicando algumas características destes solos. O pré-adensamento de muitas argilas está ligado a flutuação do NMM e a formação e migração de dunas durante o Quaternário. Massad et al. (1996) admitem duas fases de deposição dos sedimentos: a primeira, com idades de 120.000 anos, com argilas e areias transicionais (AT), denominado Formação Cananéia, e a segunda, com idades de 7.000 anos, com sedimentos de baías e de retrabalhamento das argilas transicionais (SFL), denominada Formação Santos.

Tabela 5.6 – Características dos sedimentos na região do sítio Guarujá. (Massad, 2004, modificado)

Idade	Solo	Características
Holoceno	Argilas	Mangues recentes com sedimentos de consistência de vasa, muito moles e distribuídos de forma irregular sobre as areias e argilas da região.
	Argilas (SFL)	Formadas pelo retrabalhamento dos sedimentos pleistocênicos e por influência de rios, muito heterogêneos na consistência das argilas. Sedimentos de águas tranquilas, prováveis lagunas e baías fechadas. Camadas homogêneas de argilas moles a muito moles.
Pleistoceno	Areias	Terraços irregulares, $8 \pm 2$ m acima do atual nível do mar, sem matéria orgânica e ligados à dunas.
	Argilas Transicionais (AT)	Média a rijas com restos vegetais carbonizados. Eventuais nódulos de areia ou bolotas de argila na base. Ocorrem normalmente a profundidade superiores a 20 m.
	Areias	Terraços elevados 6 a 7 m acima do nível do mar atual. Cores amareladas em superfície tornando-se marrom escura a preta em profundidade

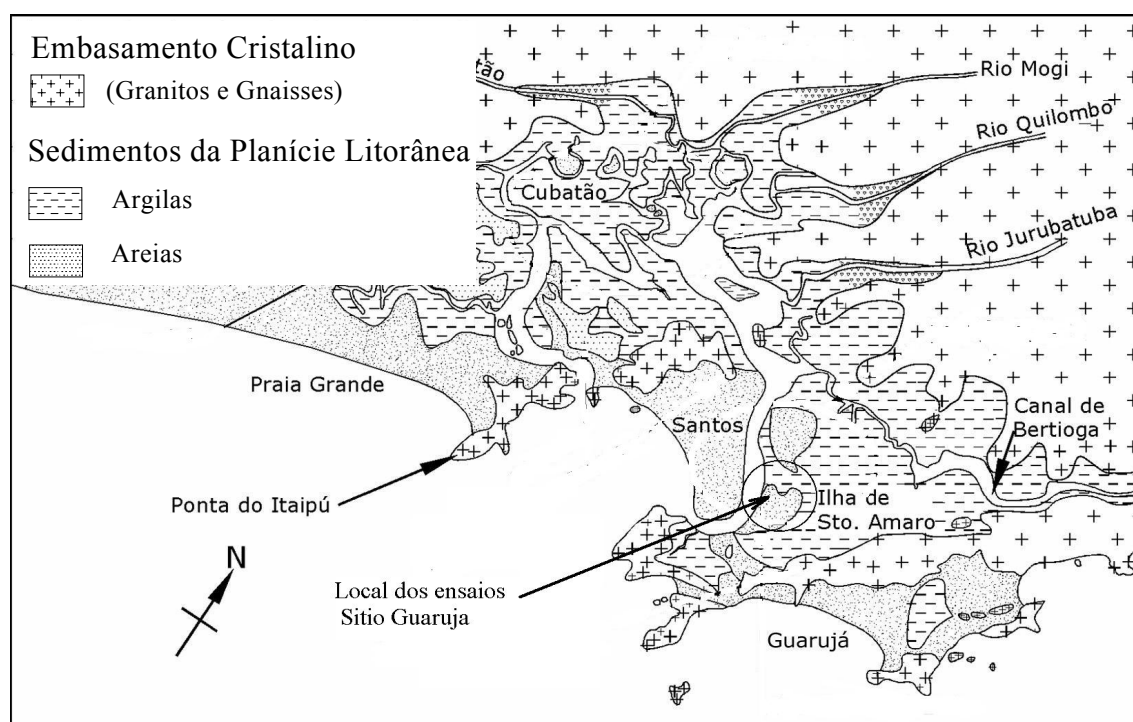


Figura 5.36 – Localização dos ensaios e distribuição dos sedimentos da planície litorânea. (modificado de Massad, et al., 1996)

Sondagens profundas realizadas no Sítio Guarujá atingiram espessuras de sedimentos de até 65 m, indicando até quatro conjuntos de pacotes de areia e argila, cuja interpretação pode caracterizar quatro ciclos importantes de transgressão e regressão marinha, condicionando o processo de sedimentação.

### 5.3.3.3 Identificação do perfil estratigráfico

O perfil investigado situa-se predominantemente sobre os Sedimentos Lagunares (SFL) depositados em baías calmas em condições de estabilidade do ambiente que se refletem na constituição das camadas de sedimento. A Figura 5.37 mostra uma comparação entre métodos para obter a profundidade das transições entre camadas a partir do resultado de ensaio de piezocone e de sondagem de simples reconhecimento, conforme procedimentos descritos no capítulo 4, Materiais e Métodos.

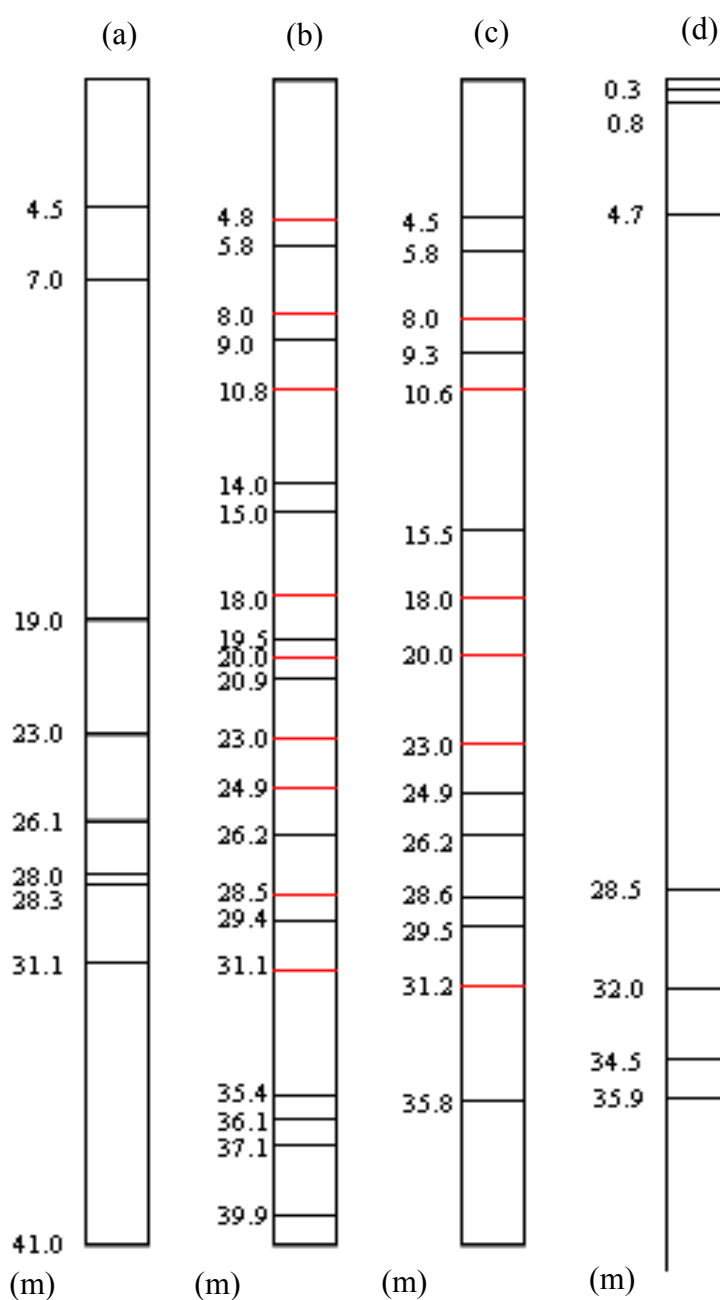


Figura 5.37- Comparação entre métodos para obter a profundidade das transições entre camadas a partir do resultado de ensaio de piezocone (CPTU-1). **(a)** – inspeção visual dos resultados, **(b)** – teste estatístico  $D^2$  com janela de 1 m, **(c)** - teste estatístico  $D^2$  com janela de 2 m e **(d)** – Sondagem de Simples Reconhecimento (SPT-1) Sítio Guarujá.

Observa-se na Figura 5.37, boa correspondência entre a posição das transições identificadas pelos diferentes métodos. Isto ocorre pois os contatos entre camadas são bem definidos e elas são caracterizadas por diferenças granulométricas sensíveis. Observa-se ainda, nesta figura, que as transições definidas a partir dos resultados dos ensaios de piezocone mostram maior detalhamento, permitindo a identificação de subcamadas. As transições definidas a partir da sondagem de simples reconhecimento não registram detalhes que são destacados a partir dos ensaios de piezocone, seja pela precisão do método ou pela ineficácia do critério táctil-visual utilizado na identificação de pequenas variações granulométricas, conforme observado no trecho entre 19 m e 30 m.

Diferentes sistemas de classificações foram aplicados a este perfil e são apresentados na Figura 5.38, indicando as posições das coletas das amostras indeformadas em blocos para ensaios de caracterização e classificação. Além disso, tem-se nessa figura o resultado da sondagem de simples reconhecimento e a interpretação do ensaio de piezocone com base nas propostas de Robertson et al. (1986) e Zhang & Tumay (1999). A porção mais superficial, até 28 m de profundidade, provavelmente é representada por sedimentos flúvio-lagunares (SFL), com argilas siltosas muito moles a moles. As porções inferiores provavelmente representam sedimentos pertencentes a unidade das areias transicionais (AT). Nas Figuras 5.37 e 5.38, observa-se que existe razoável correspondência entre a posição das transições principais indicadas na sondagem de simples reconhecimento e na interpretação do ensaio de piezocone. Os níveis de areia são facilmente identificáveis a partir dos vários procedimentos utilizados, mostrando distribuição característica no ábaco de classificação utilizado e nas probabilidades de tipos de solos com valores próximos a 100 %, conforme a proposta de classificação de Zhang & Tumay (1999), também mostrados na Figura 5.38. Nas camadas de sedimentos finos predomina a argila, porém as frações de areia e silte são persistentes e refletem-se de forma coerente na classificação probabilística.

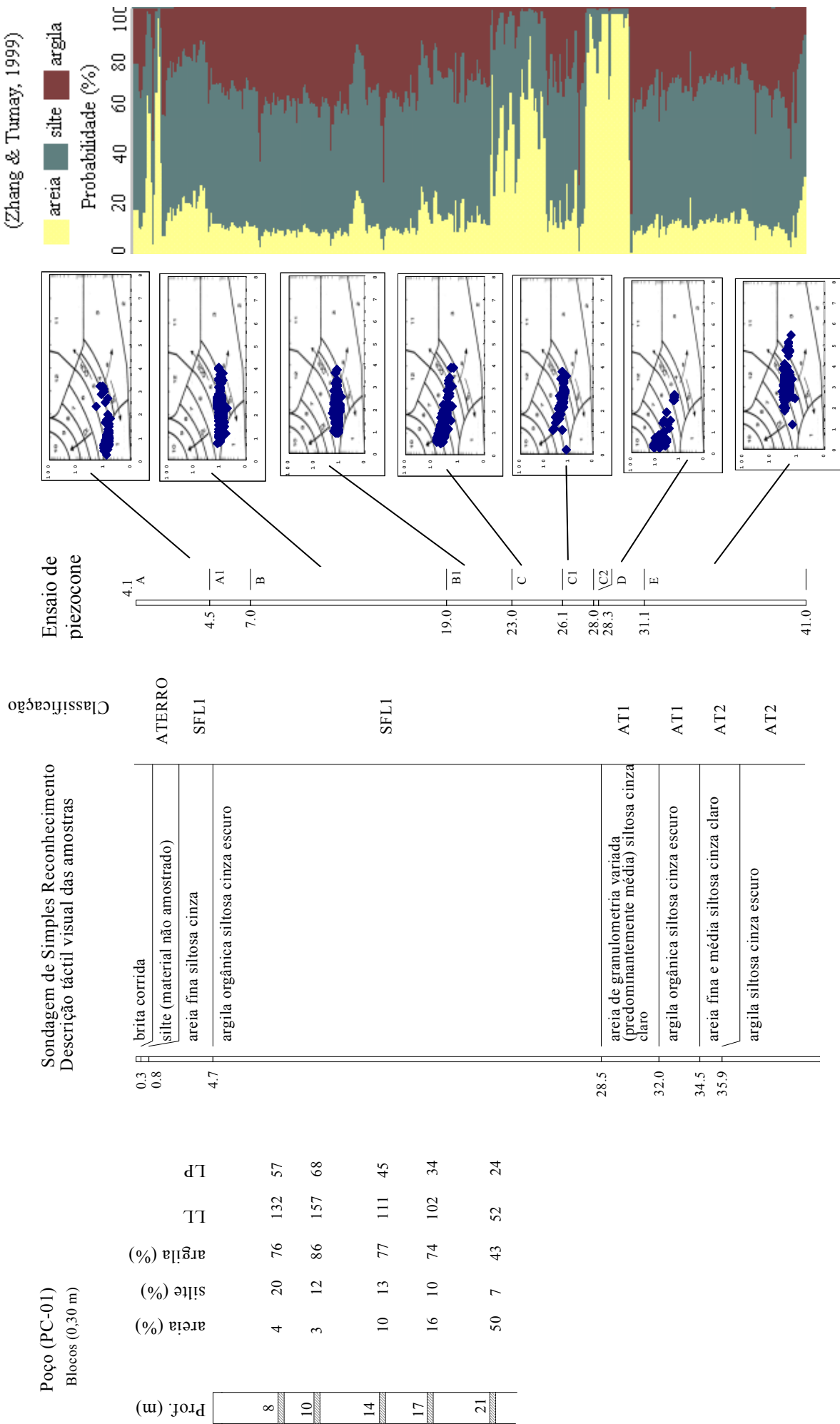


Figura 5.38 Comparação entre resultados de ensaios em laboratório, sondagem de simples reconhecimento e ensaio de piezocone. . Sítio Guarujá.

### 5.3.3.4 Correlações entre parâmetros

A disponibilidade de resultados de ensaios de SPT da sondagem de simples reconhecimento e de  $q_c$  do ensaio de piezocone, distantes 2 m um do outro, permitiu analisar a correlação entre estes parâmetros e compará-la com a previsão feita com base nas propostas de Robertson et al. (1983) e Jefferies & Davies (1993). A Figura 5.39 mostra a comparação dos diferentes critérios para estabelecer a razão  $q_c/N_{SPT}$ .

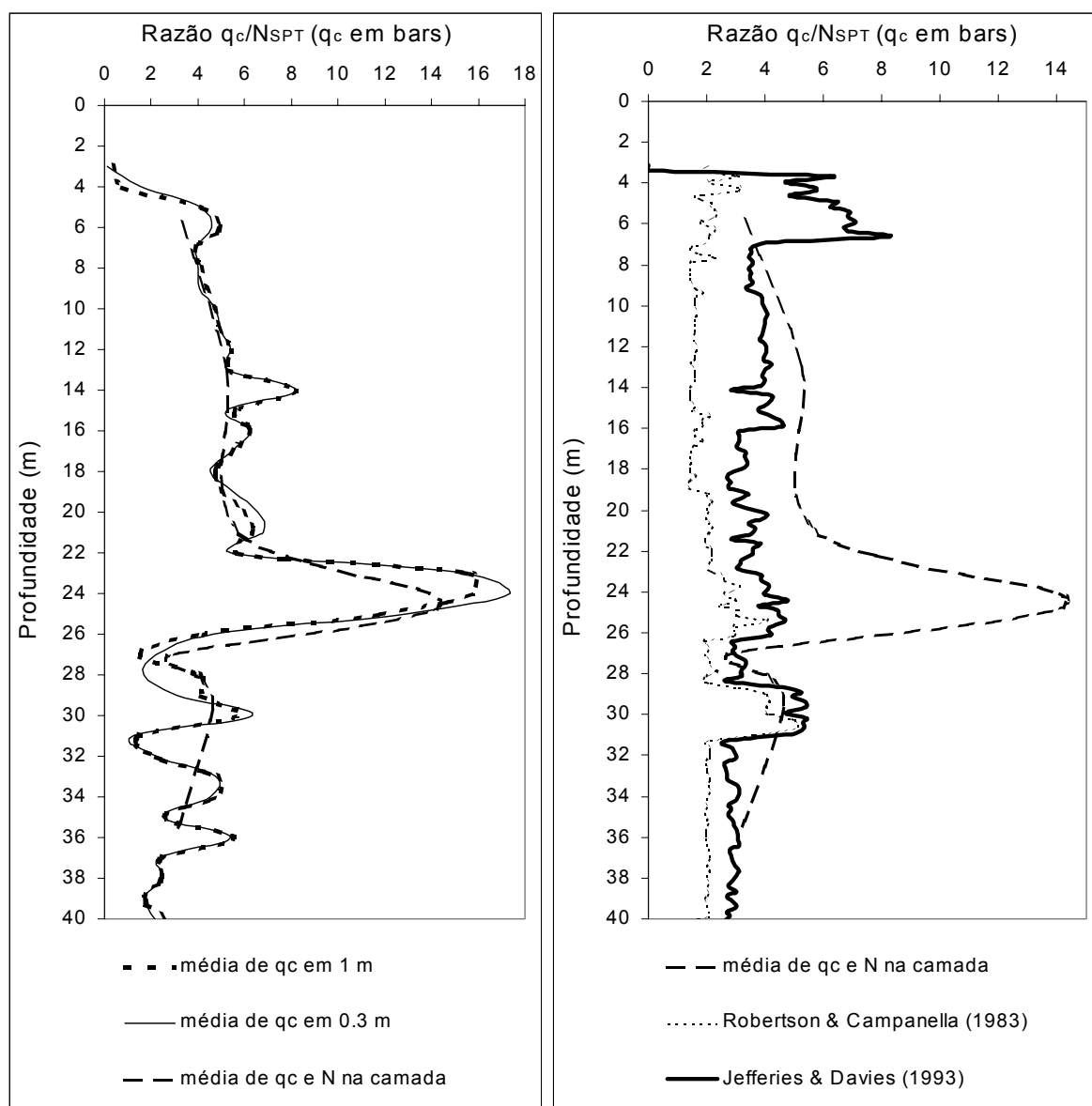


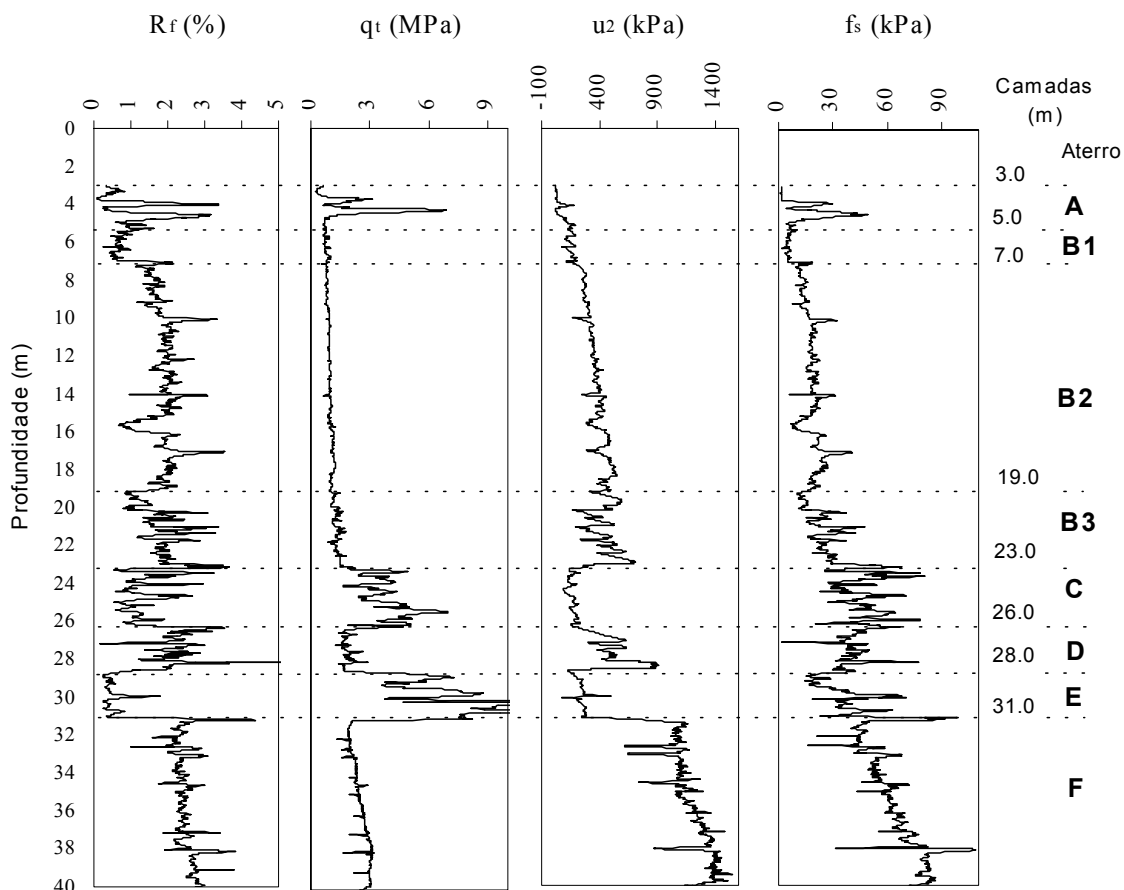
Figura 5.39 Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  comparando determinação em campo e previsão com base em correlações. Sítio Guarujá. CPTU-1 e SPT-1.

Os resultados apresentados nessa figura são coerentes entre si. Os picos indicados pelo critério da média em 0,30 m e pelo critério da média em 1 m (Figura 5.39.a) são praticamente coincidentes mostrando que a variabilidade nesta escala é pequena. Quando é utilizada a média dos parâmetros de cada camada ocorre suavização dos picos e maior semelhança com a previsão através da proposta de Jefferies & Davies (1993), que sistematicamente fornece valores acima da proposta de Robertson et al. (1983), conforme Figura 5.39.b. porém é necessário considerar que os valores de  $N_{SPT}$  não estão com energia de cravação corrigida, enquanto que as correlações utilizadas consideram uma eficiência de energia de 60%.

#### 5.3.3.5 Classificação estratigráfica do perfil

O resultado do ensaio de piezocone apresentado na Figura 5.40 é típico daqueles realizados em sedimentos de planícies costeiras brasileiras e, neste caso, as mudanças de materiais estão intimamente relacionadas às mudanças na energia do ambiente de deposição, ligadas às flutuações do NMM, conforme será detalhado, a seguir, no item 5.3.3 (Sítio Caravelas).

A transição entre as camadas e a diferenciação entre as principais classes de solos têm correspondência nos métodos de investigação utilizados (Figura 5.38). A definição da geometria das camadas em sub-superfície depende da quantidade e distribuição dos ensaios de campo (SPT ou CPTU) realizados na área e da interpretação dos ambientes de sedimentação. Modificações nas características geotécnicas dos sedimentos ocorreram devido às mudanças ambientais, como o pré-adensamento dos solos produzido pelas variações do nível médio dos mares.



Robertson et al (1986)

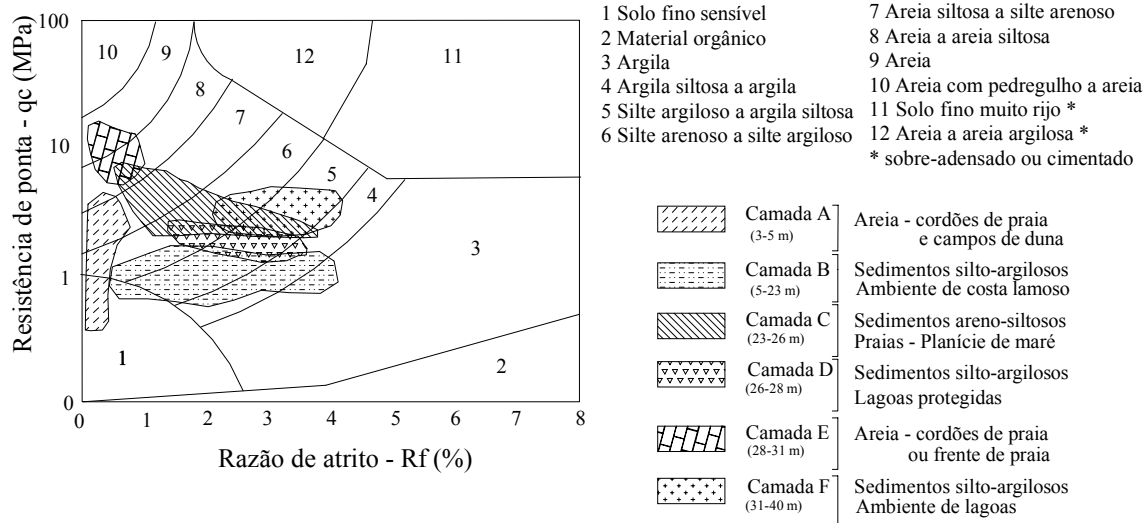


Figura 5.40 Resultado de ensaio de piezocone com interpretação para definição de perfil estratigráfico utilizando o ábaco de classificação de Robertson et al (1986), com indicação dos prováveis ambientes de sedimentação. Sítio Guarujá.



### 5.3.4 Sítio Caravelas

#### 5.3.4.1 Considerações gerais

A região de Caravelas situa-se no litoral sul do estado da Bahia, instalada sobre sedimentos litorâneos, recobertos em parte pelas escarpas ativas dos sedimentos cenozóicos da Formação Barreiras (Bigarella, 1975). A formação dos sedimentos que constituem o perfil investigado está intimamente ligada a história geológica de deposição e às variações do nível médio do mar (NMM) durante o Quaternário, conforme mostrado por Andrade et al (2003). É típico de extensas regiões da costa leste brasileira e corrobora os resultados anteriores de Martin & Suguio, 1986) e Angulo & Lessa (1997). A Figura 5.41 mostra a localização do Sítio Caravelas e a distribuição das principais unidades geológicas da área.

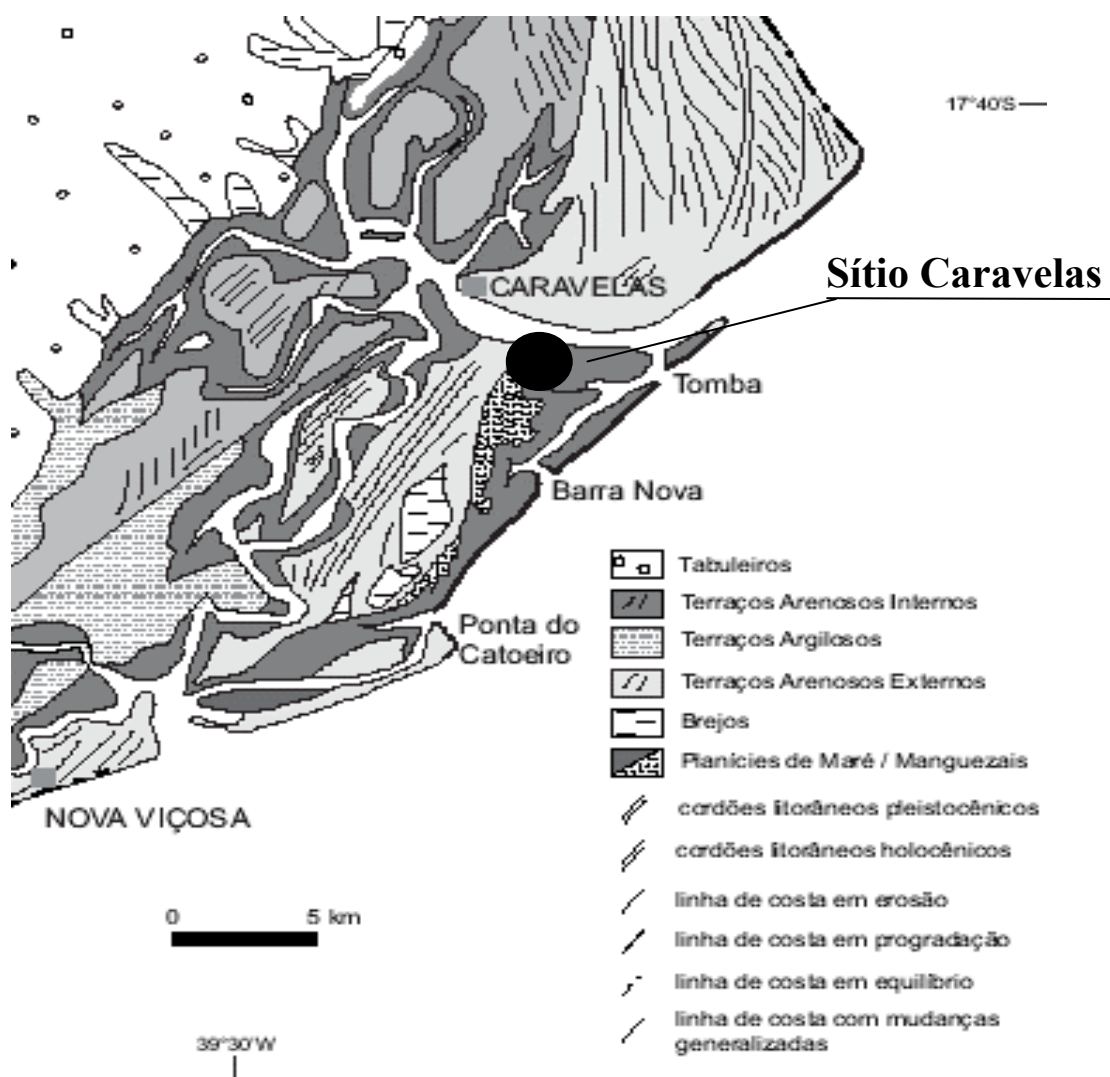


Figura 5.41 Localização do Sítio Caravelas, com indicação das principais unidades geológicas, conforme Andrade et al. (2003).

### 5.3.4.2 Caracterização geológica

Em estudo detalhado, Andrade et al. (2003) caracterizam os sedimentos da região de Caravelas-BA, propondo um modelo evolutivo para formação da planície litorânea, com base em informações de mapeamentos, sondagens por vibrotestemunhadores, datações e interpretações geológicas. O resultado de um ensaio de piezocone foi analisado considerando estas informações e procurando identificar relações entre as informações. As variações do nível do mar, associadas à presença de ilhas e barreiras de corais, controlaram a formação dos ambientes de sedimentação e por conseguinte as associações litológicas e características dos sedimentos. Tendo por base conceitos de interpretação geológica, pode-se afirmar que as unidades de mapeamento identificadas em superfície também devem ocorrer ao longo da seção vertical, refletindo as mudanças de posição dos ambientes de deposição em função das flutuações do NMM. Na Figura 5.42 são mostradas as variações do NMM do mar principalmente durante o Holoceno, segundo Dillemburg et al. (2004).

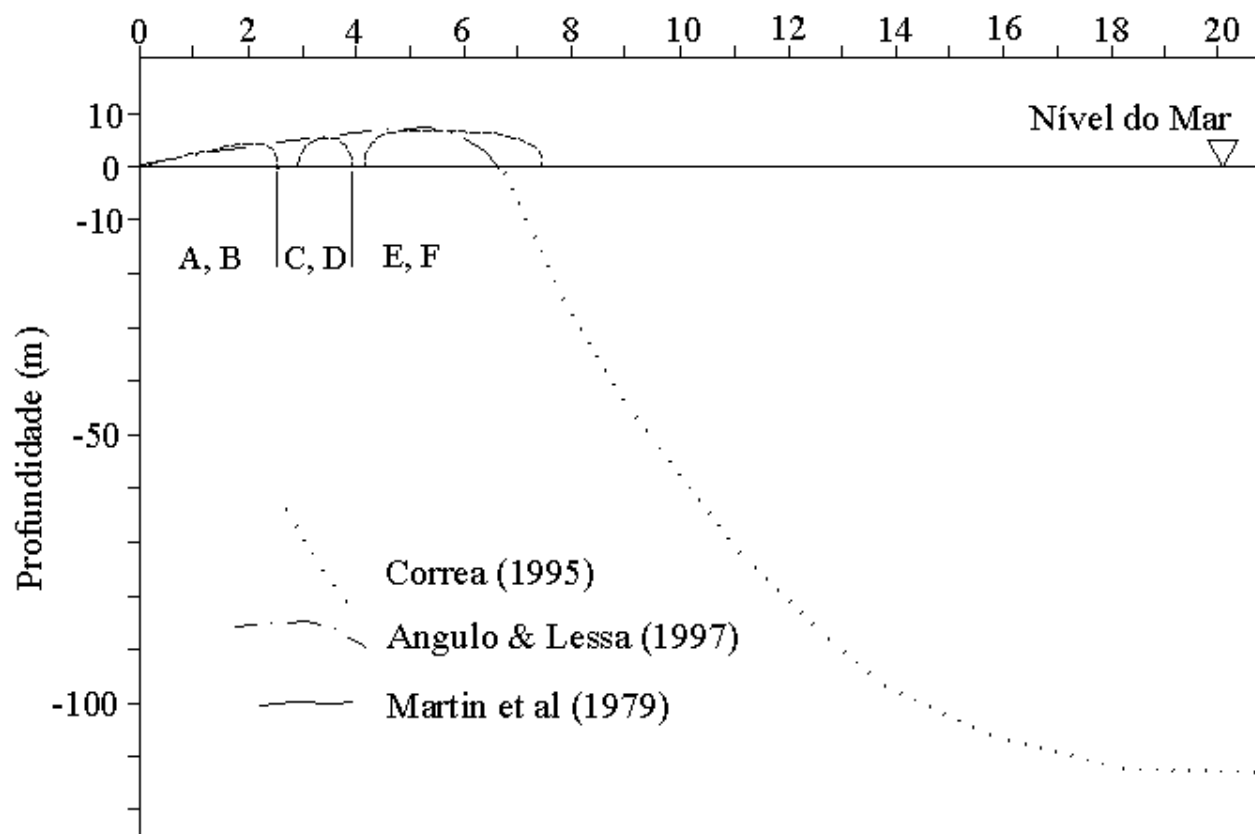


Figura 5.42 – Variação do nível médio do mar (NMM), durante o Holoceno, para a costa leste Brasileira, segundo Dillemburg et al. (2004)

Em torno de 18.000 anos atrás, coincidindo com o U.M.G. (Último Máximo Glacial), o NMM encontrava-se a cerca de 120 m abaixo do nível atual, no máximo de fase regressiva marinha. A partir deste ponto, o nível do mar subiu continuamente até um máximo de aproximadamente 5 m acima do nível atual, há cerca de 5.500 anos. Iniciou-se a partir deste ponto um rebaixamento do nível do mar até a cota atual, existindo evidências de rebaixamentos bruscos e novas elevações há cerca de 2.800 e 4.000 anos atrás.

As variações hidrodinâmicas associadas às modificações do nível do mar alteram os ambientes de sedimentação e refletem-se nas características dos sedimentos. Andrade et al. (2003) compartimentam 5 ambientes típicos de sedimentação: terraços de cordões de praias pleistocênicas, terraços lagunares, terraços de cordões de praias holocênicas, depósitos de marés e depósitos de banhados de água doce. Na região de Caravelas foram identificadas nove associações de fácies sedimentares, conforme descritas na Tabela 5.7, a partir de amostras de vibrotestemunhadores, afloramentos, estruturas, texturas, paleontologia e datações; agrupadas em dois tipos de ambientes principais: de zona litorânea (A), de lagoas e zonas de banhado (B).

Tabela 5.7 Fácies sedimentológicas na região de Caravelas-BA (Andrade et al., 2003):

<i>Fácies A1</i>	Espessuras variáveis de 2,8 a 4,0 m, constituída por areias quartzosas finas a médias, amareladas e com concentrações de minerais pesados e conchas, interpretadas como resultado de deposição em ambiente de frente de praia.
<i>Fácies A2</i>	Constituída por areias médias cinzas e alaranjadas com intercalações de areia fina a grossa e lama, alguns níveis com detritos de matéria orgânica. É interpretada como resultado de depósitos arenosos em ambiente de face de praia (zona de surfe), situado imediatamente abaixo da fácies A1.
<i>Fácies A3</i>	Caracterizada por interestratificações de lamas cinza clara a escura com espessuras de 5 a 8 cm, e areias finas cinzas, com espessuras de alguns poucos milímetros até 4 cm. É interpretada como resultado da deposição em ambiente de costa lamoso, abaixo da fácies A2.
<i>Fácies A4</i>	Constituída por areias médias a grossas, interpretadas como tendo sido depositada em ambiente de delta de maré de vazante.
<i>Fácies B1</i>	Lamas cinza escura a amarelado, freqüentemente capeada por uma camada de turfa de espessura de até 0,5 m, interpretada como depositada em ambiente de banhado com água doce, pela semelhança aos depósitos atuais deste ambiente.
<i>Fácies B2</i>	Lamas cinza escura a cinza amarelada, interpretadas como depositadas em ambiente de supra maré.
<i>Fácies B3</i>	Lamas plásticas marrom amareladas e cinzas, interpretadas como depositadas em ambiente de intermaré com vegetação de raízes subaéreas.
<i>Fácies B4</i>	Intercalações de areias finas, com lamas arenosas, muitas vezes misturadas. Interpretadas como de preenchimentos de canais de maré.
<i>Fácies B5</i>	Localmente com espessuras de até 3 m, constituída por uma argila cinza maciça e depositada em ambiente de inframaré com águas calmas, provavelmente dentro de lagoas.

#### 5.3.4.3 Identificação da estratigrafia

O estudo geológico forneceu as informações necessárias para interpretação da estratigrafia a partir do resultado do ensaio de piezocone. Na Figura 5.43 é apresentada a

classificação dos sedimentos com base no resultado do ensaio de piezocone, abrangendo a identificação das transições, a classificação segundo a proposta de Robertson et al (1986) e a classificação probabilística de Zhang & Tumay (1999). Observa-se que a distribuição dos pontos nos ábacos é bem definida, com pouca superposição entre as classes. Os contatos entre as várias camadas são bem definidos e com características particulares em cada posição do perfil, conforme detalhado no ítem 5.5.3. A análise da classificação probabilística também mostra clara definição das camadas e classificação com maior índice de confiabilidade (80 a 100%) das camadas com constituição arenosa. O detalhamento fornecido pelo piezocone para classificação probabilística permite diferenciar dois tipos distintos de camadas (Figura 5.43). A primeira é representada pelo intervalo de 4,3 a 8,5 m com clara alternância de camadas delgadas, que refletem características de sedimentação e camadas com predominância de argila ou de areia, dependendo do detalhamento do perfil. A segunda, representada pelo intervalo 11,4 a 13,7 m, mostra argila siltosa, com posição específica no ábaco, onde a mistura de argila e silte não são separáveis em camadas menores. Este aspecto será abordado na discussão da interpretação estratigráfica dos solos em geral.

#### 5.3.4.4 Descrição estratigráfica com base em resultados do ensaio de piezocone

É aqui interpretado um ensaio de piezocone até profundidade de 35 metros, realizado a beira mar na região de Caravelas (BA), com objetivo de identificar os sedimentos e testar as possíveis correlações com os ambientes e fácies mapeados por Andrade et al. (2003). Os estudos efetuados por estes autores tiveram por base informações de superfície e amostras obtidas até 7 m de profundidade. As características dos sedimentos devem também estar refletidas em maior profundidade, conforme informações provenientes do piezocone, inclusive em sedimentos mais antigos que, no entanto, não foram amostrados diretamente nem datados e, portanto, não permitem avaliações mais conclusivas. A Figura 5.44 mostra o resultado do ensaio de piezocone, com os gráficos representando a resistência de ponta corrigida ( $q_t$ ), o atrito lateral local ( $f_s$ ), a poro-pressão ( $u$ ), a razão de atrito ( $R_f = f_s/q_t * 100$ ) e a razão de poro-pressão ( $B_q$ ) que representa a poro-pressão com a remoção dos efeitos da coluna de água. São estabelecidas sete camadas, descritas a seguir, com nível de água a 1,5 m de profundidade.

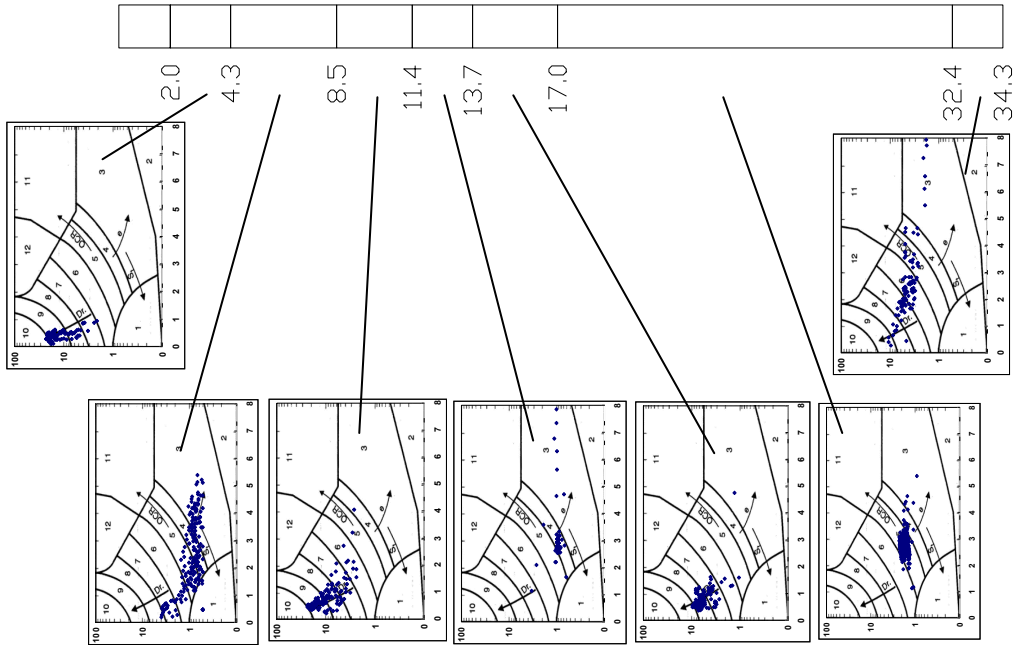
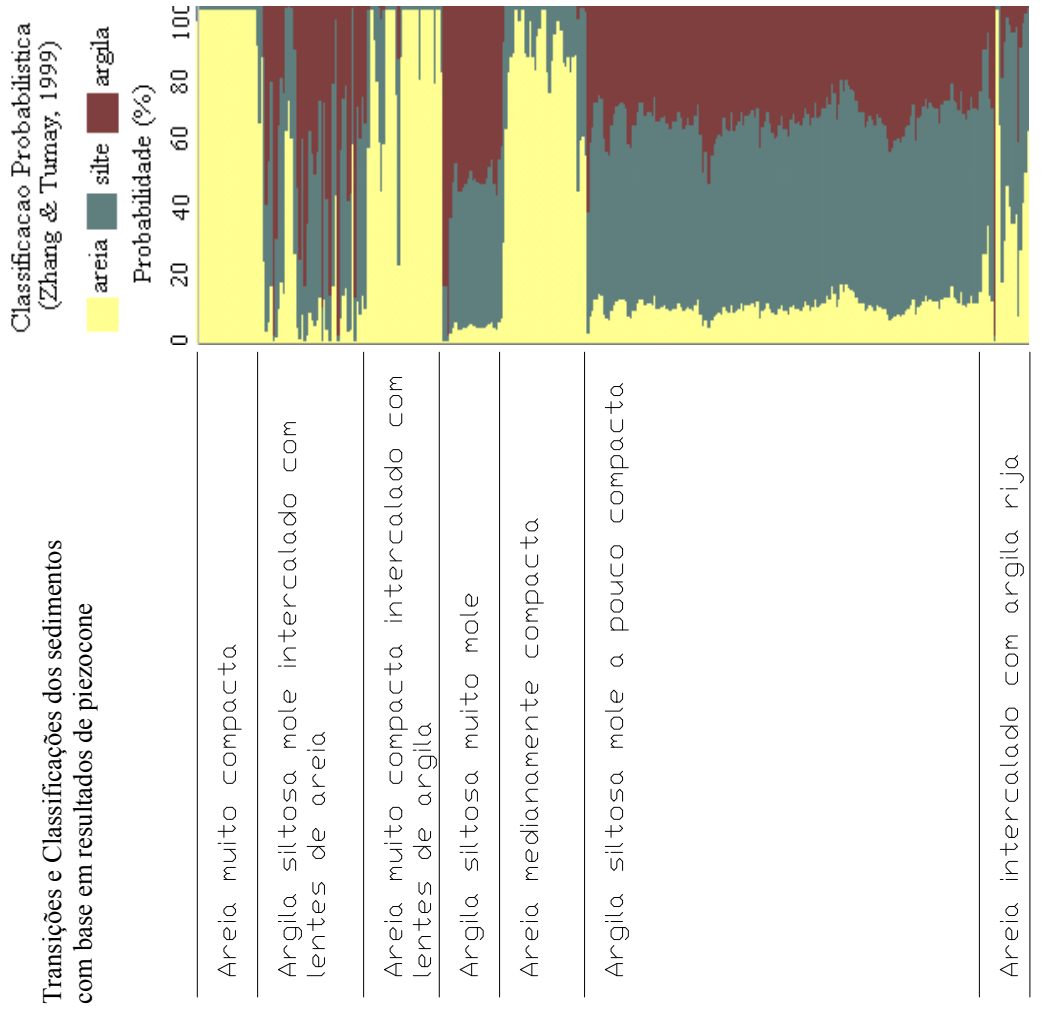


Figura 5.43 Classificação do perfil de solo com base em resultados de piezocone, classificando-o de acordo com a proposta de Robertson et al (1986) e de Zhang & Tumay (2000)

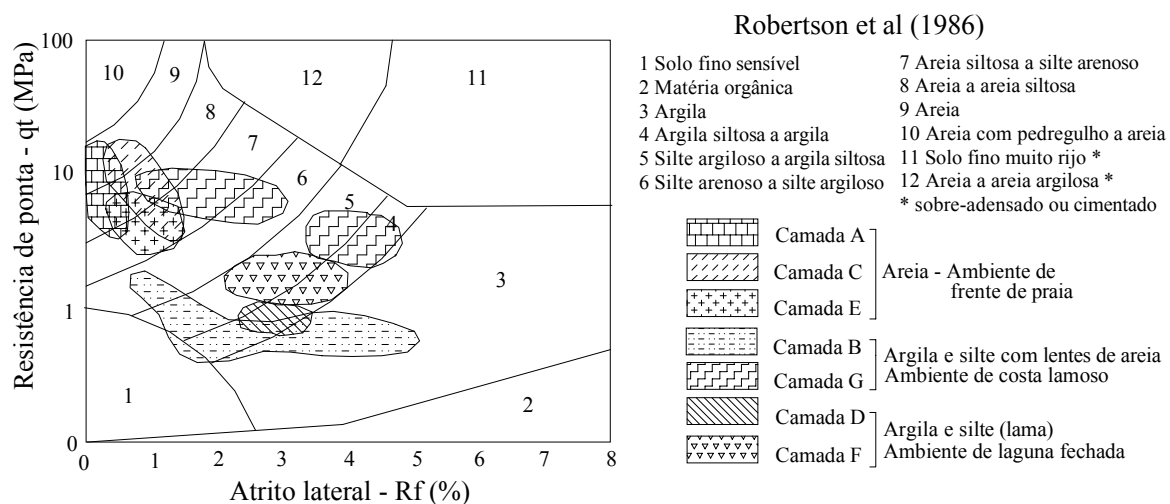
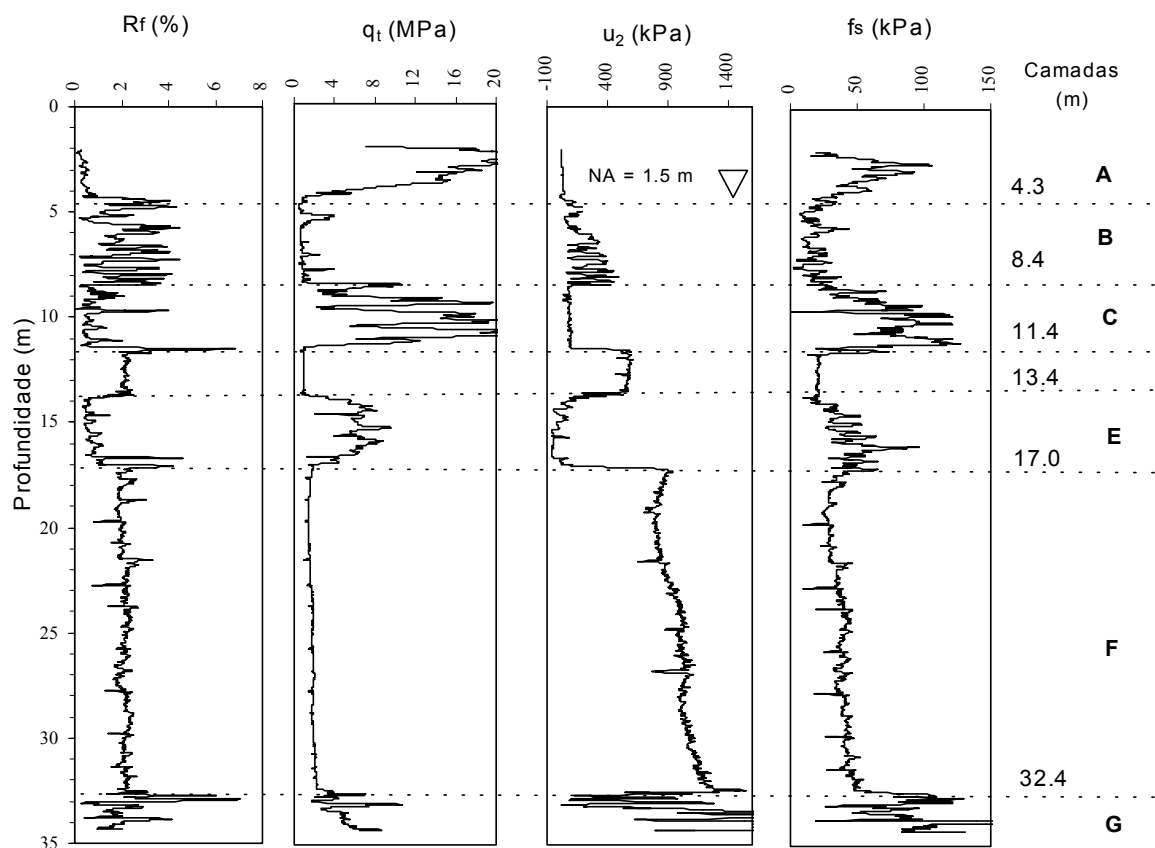


Figura 5.44 – Resultado de ensaio de piezocone, com indicação das camadas A a G, e classificação dos sedimentos em ábaco de classificação de Robertson et al. (1986) com interpretação dos prováveis ambientes de sedimentação. Sítio Caravelas

A camada A, de 2,0 a 4,3 m, mostra resistência de ponta elevada (12 a 15 MPa), penetração do piezocone sem geração de excesso de poro-pressão, razão de atrito muito baixa (0,2-0,3 %), sem intercalações de materiais finos, e portanto deve representar areia média a grossa compacta a muito compacta. A camada B, de 4,3 a 8,4 m de profundidade, mostra

resistência de ponta baixa (0,7-0,8 MPa), com alguns poucos picos mais elevados (4 MPa), poro-pressão se desenvolve de forma irregular com níveis não-drenados e  $u=400$  kPa e intercalações de materiais completamente drenados ( $\Delta u=0$  kPa), razão de atrito variável de 0,5 a 2,0 %, mostrando que o pacote caracteriza-se por material silte-argiloso em camadas decimétricas, e intercalações de areia fina a média, em camadas centimétricas. A camada C, entre 8,4 a 11,4 m de profundidade, mostra resistência de ponta elevada (12-15 MPa), com intercalações de níveis menos resistentes (2-6 MPa), os registros de poro-pressão mostram uma penetração completamente drenada, com valores de  $u$  hidrostático, a razão de atrito é baixa (0,5-0,7 %) com alguns picos mais elevados (1 a 4 %). Desta forma, evidencia-se um solo de constituição arenosa, com intercalações de materiais mais moles, com  $R_f$  elevado, porém sem evidências de que seja argila ou silte devido a ausência de excesso de poro-pressão. Permanece portanto a dúvida e a possibilidade que seja material turfoso, conforme evidências mostradas em Lunne et al. (1997). A camada D, entre 11,4 a 13,8 m de profundidade, mostra resistência de ponta baixa (0,6-0,7 MPa) e homogênea, geração de poro-pressão elevada (600 kPa) mostrando três pequenas quedas a 11,9 m, 12,1 m e 12,9 m de profundidade, razão de atrito homogênea na faixa de 2 %, com pico proeminente de 7 % no topo da camada. Os registros indicam a presença de uma camada com materiais de constituição argilo-siltosa, com provável nível de turfa no topo, devido a elevada  $R_f$  e redução mínima no registro de poro-pressão. A camada E, de 13,8 a 17,0 m de profundidade, mostra um  $q_t$  alto (6-8 MPa) razoavelmente homogêneo, poro-pressão negativa, evidenciando fenômeno de dilatância e  $R_f$  baixo (0,8-0,9 %), evidenciando a presença de material de constituição arenosa fina e com densidade relativa mais alta devido a provável dilatância observada. A camada F, entre 17,0 a 32,4 m de profundidade, mostra um  $q_t$  baixo (1-1,7 MPa), poro-pressão elevada (800-1.300 kPa), com algumas quedas abruptas nas profundidades 19,0 m, 21,5 m, 25,0 m e 27,0 m de profundidade, que podem representar finos níveis de areia ou pequenas camadas com conchas. A grande espessura e homogeneidade dos sedimentos indicam longo período de estabilidade do ambiente ou constância na atuação dos processos sedimentares. A camada G, entre 32,4 a 34,5 m de profundidade, mostra  $q_t$  variável (2-10 MPa), poro-pressão também variável (0 a 1.700 kPa),  $R_f$  variável de 1 a 6 %, indicando intercalações de materiais de constituição arenosa com materiais silto-argilosos, podendo inclusive conter níveis turfosos.

#### 5.3.4.5 Relações entre mapeamento geológico e resultados de ensaios de piezocone

As informações obtidas a partir da interpretação do ensaio de piezocone foram confrontadas com aquelas obtidas dos mapeamentos de superfície, sendo identificadas muitas correspondências, conforme mostrado a seguir.

A camada G, basal, representa depósitos heterogêneos com freqüentes intercalações de materiais argilosos e arenosos, indicando mudanças abruptas do ambiente, provavelmente associadas às mudanças de NMM. Supõe-se que estes depósitos tenham sua formação associada ao fim do último ciclo regressivo, após o auge da transgressão de 120 mil anos atrás, porém os dados disponíveis não permitem apresentar conclusões definitivas. A partir desta posição iniciam os depósitos da camada F, tipicamente argilo-siltosa, homogênea e formada em ambiente tranqüilo, provavelmente de lagunas fechadas, semelhantes aqueles descritos para a fácies B5 por Andrade et al. (2003). A transição para os sedimentos da camada E, de constituição arenosa compacta, se dá por contato erosivo, fortemente marcado pelos registros de poro-pressão e pela razão de atrito. O ambiente de deposição é tipicamente de praia, com semelhanças à fácies A1. Isto pode ser uma evidência de que os sedimentos da camada F foram depositados sobre a superfície erosiva dos sedimentos de praias, correspondendo a fase de redução do NMM há 4.000 anos A. P. Na seqüência foram depositados os sedimentos da camada D, de constituição argilo-siltosa e formados em ambiente calmo de lagunas protegidas, típico das fases finais de transgressão, cujo clímax ocorreu há 3.500 anos A. P. A camada C caracteriza-se por um solo de constituição arenosa, com intercalações de materiais mais moles, com  $R_f$  elevado, podendo ser uma turfa, pois não gera excesso de poro-pressão, o que seria de se esperar para materiais argilosos. Existe alguma semelhança com os sedimentos da fácies A2, característicos de ambiente de praia, com alguns níveis de detritos de matéria orgânica. A camada B caracteriza-se pela presença de um material silte-argiloso em camadas decimétricas e intercalações de areia fina a média, em camadas centimétricas, semelhantes aos depósitos descritos para a fácies A3, em ambiente de costa lamoso.

São reconhecidas três etapas distintas em correspondência às camadas identificadas a partir do ensaio de piezocone. Cada conjunto, representado pelas camadas F e E; D e C; B e A é composto por seqüências transgressiva (sedimentos finos) e regressiva (sedimentos arenosos), em três ciclos que tem semelhança com as variações do nível médio dos mares, na região, durante o Quaternário. Conclusões mais detalhadas só podem ser obtidas com amostragens e datações associadas aos resultados de ensaios de piezocone, que recomenda-se sejam realizados em continuidade a essa pesquisa. O registro estratigráfico demonstra que ocorreram variações



bruscas no NMM, com possibilidade de estarem ligadas às reduções do NMM há 4.000 e 2.500 anos atrás, corroborando a hipótese de Martin et al. (1979), em detrimento da hipótese de Angulo & Lessa (1997), apresentadas anteriormente.

Na análise estratigráfica de sedimentos, uma ferramenta extremamente importante é a descrição detalhada do perfil, com classificação do material, identificação de estruturas e datações, em observações realizadas em afloramentos do terreno ou em sondagem com amostragem integral. Esta abordagem de estudo integrada normalmente é cara e exige profissionais qualificados para interpretação e integração das informações. O resultado do ensaio de piezocone não fornece amostras, porém a interpretação integrada dos registros dos três sensores ( $q_c$ ,  $f_s$  e  $u$ ) pode fornecer informações que contribuem para um melhor entendimento do perfil estratigráfico de regiões sedimentares.

## **5.4 Sítios com Solos Tropicais**

### **5.4.1 Considerações gerais**

Os sítios de pesquisa descritos a seguir compreendem terrenos situados sobre solos desenvolvidos a partir de rochas básicas (basalto e diabásio) e sedimentos da Bacia do Paraná, que passaram por processos de intemperismo e morfogênese. Nestes terrenos tem-se a predominância de processos pedogenéticos na formação dos solos, em oposição aos sítios anteriores onde os processos dominantes são os de sedimentação.

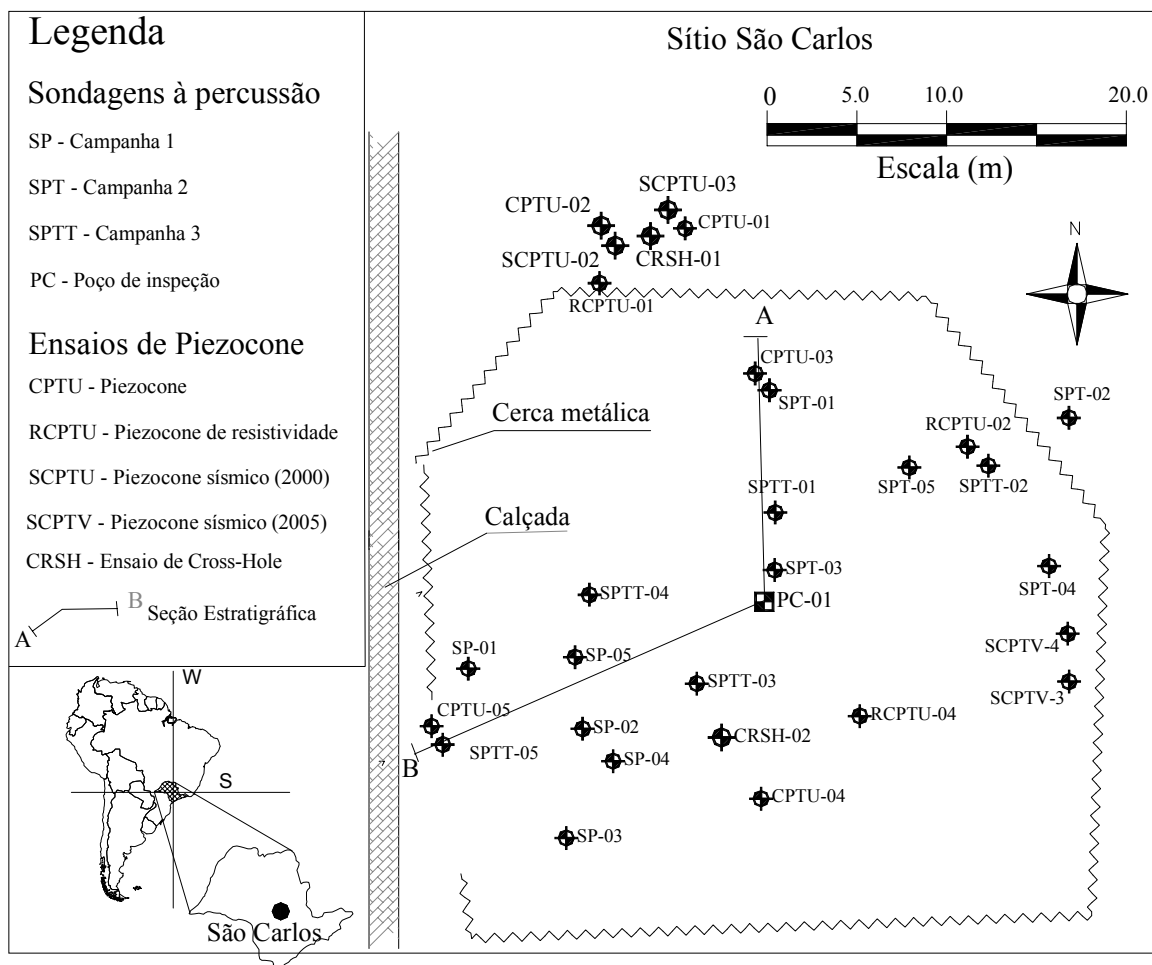
O entendimento da estratigrafia destes solos passa pela compreensão da história de formação das rochas subjacentes e dos processos de transformação produzidos pelo intemperismo tropical, sendo necessário avaliar a intensidade e a extensão destes processos nos locais investigados. Processos de intemperismo muito intensos em áreas tectonicamente estáveis transformam completamente a rocha, mudando a paisagem e formando solos laterizados e concrecionados. Estes materiais têm comportamentos particulares em geotecnia e devem ser individualizados durante as campanhas de investigação. Por outro lado, o intemperismo tropical ressalta heterogeneidades da rocha e torna o entendimento da estratigrafia dos solos mais complexo. Em muitos casos não podem ser utilizados os conceitos da estratigrafia convencional de solos sedimentares e rochas estratificadas, aspectos que serão abordados a seguir.

### **5.4.2 Sítio São Carlos**

#### **5.4.2.1 Considerações gerais**

O sítio de pesquisa localiza-se no campus da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo (EESC-USP) situado na cidade de São Carlos (SP). É um campo experimental para estudos de comportamento das fundações sob responsabilidade do Departamento de Geotecnia, onde foram realizadas diversas pesquisas que resultaram em dissertações de mestrado e teses de doutorado. Os ensaios utilizados neste trabalho abrangem cinco ensaios de piezocone, dois ensaios de piezocone de resistividade, quatro ensaios de piezocone sísmico, onze amostras para ensaios de classificação e quinze sondagens de simples

reconhecimento com ensaio SPT, executadas em três campanhas distintas. A Figura 5.45 mostra a localização da cidade de São Carlos e dos ensaios utilizados na pesquisa.



**Figura 5.45** Mapa de localização da cidade de São Carlos e dos ensaios utilizados. Sítio São Carlos.

#### 5.4.2.2 Caracterização Geológica

A cidade de São Carlos está situada sobre rochas sedimentares e básicas da Bacia do Paraná. O perfil geológico típico do Sítio São Carlos, mostrado na Tabela 5.8, foi obtido a partir de informações de campo e boletins de sondagens realizadas até a profundidade de 28 m.

Pelas relações estratigráficas regionais, abaixo das rochas básicas ocorrem arenitos pertencentes à Formação Botucatu, acima ocorrem sedimentos arenosos e argilosos do Grupo Bauru. As relações genéticas das rochas básicas não estão claramente definidas, podendo representar basaltos, se forem produto do extravasamento de lava em superfície, ou diabásios, se forem intrusões horizontalizadas em meio às rochas sedimentares pré-existentes. Os sedimentos cenozóicos tem sua origem ligada aos Arenitos Bauru e Botucatu, com

contribuições dos magmatitos básicos. Essas rochas sofreram intenso intemperismo tropical, que pela laterização, solos muito porosos e freqüentemente colapsíveis. Os solos do Grupo Bauru são provenientes de sedimentos de constituição areno-argilosa, em clima semi-árido, com ocorrências freqüentes de depósitos formados em pequenas lagoas intercaladas aos sedimentos arenosos.

**Tabela 5.8** – Seqüência de camadas do Sítio São Carlos

<i>Prof. (m)</i>	<i>Descrição</i>	<i>Gênese</i>
0,0	Superfície do terreno	
	Areia argilosa marrom (sedimento cenozóico).	Processos de colúviação e morfogênese
6,0		
	“Linhas” de pedras imersas em areia argilosa.	Concentração residual devida à lavagem de finos (?)
6,2		
	Areia argilosa vermelha (solo residual do Grupo Bauru).	Sedimentos flúvio-lacustres submetidos ao intemperismo.
23,5		
	Silte argiloso (magmatito básico – diabásio).	Lavas básicas submetidas ao intemperismo
28,3		

Desta forma, o perfil estratigráfico da região do Sítio São Carlos apresenta porções de sedimentos (arenitos), de rochas ígneas (basalto) e dos processos de pedogênese e morfogênese que atuaram durante o Quaternário. Na Figura 5.46 tem-se um mapa geotécnico do sítio São Carlos, onde são mostradas três unidades baseadas em informações de mapeamentos geológico, geomorfológico e provenientes das sondagens. Na Figura 5.47 tem-se uma seção geológica esquemática, com posição indicada na Figura 5.46 e provável distribuição das unidades geológicas na área. Observa-se que a superfície de contato entre os basaltos fresco e alterado (ou solo residual) pode ser muito irregular, em função do intemperismo químico que atinge maiores profundidades nas porções fraturadas.

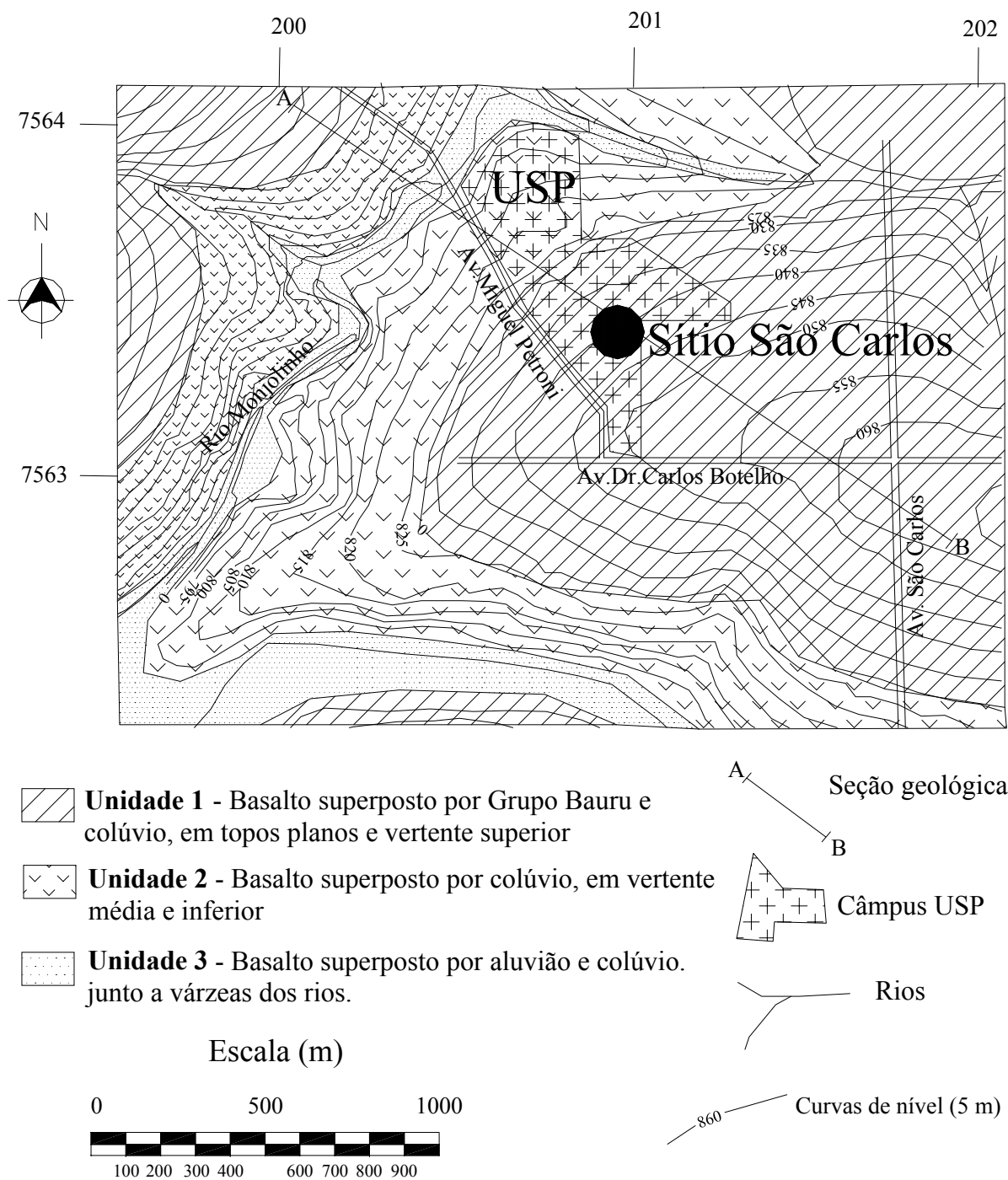


Figura 5.46 – Unidades geotécnicas no entorno do Sítio São Carlos, produzidas a partir de mapeamento de superfície, interpretação de sondagens, mapa topográfico e fotografia aérea.

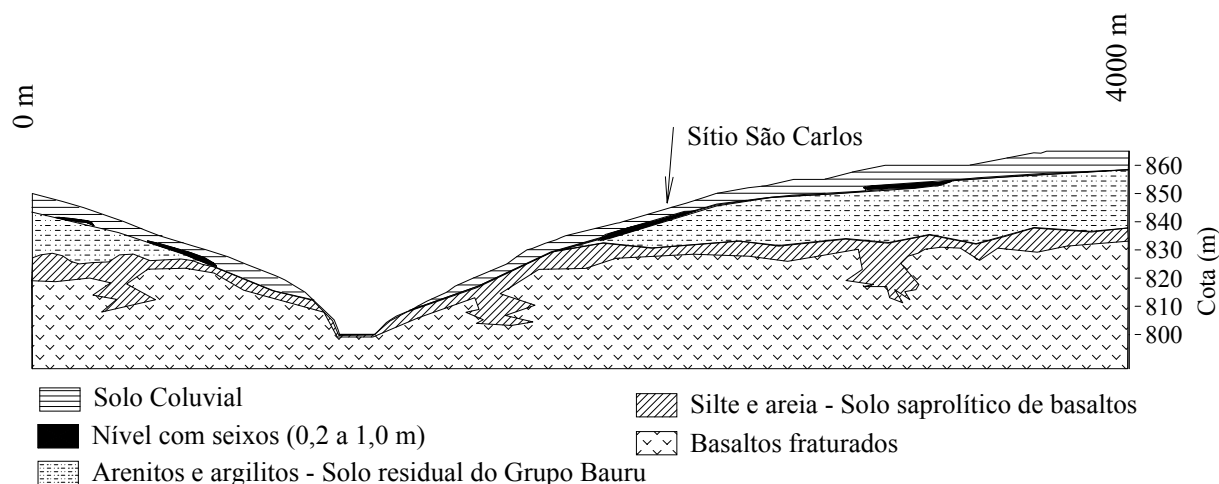
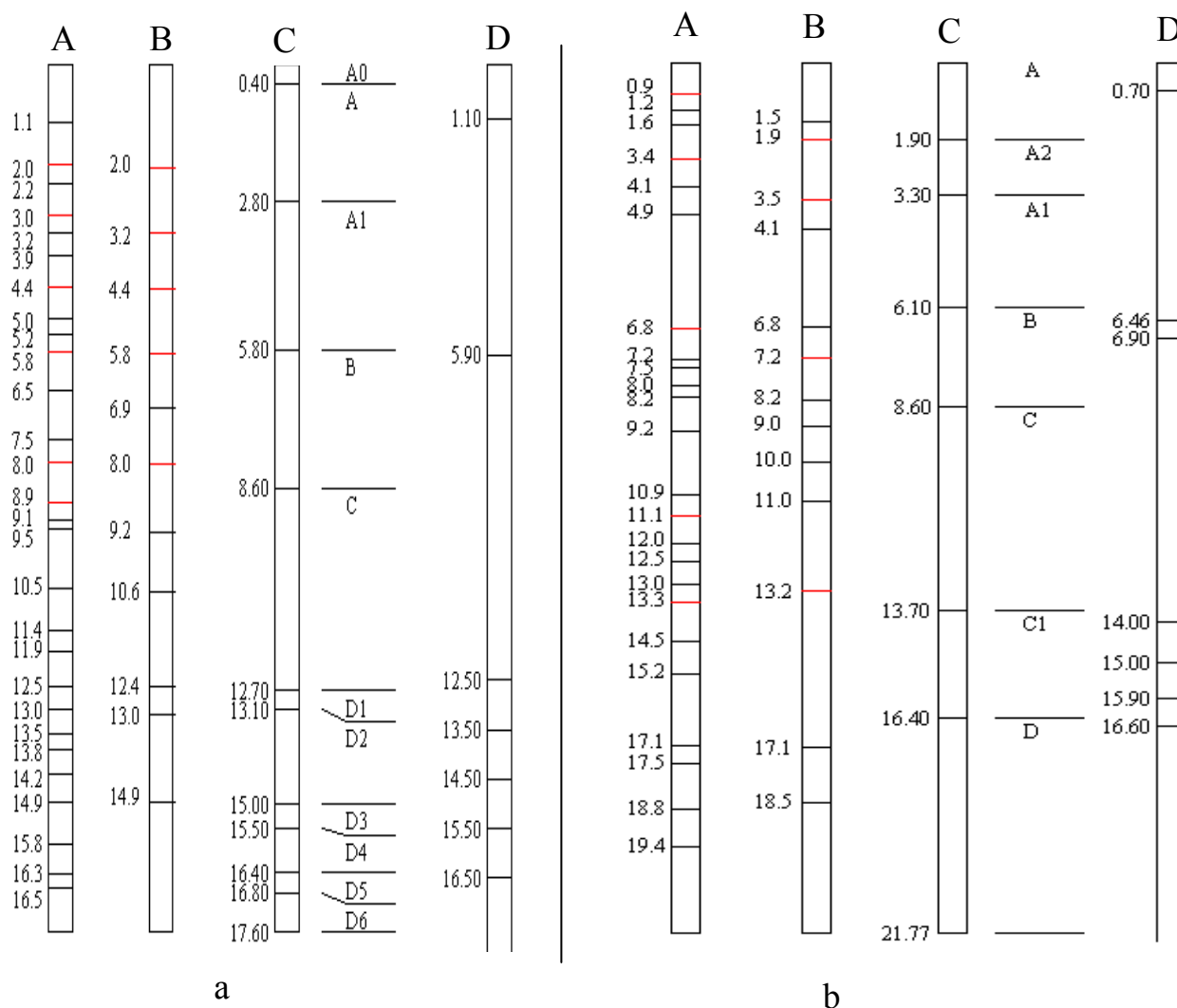


Figura 5.47 – Seção geológica baseada em dados de mapeamento e sondagens, com posição indicada na Figura 5.46.

#### 5.4.2.3 Identificação do perfil estratigráfico

A identificação da transição entre as camadas e a classificação dos solos foi feita considerando o arcabouço geológico descrito anteriormente, procurando identificar as características do subsolo. A Figura 5.48 mostra o resultado de diferentes métodos na identificação da transição entre camadas.

Ocorrem variações sensíveis na posição dos contatos, seja devido às variações no solo ou devido ao detalhamento insuficiente de algumas sondagens. As transições principais, indicadas pelos vários métodos, situam-se entre 6 a 7 m, 12 a 13 m e 15 a 16 m. Variações sensíveis nas profundidades das camadas nas posições dos ensaios CPTU-03 e CPTU-05 são observadas quando analisadas em detalhe. Os resultados dos testes  $D^2$ , com janela de 2m (Colunas B), da Figura 5.48, por serem padronizados, mostram claramente a diferença de posição das transições nos diferentes pontos de sondagem. A correta posição das transições, a partir dos resultados do ensaio de piezocone, é ressaltada pelos testes estatísticos, porém devem ser definidas durante a interpretação do ensaio em função dos objetivos de cada projeto. Nos projetos de fundação tornam-se necessárias correções de posição das transições em função dos efeitos de escala e volume do maciço de solo solicitado, aspecto que não será abordado neste trabalho.



**Figura 5.48** a: CPTU-03 e SPT-01, b: CPTU-05 e SPTT-05. Comparação entre diferentes métodos para obter a profundidade das transições entre camadas a partir do resultado de ensaio de piezocone e sondagem de simples reconhecimento - SPT. **A** - teste estatístico D2 com janela de 1 m, **B** - teste estatístico D2 com janela de 2 m, **C** - Inspeção visual dos resultados do piezocone, **D** - Descrições das sondagens de simples reconhecimento.

A classificação dos solos foi feita comparando-se métodos distintos, que ressaltam as interfaces entre zonas do perfil. As Figuras 5.49 e 5.50 mostram o resultado das diferentes classificações de solos aplicadas a dois locais do sítio investigado. Os solos situados no trecho de aproximadamente 6 a 13 m de profundidade mostram classificações com resultados distintos. As classificações granulométricas tácteis-visuais e de laboratório indicam presença de solos predominantemente arenosos, enquanto que as classificações obtidas a partir dos resultados do ensaio de piezocone indicam solos de comportamento predominantemente argiloso. Isto é um aspecto sensivelmente distinto dos resultados dos demais sítios e conflitante com os fundamentos para interpretação dos ensaios de piezocone. Este aspecto pode indicar uma gênese mais complexa do perfil de solo e será abordado a seguir, na discussão dos resultados, item 6 desse trabalho.

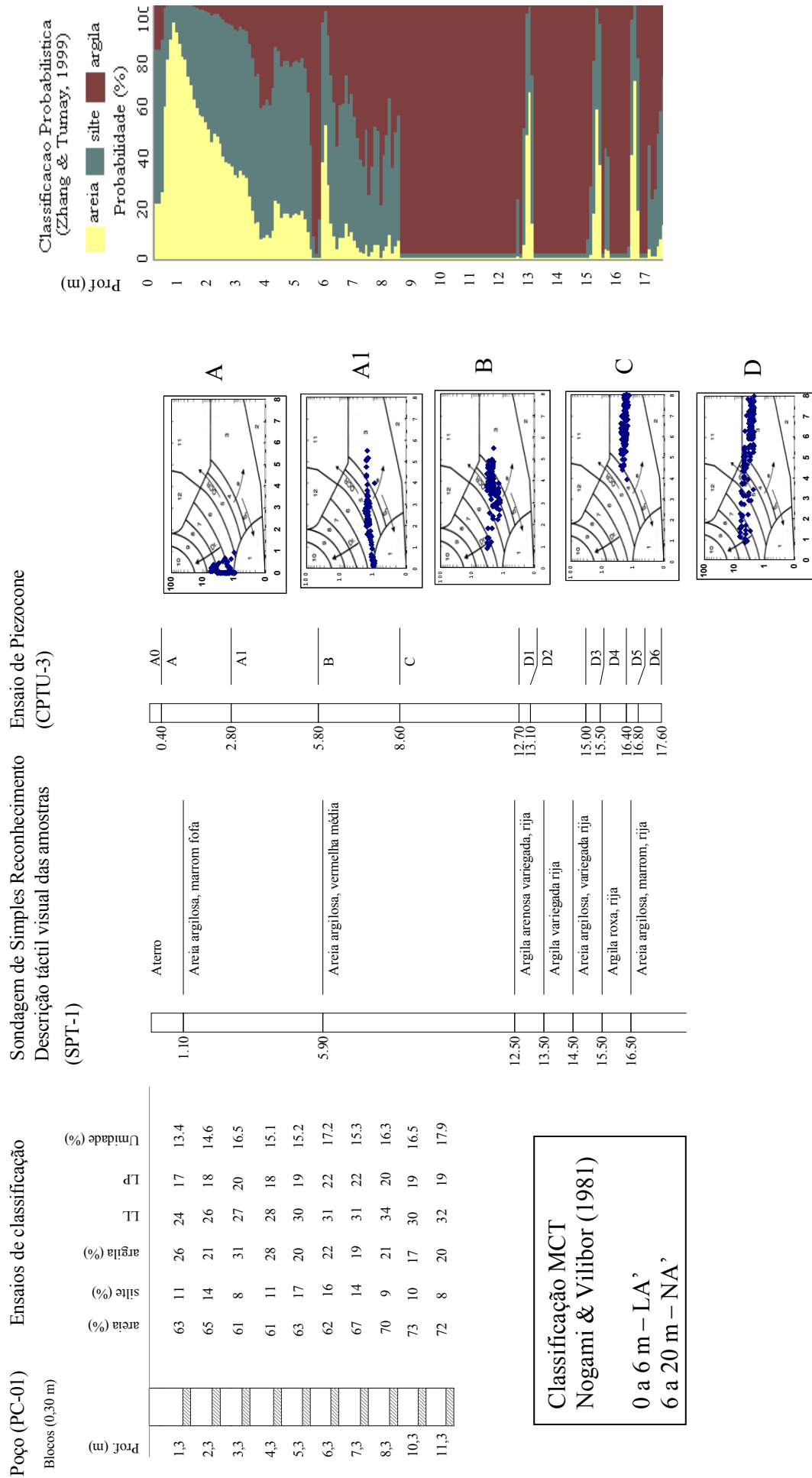


Figura 5.49 - Comparação de métodos de classificação do solo: ensaios de laboratório, sondagens de simples reconhecimento e ensaios de piezocone (CPTU-03, SPT-01) do Sítio São Carlos



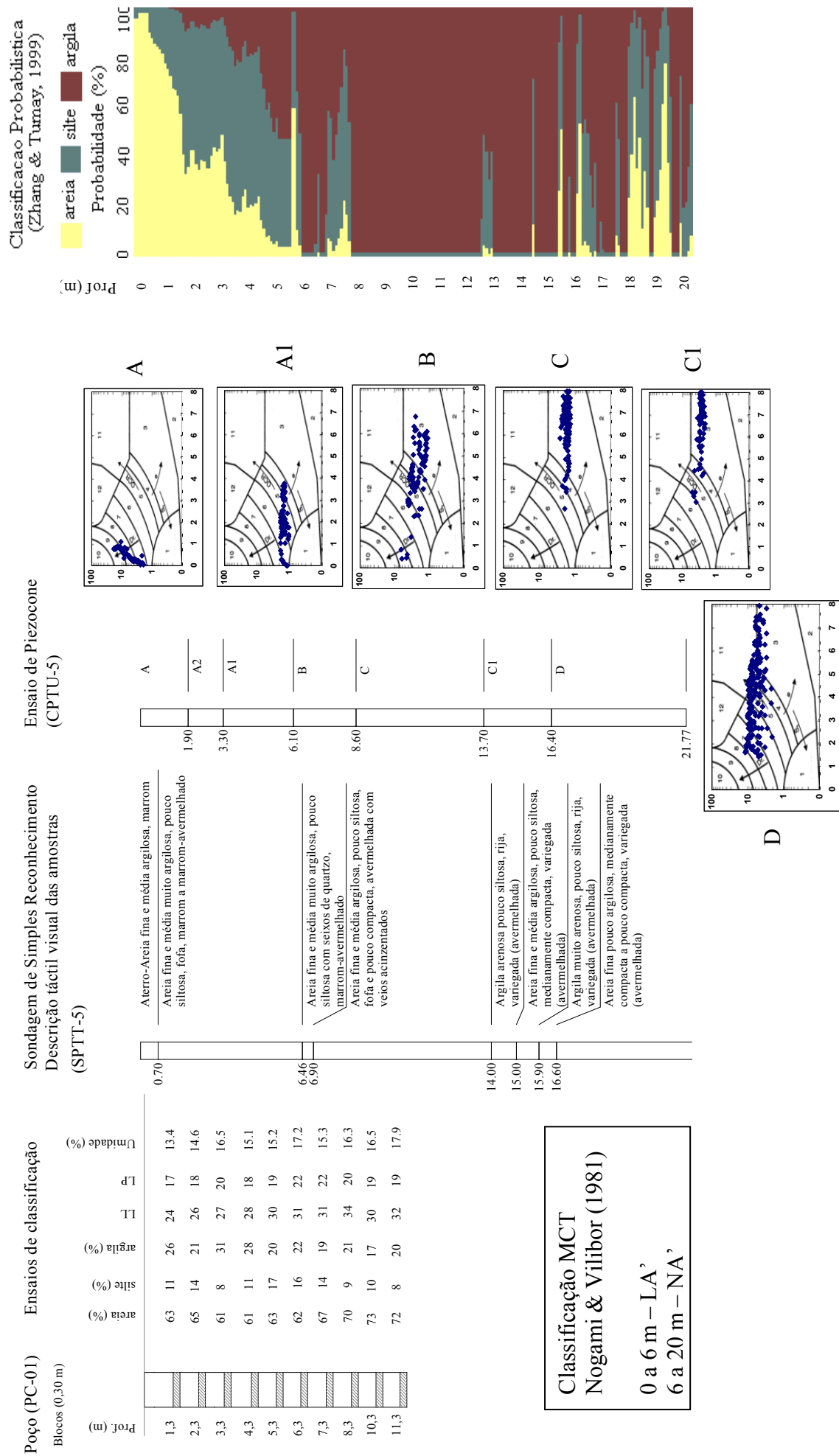


Figura 5.50 - Comparação de métodos de classificação do solo: ensaios de laboratório, sondagens de simples reconhecimento e ensaios de piezocone (CPTU-05, SPTT-05) do Sítio São Carlos

A interpretação do perfil de solo sofre influência direta dos métodos utilizados na investigação. Os diferentes níveis de detalhamento de cada método, aliados a forte subjetividade humana na interpretação dos resultados das sondagens de simples reconhecimento, mostram que os resultados do ensaio de piezocone podem melhorar a identificação do perfil em qualquer tipo de solo. As Figuras 5.51 e 5.52 permitem comparar os resultados de classificações por sondagens de simples reconhecimento realizadas por diferentes empresas em pontos de sondagens distantes até três metros entre si. As principais transições são coincidentes, porém o nível de detalhamento de cada ensaio é muito diferente, refletindo diferenças de critério dos sondadores e classificadores das sondagens.

Os resultados dos ensaios de piezocone mostram transições pouco marcadas na resposta individual dos sensores, principalmente  $q_c$  e  $f_s$ . Já a resposta de  $u$ , abaixo da posição do nível da água, marca sensivelmente algumas transições, indicando alternância de camadas onde a penetração foi drenada e camadas onde a penetração não foi drenada, evidenciando diferenças na constituição granulométrica dos solos, provavelmente ligadas à época da deposição dos sedimentos.

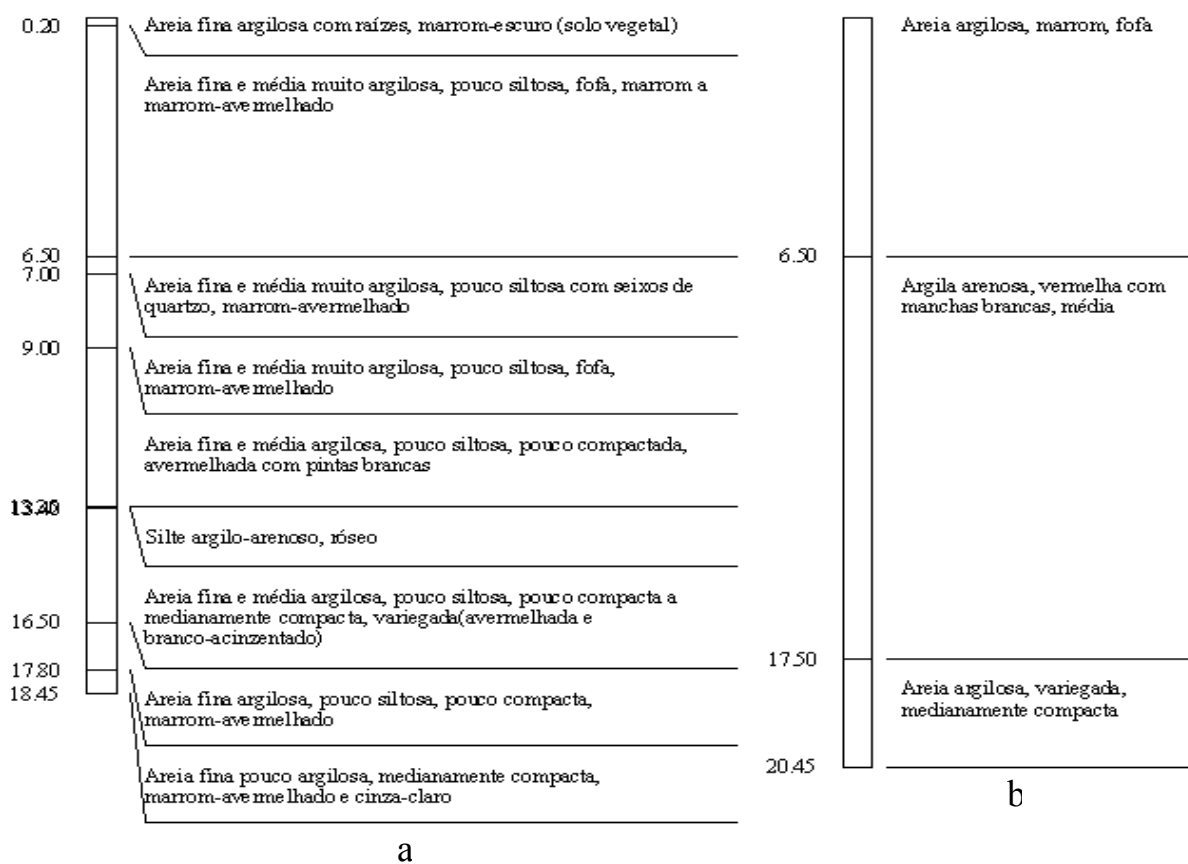


Figura 5.51 – Perfis obtidos a partir de resultados de sondagens a percussão distintos (a) SPTT-01 e (b) SPT-03, com distância entre sondagens de aproximadamente 3 m.

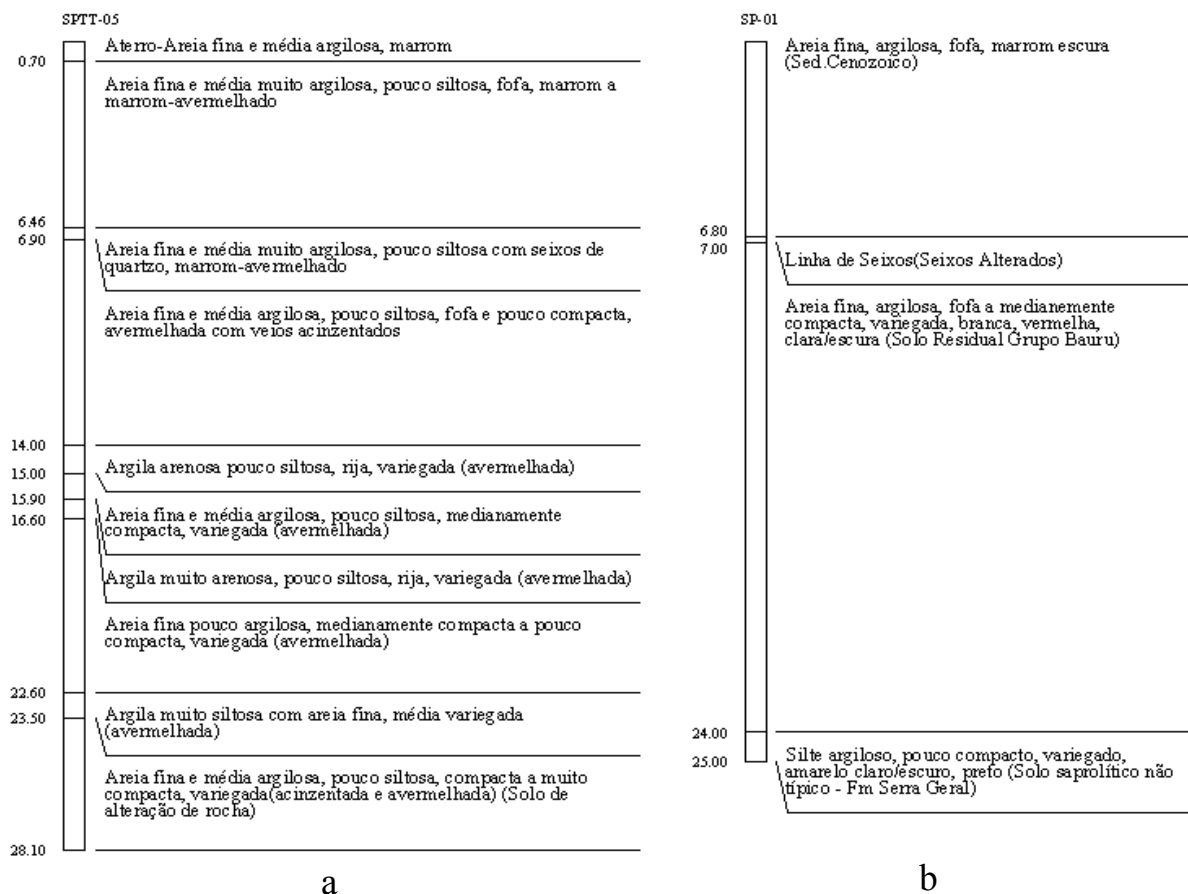


Figura 5.52 - Perfis obtidos a partir de resultados de sondagens a percussão (a) SPTT-05 e (b) SP-01, com distância entre sondagens de aproximadamente 4 m

Abaixo do nível de água, os registros da poro-pressão utilizando o filtro de cavidade preenchido com graxa, são informações que subsidiam a identificação do perfil estratigráfico. Na Figura 5.53 tem-se a descrição táctil-visual detalhada do perfil e os registros de poro-pressão obtidos em ensaio de piezocone utilizando o recurso do filtro de cavidade preenchido com graxa automotiva. Nessa figura, o registro de poro-pressão indica claramente as intercalações entre camadas, onde se tem penetração drenada (arenosa) e não-drenada (argilosa) e que, por representarem informações contínuas, são mais interessantes que a descrição de amostras descontínuas obtidas das sondagens de simples reconhecimento. No entanto, esses registros só podem ser obtidos abaixo do nível de água, quando o sensor de poro-pressão passa a registrar valores independentes da técnica utilizada para saturação do piezocone. A utilização do filtro de cavidade preenchido com graxa automotiva, adequadamente preparado, forneceu respostas coerentes e evitou a execução de pré-furos até a profundidade do nível de água, necessários quando são utilizados elementos porosos saturados com água ou glicerina na execução dos ensaios de piezocone.

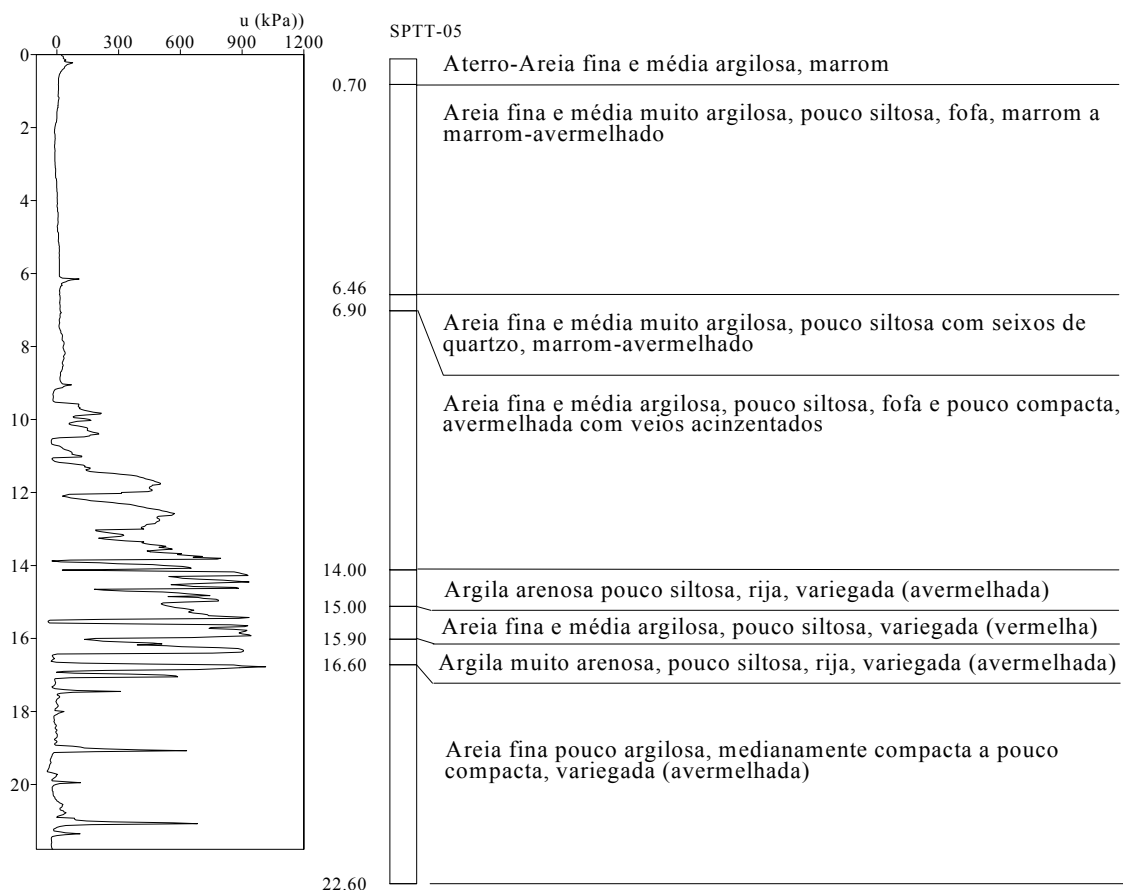


Figura 5.53 – Comparação entre o registro da poro-pressão (filtro de cavidade com graxa) de ensaio de piezocone e a descrição do perfil a partir de sondagem de simples reconhecimento (CPTU-05 e SPTT-05)

A interpretação das transições entre as diversas camadas pôde então ser obtida a partir da integração de resultados dos ensaios de piezocone e sondagens de simples reconhecimento. Entretanto, nesse sítio, a identificação da transição entre o solo e a rocha sã, em ambos ensaios, pode fornecer informações incorretas. Na Foto 5.1 é mostrado um afloramento próximo ao Sítio São Carlos, indicando a presença de camadas de solo em meio à rocha sã. Esta situação tem importantes implicações geotécnicas e só pode ser identificada a partir de sondagem rotativa. No entanto, é uma situação previsível em função do conhecimento anterior das características geológicas do local. Os basaltos, sendo formados a partir de seqüências de derrames, muitas vezes com longos intervalos de tempo entre os diversos derrames, podem mostrar uma estrutura em camadas, posteriormente ressaltada pelos processos intempéricos. No mesmo afloramento é identificado um horizonte com seixos de quartzo e concreções ferríferas (Foto 5.2), semelhante àquela presente no Sítio São Carlos, próximo a 6 m de profundidade. Evidencia-se, nesta foto, a geometria irregular e espessura variável deste nível, que podem influenciar na identificação da estratigrafia e dificultar obras geotécnicas.





Foto 5.1 – Perfil de solo de alteração, residual de basalto, mostrando intercalações de níveis de solo com níveis de rocha sã, ambos sub-horizontais. Corte rodoviário próximo ao Sítio São Carlos.

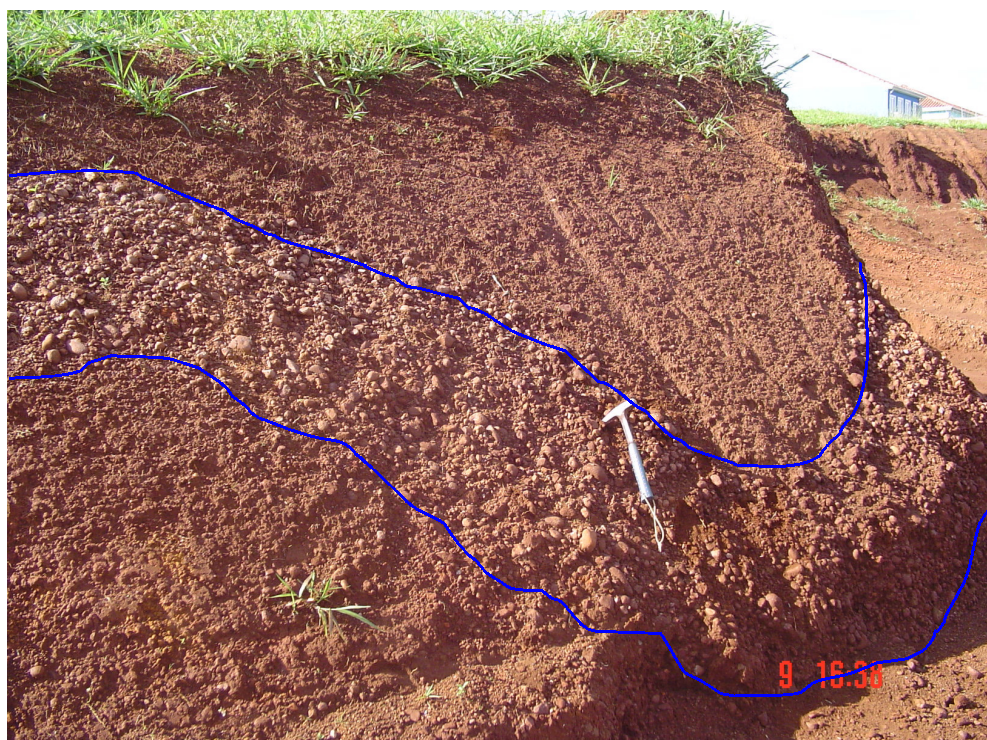


Foto 5.2 – Perfil de solo, ressaltando o horizonte com seixos no contato solo residual/colúvio, situado na porção inferior de uma vertente, próximo a um canal de drenagem, evidenciando suas variações de espessura, profundidade e posição com relação ao relevo. Corte rodoviário próximo ao Sítio São Carlos.

Os resultados dos vários ensaios analisados ressaltam diferenças de detalhamento da estratigrafia obtido a partir dos ensaios de piezocone e das sondagens de simples reconhecimento. Na Figura 5.54 tem-se resultados dos ensaios SCPTV-4 e SPT-04. A partir do perfil da razão de atrito ( $R_f$ ), do ensaio de piezocone, evidencia-se a presença de alternância de camadas arenosas e argilosas, abaixo de 15 m de profundidade, não reconhecidas pelas sondagens de simples reconhecimento. Estas diferenças podem modificar a interpretação do perfil estratigráfico e interferir sensivelmente na definição de parâmetros de projeto, principalmente na área geoambiental. No resultado desse ensaio de piezocone não é identificada a presença de camada de pedregulho, o que evidencia o caráter descontínuo desta superfície. No entanto o aumento dos valores de  $q_c$  e principalmente de  $R_f$  na profundidade de 7 m parece marcar de forma clara a transição do solo laterítico para o não-laterítico, evidenciando o limite dos solos colapsíveis mais superficiais.

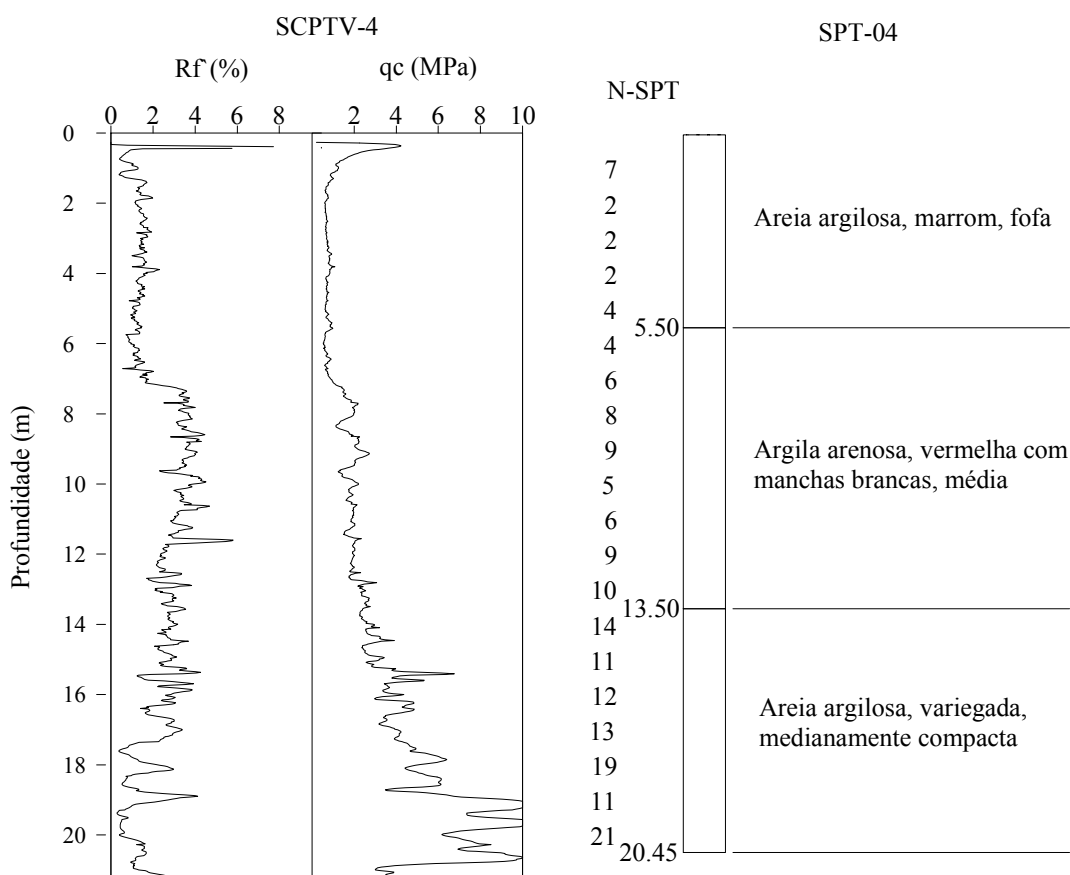


Figura 5.54 – Comparação entre resultado de ensaio de piezocone e sondagem de simples reconhecimento, ressaltando as diferenças de detalhamento estratigráfico obtidos entre dois ensaios (SCPTV-4 e SPT-04). Sítio São Carlos

#### 5.4.2.4 Análise estatística

Com objetivo de avaliar a variabilidade horizontal dos solos deste sítio, os ensaios de piezocone foram compartimentados em camadas, a partir das quais foram obtidos os valores da média, desvio padrão, variância e escala de flutuação, a partir dos registros de  $q_c$  para cada uma das camadas, com resultados apresentados na Tabela 5.8. Na Figura 5.55 são mostrados os resultados desta compartimentação, sendo que as profundidades das camadas variam em cada ensaio e as profundidades indicadas no gráfico são indicações médias para cada camada em questão. O gráfico mostra a variação de  $q_c$  ao longo de cada camada em todos os ensaios de piezocone do sítio. As camadas de 2,5 a 6 m e de 6 a 10 m mostram menor variação de  $q_c$ , enquanto que as camadas de 10 a 13 m e de 16 a 20 m mostram as maiores variações. Essas diferenças interferem na aplicação de correlações entre ensaios, para obtenção de parâmetros de projeto.

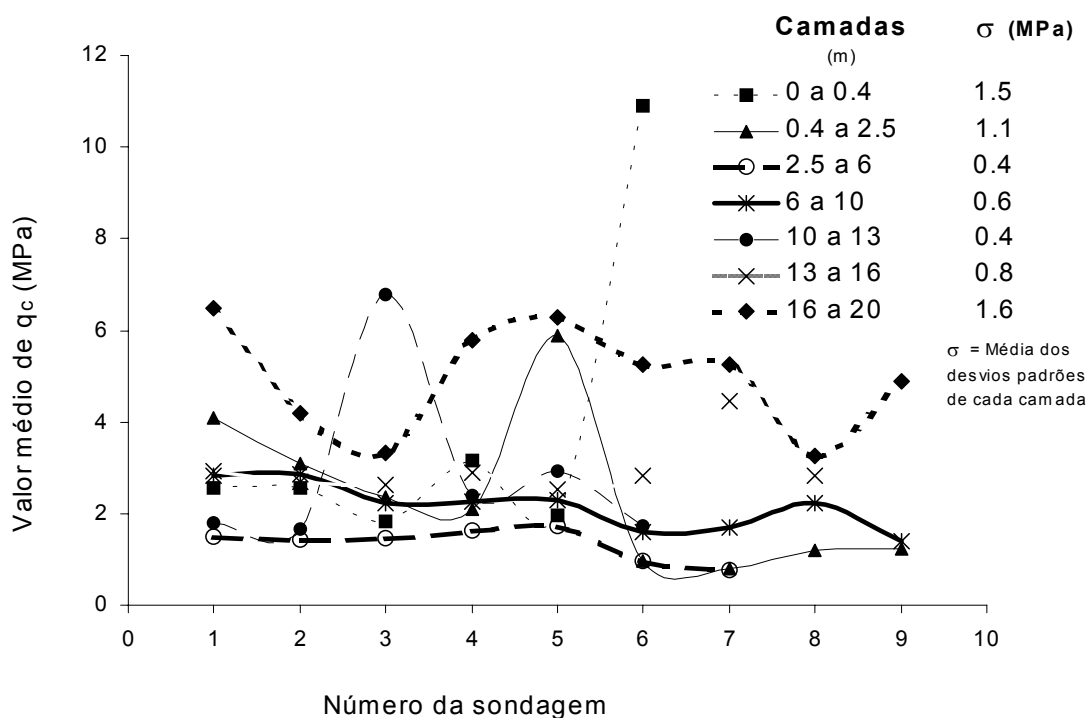


Figura 5.55 - Representação das variações dos valores médios de  $q_c$  em função do número de ensaios de piezocone realizados, para cada uma das camadas previamente definidas do Sítio São Carlos

Tabela 5.8 – Resultado da aplicação de testes estatísticos aos valores de  $q_c$  para as camadas definidas no Sítio São Carlos.

Valores de $q_c$ (MPa)										Camada	
Camada	Ensaio	Média de $q_c$ por ensaio	Média das médias	Desvio padrão de $q_c$ por ensaio	Média dos desvios padrões	Variância por ensaio	Média das variâncias	Escala de flutuação (cm)	Média das Escalas de Flut.	Topo	Base
<b>A0</b>	CPTU-01	2.55		0.4		0.16		2.11		0	0.4
	CPTU-02	2.56		0.6		0.23		5.51		0	0.4
	CPTU-03	1.83		1.02		0.5		6.23		0	0.4
	RCPTU-01	3.15		1.23		0.39		4.04		0	0.4
	RCPTU-02	1.95		0.56		0.29		4.89		0	0.5
	RCPTU-04	10.89	<b>3.82</b>	4.95	<b>1.46</b>	0.45	<b>0.34</b>	10.79	<b>5.60</b>	0	0.5
<b>A</b>	CPTU-01	4.09		1.13		0.28		22.78		0.4	2.2
	CPTU-02	3.09		1.13		0.37		34.39		0.4	2.4
	CPTU-03	2.37		1.35		0.58		35.59		0.4	2.8
	CPTU-04	2.09		0.77		0.37		26.28		0	1.9
	CPTU-05	5.88		4.14		0.7		27.32		0	1.9
	RCPTU-01	0.96		0.34		0.35		14.19		0.4	5.6
	RCPTU-02	0.8		0.21		0.26		13.59		0.5	5.1
	RCPTU-03	1.2		0.29		0.24		42.4		2.2	6.7
RCPTU-04	1.23	<b>2.41</b>	0.45	<b>1.09</b>	0.37	<b>0.39</b>	11.29	<b>25.31</b>	0.5	5.6	
<b>A1</b>	CPTU-01	1.48		0.42		0.29		18.9		2.2	6.1
	CPTU-02	1.42		0.43		0.3		6.67		2.4	6.1
	CPTU-03	1.47		0.43		0.3		8.86		2.8	6.5
	CPTU-04	1.63		0.17		0.11		12.13		3.3	6.8
	CPTU-05	1.72		0.79		0.46		13.17		3.3	6.8
	RCPTU-02	0.98		0.46		0.47		9.53		5.1	6.2
RCPTU-03	0.78	<b>1.35</b>	0.12	<b>0.40</b>	0.16	<b>0.30</b>	17.73	<b>12.43</b>	0	2.2	
<b>A2</b>	CPTU-04	1.14		0.08		0.07		9.46		1.9	3.3
	CPTU-05	1.07	<b>1.11</b>	0.19	<b>0.14</b>	0.18	<b>0.13</b>	6.3	<b>7.88</b>	1.9	3.3
<b>B</b>	CPTU-01	2.84		0.95		0.34		52.25		6.1	8.8
	CPTU-02	2.86		0.73		0.26		67.44		6.1	9.4
	CPTU-03	2.24		0.53		0.24		33.66		6.5	9.3
	CPTU-04	2.26		0.52		0.23		22.45		6.8	9.4
	CPTU-05	2.28		0.88		0.39		55.12		6.8	8.6
	RCPTU-01	1.61		0.5		0.35		44.87		5.6	10.2
	RCPTU-02	1.68		0.53		0.31		49.71		6.2	9.9
	RCPTU-03	2.22		0.41		0.19		48.09		8.3	14.2
RCPTU-04	1.39	<b>2.15</b>	0.5	<b>0.62</b>	0.36	<b>0.30</b>	25.8	<b>44.38</b>	5.6	9.7	
<b>B1</b>	RCPTU-03	1.68	<b>1.68</b>	0.33	<b>0.33</b>	0.19	<b>0.19</b>	25.13	<b>25.13</b>	6.7	8.3
<b>C</b>	CPTU-01	1.74		0.35		0.2		19.6		8.8	12.5
	CPTU-02	1.97		0.23		0.12		10.35		9.4	12.7
	CPTU-03	1.79		0.41		0.23		8.51		9.3	12.7
	CPTU-04	1.8		0.26		0.15		15.39		9.4	12.9
	CPTU-05	1.66		0.43		0.26		16.97		8.6	13.7
	RCPTU-01	1.91		0.31		0.16		8.63		10.2	12.6
	RCPTU-02	1.76		0.17		0.09		19.79		9.9	12.4
	RCPTU-03	3.86		1.21		0.31		5.89		14.2	15.6
RCPTU-04	1.89	<b>2.04</b>	0.25	<b>0.40</b>	0.13	<b>0.18</b>	25.16	<b>14.48</b>	9.7	12.4	
<b>C1</b>	CPTU-01	2.93		0.7		0.24		26.38		12.5	16.4
	CPTU-02	2.69		0.68		0.25		5.77		12.7	15.3
	CPTU-04	2.62		0.59		0.23		28.32		12.9	16.6
	CPTU-05	2.89		1.18		0.41		16.62		13.7	16.4
	RCPTU-01	2.51		0.34		0.13		7.6		12.6	14.9
	RCPTU-02	2.84		0.92		0.32		7.01		12.4	14.8
RCPTU-03	4.46		0.98		0.22		15.39		15.6	16.8	
RCPTU-04	2.83	<b>2.97</b>	0.8	<b>0.77</b>	0.28	<b>0.26</b>	17.09	<b>15.52</b>	12.4	16.5	
<b>D</b>	CPTU-01	6.49		2.27		0.35		29.34		16.4	20
	CPTU-02	4.2								15.3	20
	CPTU-03	3.31		1.27		0.38		29.75		12.7	17.2
	CPTU-04	5.78		1.52		0.26		19.9		16.6	19.6
	CPTU-05	6.29		2.18		0.35		26.46		16.4	21.8
	RCPTU-01	5.24		1.61		0.31		35.44		14.9	18.1
	RCPTU-02	5.24		1.87		0.36		55.3		14.8	18.8
	RCPTU-03	3.25		0.85		0.26		37.95		16.8	19.9
RCPTU-04	4.9	<b>4.97</b>	1.46	<b>1.63</b>	0.23	<b>0.31</b>	28.17	<b>32.79</b>	16.5	20.1	
<b>D1</b>	CPTU-03	3.11		0.95		0.31		10.74		12.7	13.1
<b>D2</b>	CPTU-03	2.6		0.79		0.31		6.99		13.1	15
<b>D3</b>	CPTU-03	4.64		1.22		0.26		12.45		15	15.5
<b>D4</b>	CPTU-03	3.41		1.36		0.4		8.94		15.5	16.4
<b>D5</b>	CPTU-03	4.19		1.33		0.32		8.05		16.4	16.8



### 5.4.2.5 Ensaio com piezocone sísmico

Durante o desenvolvimento desta pesquisa foram executados dois ensaios com piezocone sísmico, seguindo os procedimentos descritos no capítulo 4, Materiais e Métodos. Esses ensaios foram executados em posição que garantisse a ausência de possíveis interferências de outros ensaios e estruturas de fundação previamente instalados neste sítio, conforme o mapa da Figura 5.44. Os dois ensaios de piezocone sísmico foram executados a distância de 2,8 m, um do outro, alinhados na direção N-S, e os resultados de  $R_f$ ,  $q_c$  e *velocidade da onda S*, calculado pelo método intervalar, são mostrados na Figura 5.56. Nessa figura são mostrados ainda os resultados das medidas de  $V_s$  do piezocone sísmico, que são comparadas com as medidas obtidas nos ensaios de “cross-hole” (Giacheti, 1991 e 2001), mostrando ainda a descrição dos solos obtidas de sondagens de simples reconhecimento.

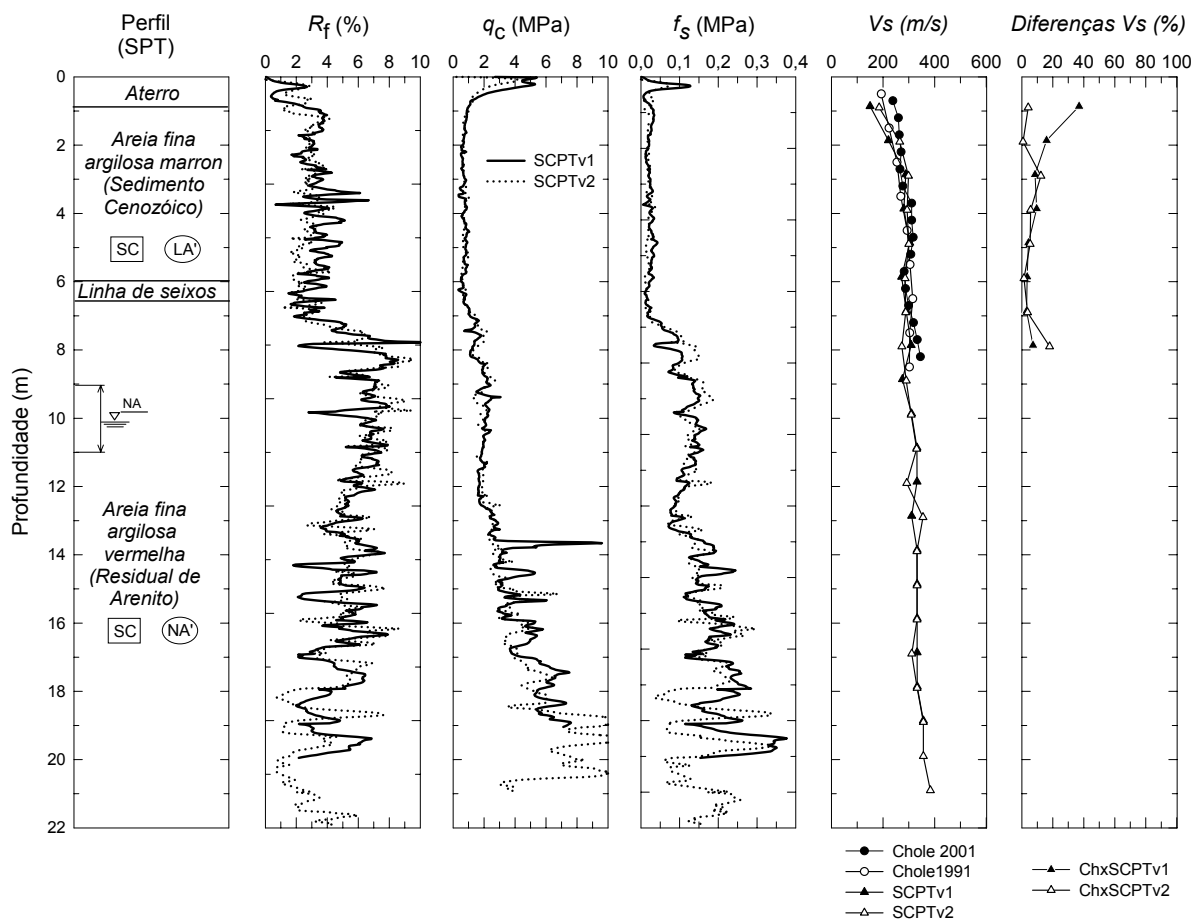


Figura 5.56 – Resultados de dois ensaios de piezocone sísmico, distantes de 2,8 m, executados no Sítio São Carlos.

Os resultados mostram perfis muito semelhantes, e a partir dos valores da razão de atrito ( $R_f$ ) podem ser individualizadas três porções distintas do maciço. A primeira até 7 m de

profundidade correspondente aos solos lateríticos, porosos e colapsíveis; a segunda, entre 7 e 15 m de profundidade é um solo relativamente homogêneo, de constituição argilo-arenosa, sem individualização de camadas e a terceira de 15 a 21 m de profundidade é um solo caracterizado por intercalação de camadas mais arenosas e mais argilas. Essas diferenciações não interferem nos valores das velocidades das ondas sísmicas.

As velocidades de onda S, determinadas em ensaios de piezocone sísmico, são comparadas com as velocidades da onda S determinadas a partir de ensaios de cross-hole executados nas posições indicadas na Figura 5.44 (Giacheti, 1991 e 2001) e mostrados na Figura 5.57.

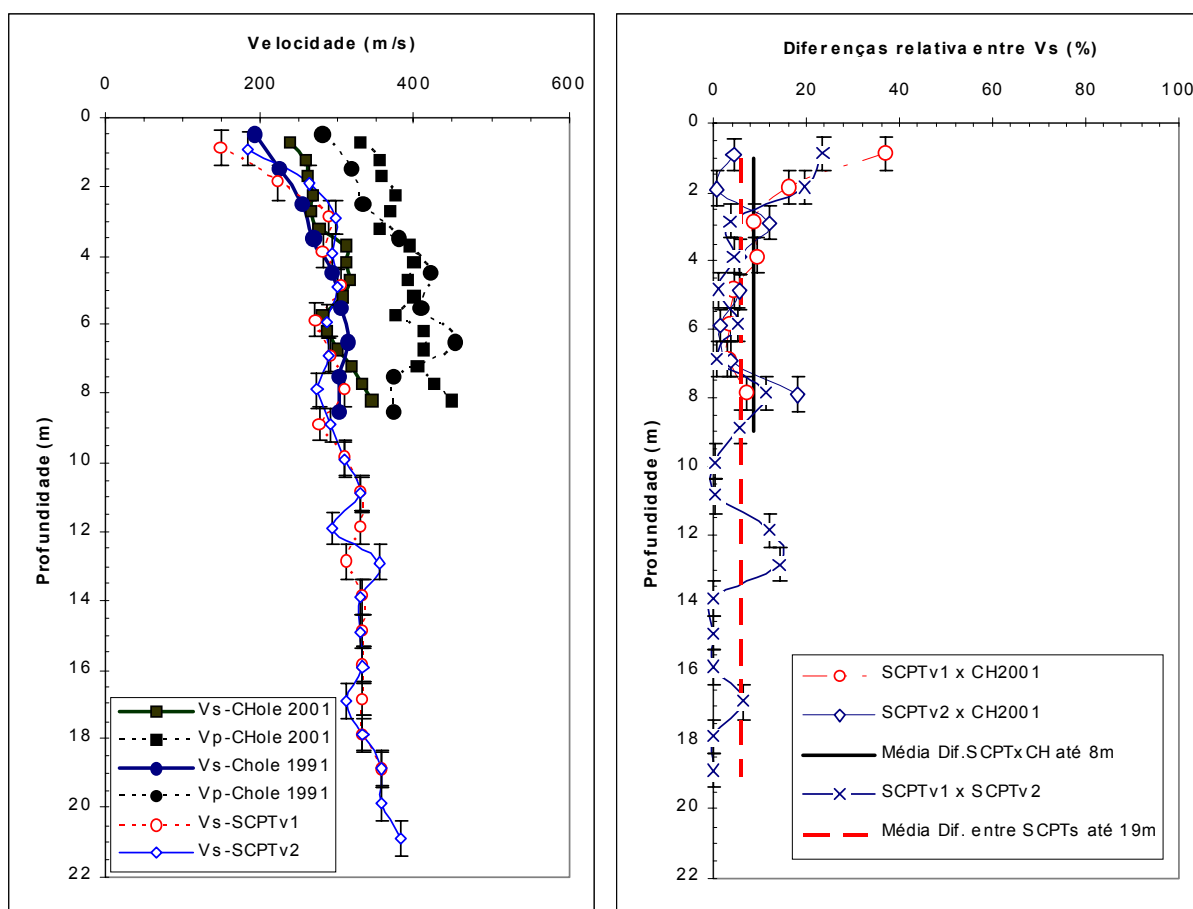


Figura 5.57 Comparação entre valores de  $V_s$  determinados em ensaios SCPT e “Cross-hole” realizados no Sítio São Carlos.

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de piezocone sísmico indicaram tendências semelhantes às obtidas nos ensaios de “cross-hole”, com variações que podem estar ligadas a variabilidade natural do solo, conforme mostrado na Figura 5.56, já que as ondas foram propagadas em direções distintas. Os resultados dos ensaios de “cross-hole” mostram valores semelhantes, porém um pouco superiores aos obtidos a partir do piezocone sísmico. Isto pode estar ligado a variabilidade do solo deste sítio, pois os ensaios foram executados em diferentes

posições do terreno, considerando que as direções de polarização da onda S nos ensaios de “cross-hole” e “down-hole” (no piezocone sísmico) foram praticamente ortogonais.

#### 5.4.2.6 Ensaio com piezocone de resistividade

Os resultados dos ensaios com piezocone de resistividade mostram que os registros de  $q_c$ ,  $f_s$  e  $u$ , são semelhantes aos demais ensaios de piezocone realizados neste sítio. Na Figura 5.58 são mostrados os resultados destes ensaios com a medida da resistividade. Os registros de resistividade não possibilitaram identificar claramente a posição do nível d’água, nem marcaram camadas com diferentes constituições. O processo de intemperismo tropical, associado à lixiviação da argila, liberação de óxidos de ferro e alumínio, e a pouca definição do contato entre camadas, devem ter contribuído para este tipo de resposta, limitando sensivelmente a aplicação deste ensaio nestes tipos de solos.

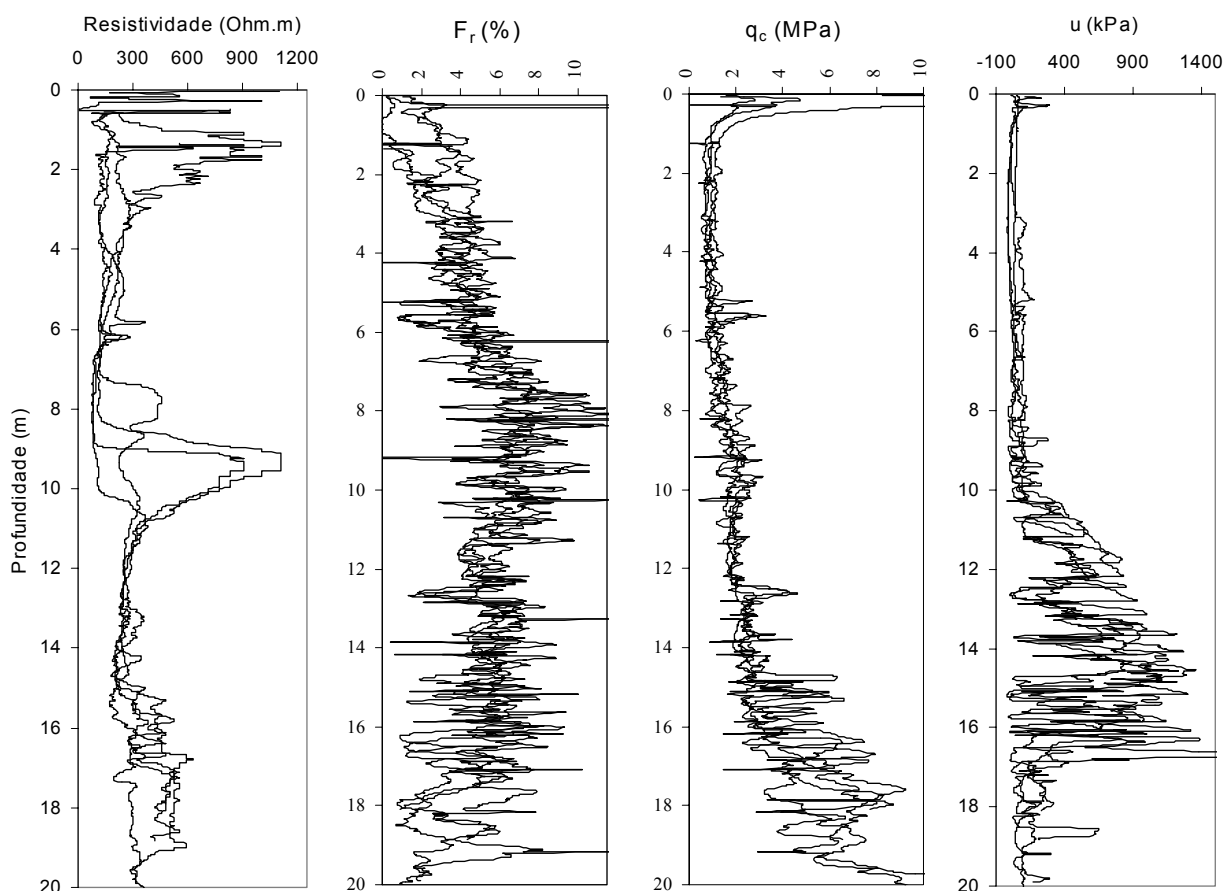


Figura 5.58 - Resultado de cinco ensaios com piezocone de resistividade (RCPTU), realizados em épocas distintas. Sítio São Carlos.

Na Figura 5.58 observa-se que entre 7 e 11 m de profundidade ocorrem picos de resistividade de até 1000 ohm.m, com posições distintas nos diferentes ensaios. Nesse sítio, o nível de água encontra-se próximo a 10 m de profundidade, com variações sazonais sensíveis. Esta variação do nível de água implica em variações no teor de umidade e no grau de saturação, o que pode explicar diferentes valores de resistividade na região próxima a posição do nível de água.

#### 5.4.2.7 Ensaios de piezocone com filtro de cavidade preenchido com graxa

No sítio São Carlos, todos os ensaios de piezocone foram realizados com filtro de cavidade preenchido com graxa porque o nível de água situa-se a profundidades que variam de 7 a 11 m. Os resultados dos registros de poro-pressão apresentados nas Figuras 5.53 e 5.58 indicam que a resposta do sensor inicia-se muito próximo à posição do nível de água que, neste tipo de perfil, funciona como um indicador da posição aproximada do nível de água. Abaixo do nível de água os registros do sensor de poro-pressão indicam claramente a alternância de camadas com diferentes respostas de poro-pressão, indicativas de constituição mais arenosa ou argilosa. Os registros de poro-pressão (Figuras 5.53 e 5.58) mostram que, entre 10 e 15 m de profundidade ocorrem intercalações de camadas com diferentes condições de drenagem, não indicadas nos registros de  $q_c$  e  $f_s$ . No entanto, abaixo de 15 m de profundidade a presença de alternância de camadas é evidenciada nos registros de  $u$  e nos valores de  $R_f$  e que as camadas da rocha sedimentar encontram-se preservada. Algumas das sondagens de simples reconhecimento indicam a presença destas camadas, porém com grau de precisão não condizente com o método, conforme indicado na Figura 5.53. Estas características sugerem que, nas profundidades entre 7 e 15 m, abaixo da linha de seixos, os solos devem ser residuais e teriam sido submetidos a intenso intemperismo tropical que suavizou o contato entre as camadas, provavelmente pela migração de minerais de argila. Desta forma, este processo poderia também ser responsável pelas classificações discordantes obtidas a partir dos resultados dos ensaios de piezocone e das análises granulométricas realizadas em laboratório (Figuras 5.49 e 5.50). Assim o registro da poro-pressão, utilizando filtro de cavidade preenchido com graxa nesse sítio, pode orientar de forma objetiva a identificação da estratigrafia nas porções do perfil situadas abaixo do nível de água.

### 5.4.2.8 Correlações entre parâmetros

#### 5.4.2.8.1– Relação $q_c/N_{SPT}$

Na análise da relação  $q_c/N_{SPT}$  foram utilizados os três critérios definidos no capítulo 4 (Materiais e Métodos). Além disso, esses valores foram comparados às propostas de Robertson et al. (1983) e Jeffereis & Davies (1993), para estimativa de  $N_{SPT}$  a partir de  $q_c$ . As Figuras 5.59 e 5.60 mostram os resultados da aplicação dos critérios de correlação para dois conjuntos de ensaios de SPT e de CPTU contíguos. Os resultados mostram que não ocorrem variações sensíveis quando comparados os critérios da média de  $q_c$  no trecho equivalente ao ensaio SPT (0,3 m) e da média de  $q_c$  em intervalos de um metro, indicando que existe razoável semelhança no perfil e que o contraste entre camadas, com base em  $q_c$ , não é tão marcante (Figuras 5.59.a e 5.60.a).

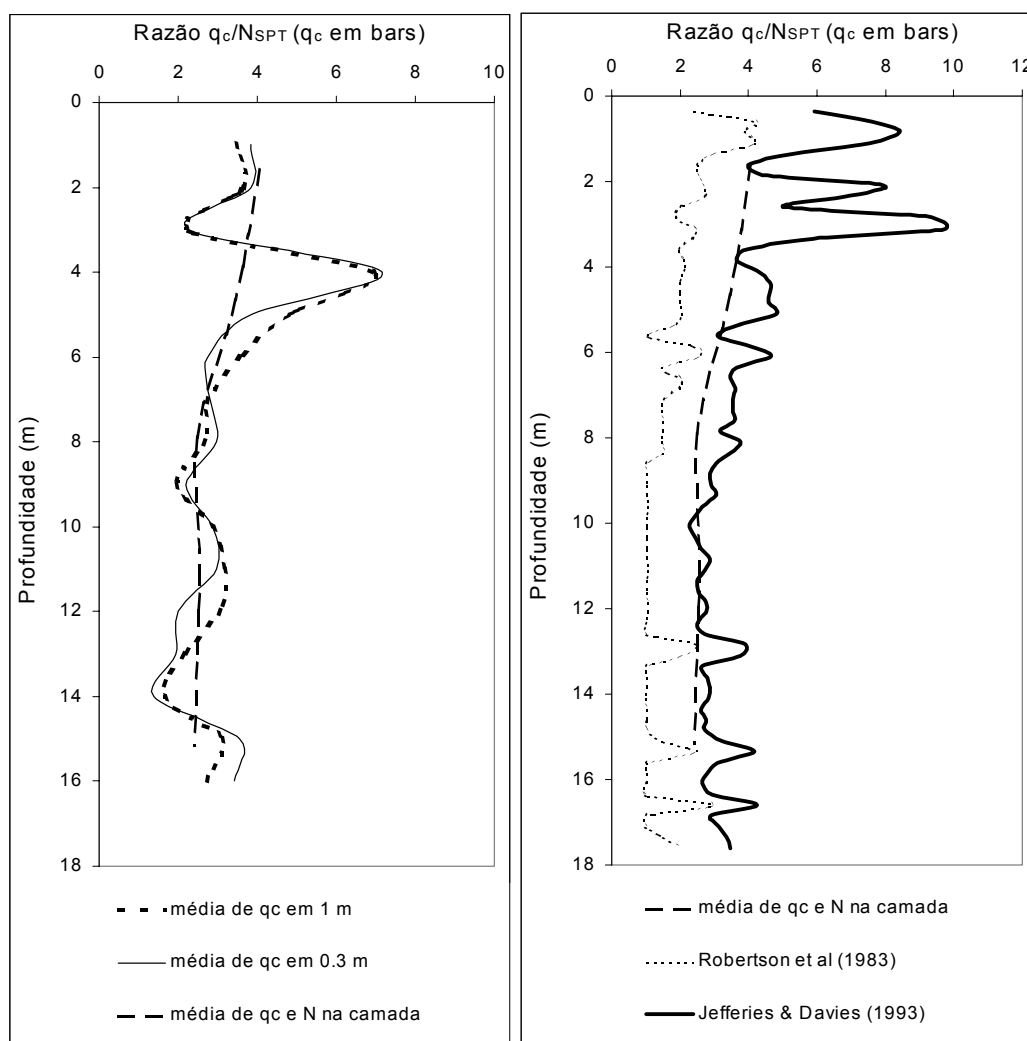


Figura 5.59 - Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  comparando medições em campo e previsões com base em correlações no Sítio São Carlos entre ensaios CPTU-03 e SPT-01.

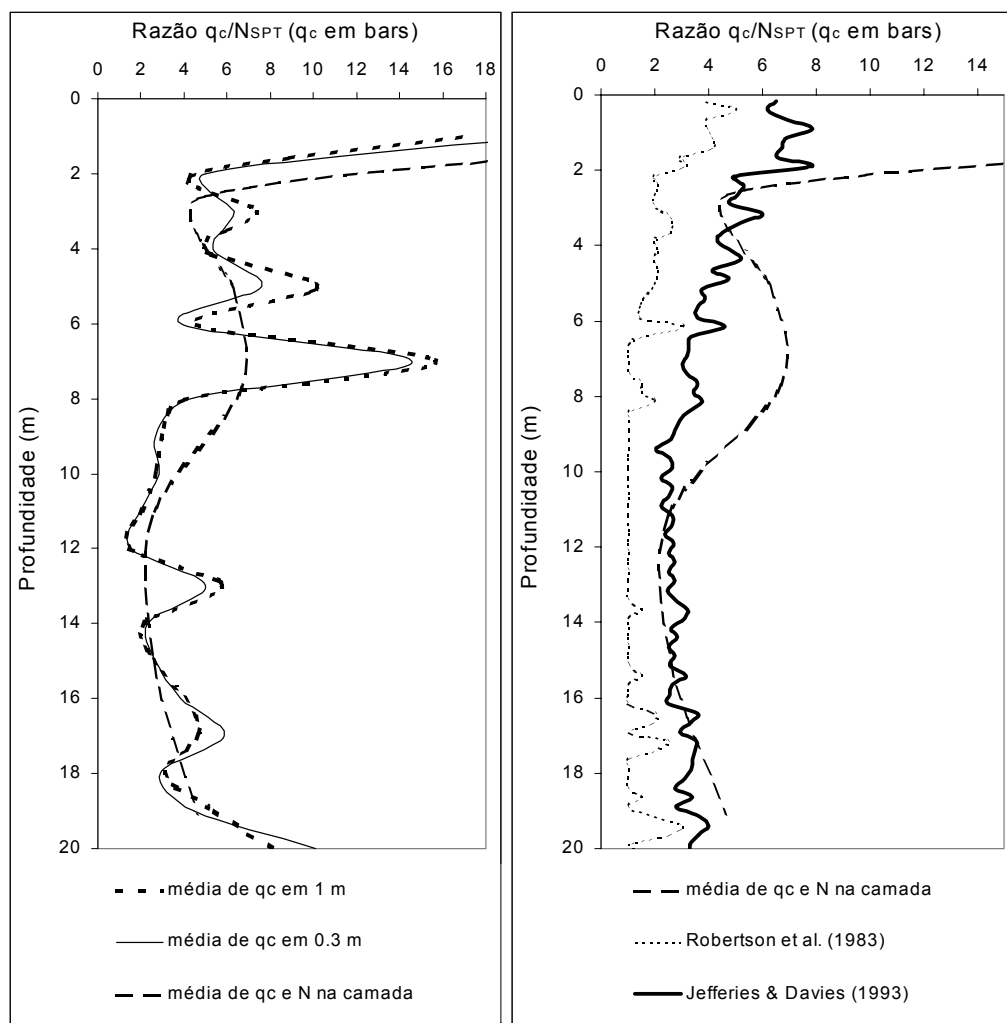


Figura 5.60 - Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  comparando medições em campo e previsões com base em correlações no Sítio São Carlos entre ensaios CPTU-05 e SPTT-05.

Os resultados da aplicação do critério da média de  $q_c$  e de  $N_{SPT}$  em camadas pré-definidas mostram suavização de picos proeminentes, presentes quando da aplicação dos critérios anteriores, e razoável concordância com as previsões realizadas com base na proposta de Jefferies & Davies (1993), enquanto que as previsões com base na proposta de Robertson et al. (1983) apresentam sistematicamente resultados da razão  $q_c/N_{SPT}$  mais baixos (Figuras 5.59.b e 5.60.b). Deve-se lembrar novamente que os valores de  $N_{SPT}$  não foram corrigidos para a energia efetiva aplicada durante os impactos, o que certamente contribui com parte das diferenças observadas nos resultados da proposta de Robertson et al. (1983).

5.4.2.8.2 – Relação  $G_0/q_c$ 

O módulo de cisalhamento máximo ( $G_0$ ) foi obtido a partir da medição da velocidade da onda de cisalhamento ( $V_s$ ) em ensaios de “cross-hole” e ensaios de piezocone sísmico. Na Figura 5.61 são mostrados os gráficos da relação  $G_0/q_c$  versus profundidade, com base em valores médios de  $q_c$ , medidos em ensaios de piezocone e  $G_0$ , obtido a partir dos ensaios de “cross-hole”. Essas figuras possibilitam comparar dois critérios distintos de seleção do valor médio de  $q_c$  de cada ensaio de piezocone. No primeiro critério são obtidos os valores médios de  $q_c$ , em intervalos de 0,5 m, com o ponto central sendo a profundidade do ensaio cross-hole, e no segundo critério este intervalo é de 1 m. Foram selecionados dois ensaios de piezocone (CPTU-01 e CPTU-02) para comparação com o ensaio de “cross-hole” (CH-1), e um ensaio de piezocone (CPTU-04) para comparação com o ensaio de “cross-hole” (CH2), com base na proximidade entre ensaios.

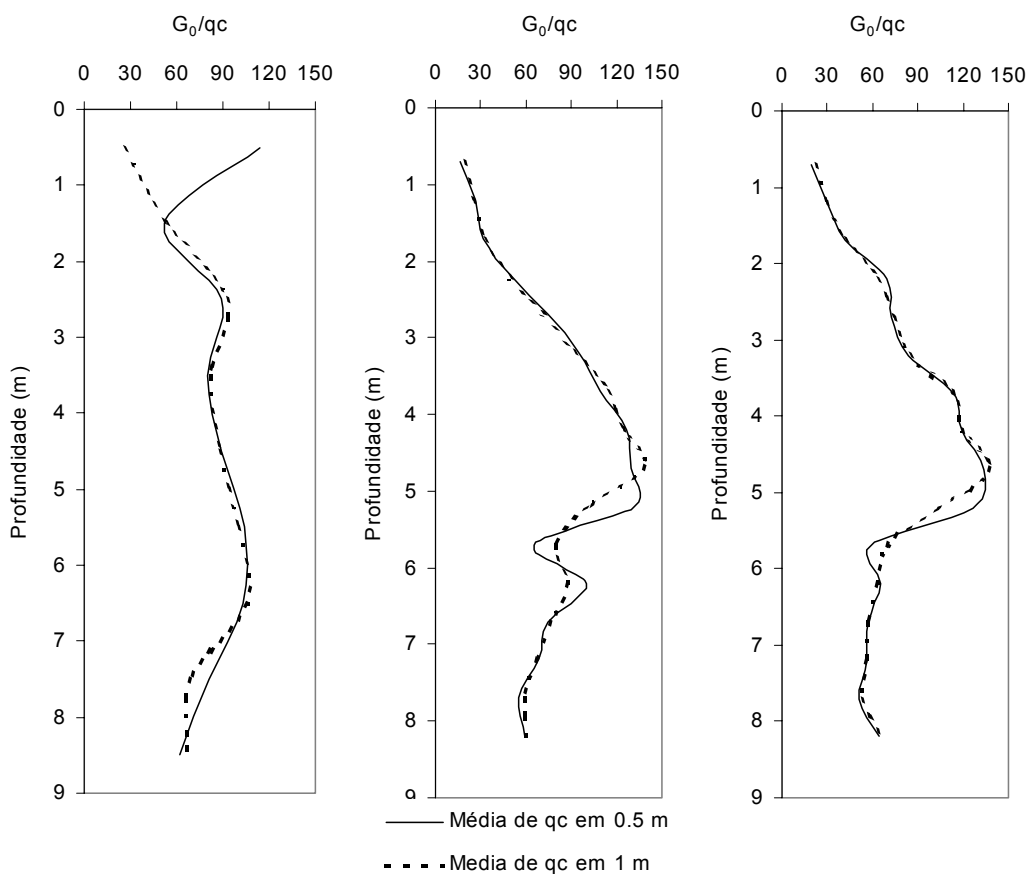


Figura 5.61 – Relação  $G_0/q_c$ , com base em ensaios de piezocone e cross-hole, comparando diferentes critérios na seleção do valor de  $q_c$  (a) CPTU-04 - CH-2, (b) CPTU-01 - CH-1 e (c) CPTU-02 - CH-1.

Nos resultados apresentados na Figura 5.61 observa-se que a variação no critério de seleção de  $q_c$  não modifica sensivelmente o valor da relação  $G_0/q_c$ , excetuando-se o primeiro

metro, na Figura 5.61.a, onde os valores de  $q_c$  diferem sensivelmente, talvez devido à eventuais presenças de material ressecado em superfície, de raízes ou aterros, ou ainda por efeito da sucção, que podem interferir nesse parâmetro. Os valores da relação  $G_0/q_c$  são crescentes até a profundidade de 6 m e variam de 40 a 120. A partir de 6 m de profundidade ocorre redução sensível na relação  $G_0/q_c$  com valores próximos a 60 (Figura 5.61.a,b e c).

A relação  $G_0/q_c$  foi obtida também a partir dos ensaios de piezocone sísmico sendo que, neste caso, os registros de  $q_c$  e  $G_0$  foram obtidos na mesma posição, o que tende a minimizar os efeitos da variabilidade física do solo. A Figura 5.62 mostra o resultado da relação  $G_0/q_c$  versus profundidade, obtido a partir dos dois ensaios de piezocone sísmico, executados durante este trabalho. Os resultados mostram similaridade nos dois ensaios, o que era previsível em função da pequena distância que os separa. O intervalo entre 2 e 8 m de profundidade mostra valores da relação  $G_0/q_c$  próximos a 200, com redução sensível a partir de 8 m de profundidade, onde os valores variam entre 80 e 110 até 15 m, tendendo a decrescer a partir desta profundidade, com valores variando de 50 a 30 até o limite dos ensaios (Figura 5.62).

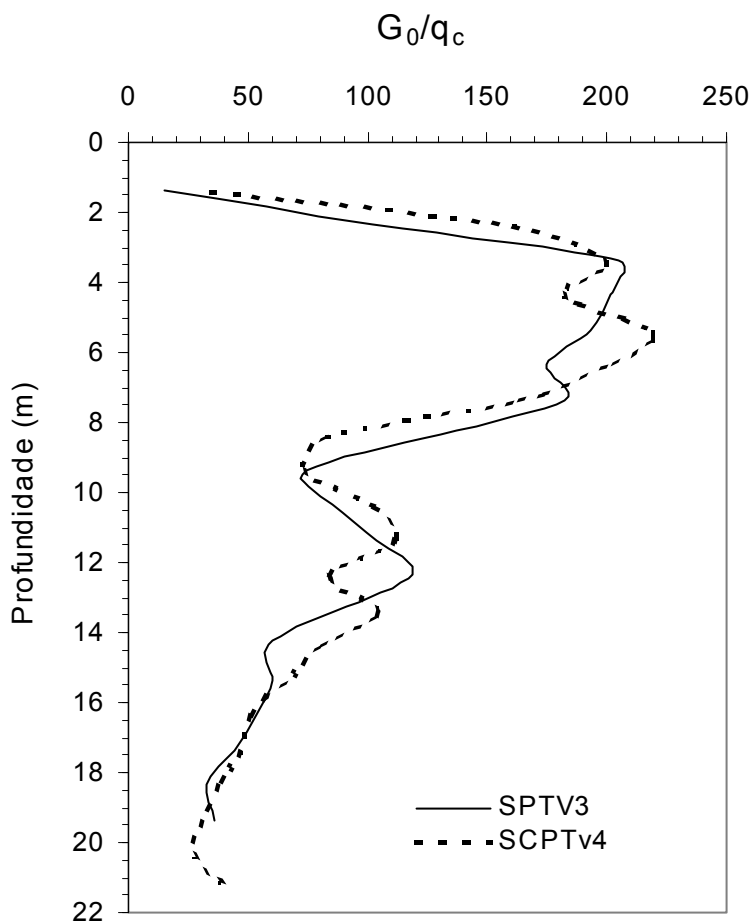


Figura 5.62 – Relação  $G_0/q_c$ , com base em resultados de ensaios de piezocone sísmico (SCPTV-3 e SCPTV-4)



### 5.4.3 Sítio Campinas

#### 5.4.3.1 Considerações gerais

O sítio de pesquisa aqui descrito é um campo experimental de pesquisas em Fundações das Faculdades de Engenharia Agrícola e Civil, situado no Campus da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Serão apresentados e discutidos resultados de cinco ensaios de piezocone, dois de piezocone sísmico, sete de cone elétrico e doze sondagens de simples reconhecimento realizadas em duas campanhas distintas, com descrições do perfil de solo com diferentes níveis de detalhe, além de um poço para coleta de amostras e inspeção visual do perfil de solo, com localização indicada na Figura 5.63. Em três ensaios de piezocone foi usado o filtro de cavidade preenchido com graxa automotiva e em dois o elemento poroso saturado com glicerina. O nível de água é muito variável foi detectado a profundidades acima de 15 m, identificado a partir das sondagens de simples reconhecimento.

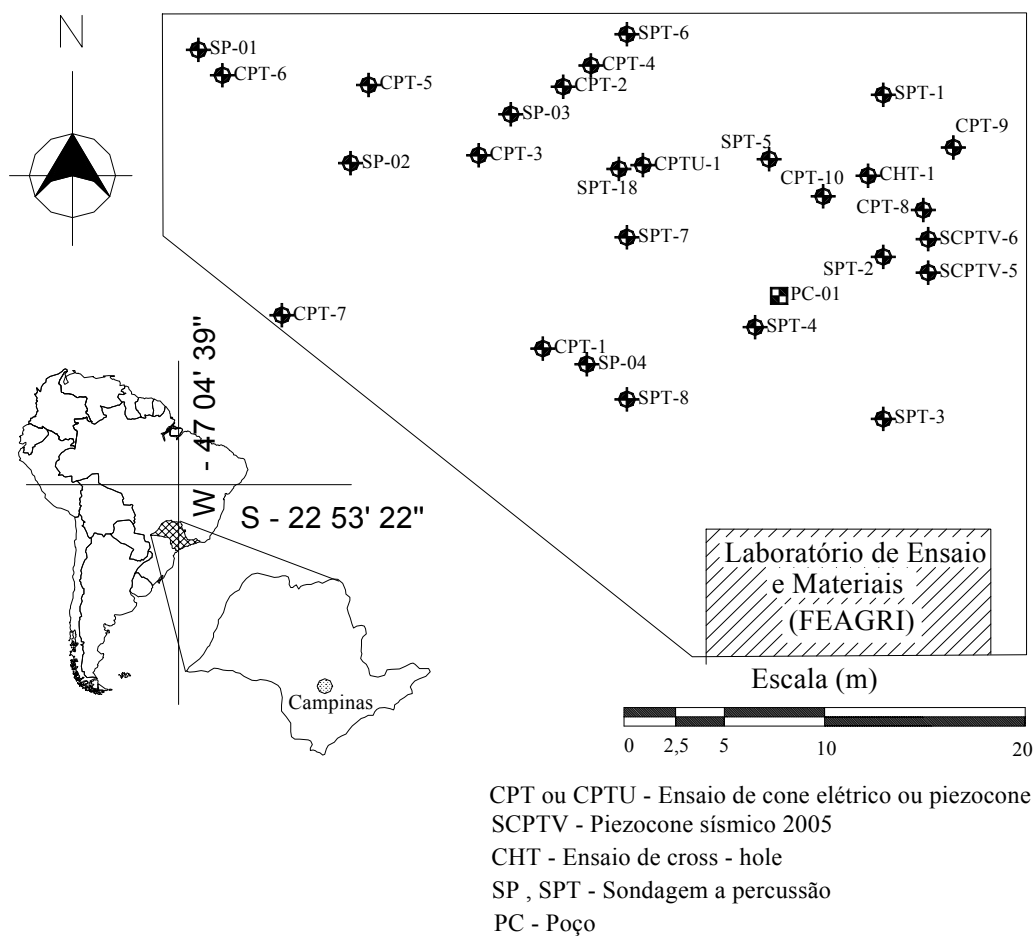


Figura 5.63 – Localização da cidade de Campinas e dos ensaios de piezocone e sondagens de simples reconhecimento utilizados neste trabalho no Sítio Campinas.

#### 5.4.3.2 Caracterização Geológica

O sítio Campinas está situado sobre rochas intrusivas básicas da Formação Serra Geral, sendo constituído predominantemente por diabásios (IPT, 1989) que, quando muito fraturado, favorece a alteração intempérica ao longo destes planos. Diversos autores consideram que o solo é residual e resulta da alteração intempérica de diabásios (Carvalho et al., 2000). A alteração provavelmente avançou ao longo das fraturas, com preservação de porções menos alteradas em meio ao solo residual e desenvolvimento de transição solo-rocha muito irregular e de difícil definição sem o uso de métodos indiretos como a geofísica de superfície, associada a sondagens rotativas. Carvalho et al. (2000) apresentam o perfil indicado na Figura 5.64, que seria representativo do subsolo deste sítio experimental.

As sondagens de simples reconhecimento e os ensaios de piezocone mostram a ocorrência de porções mais resistentes em meio ao solo residual jovem, situado a profundidades menores do que 15 m e indicadas como níveis mais arenosos nas classificações tácteis-visuais. Nesse trabalho, estas porções foram interpretadas como núcleos menos alterados, que mostram resposta drenada (comportamento de areia) à penetração do piezocone.

Os dados disponíveis indicam presença de solo laterítico colapsível até profundidade de 6 metros (Monacci, 2000), seguido de zona de transição com eventual presença de crostas lateríticas e de solo residual maduro até profundidades variáveis de 15 a 18 m. Em meio ao solo residual maduro é possível encontrar maior concentração de argila nas porções mais superficiais entre 7 e 10 m que, apesar da profundidade, pode ser sugestivo de processo pedogenético que concentra minerais de argila no horizonte B. Em profundidades maiores que 18 m ocorrem solos residuais mais jovens, com ocorrência comum de núcleos de rocha menos alterada em meio ao solo residual. Este é o perfil praticamente completo de solo tropical residual, onde a porção superficial fortemente lixiviada é muito porosa; os níveis intermediários de solos residuais maduros exibem maior concentração de argila e presença aleatória de blocos menos alterados e as porções mais profundas mostram alternância de solos mais e menos alterados. Os ensaios da classificação MCT para solos tropicais indicam comportamento laterítico para a porção mais superficial e comportamento não-laterítico abaixo de 6 a 7 m de profundidade com, aproximadamente de acordo com a descrição mostrada anteriormente.

Figura 5.64 - Perfil geotécnico do Campo Experimental Feagri da Unicamp, no Sítio Campinas (Carvalho et al., 2000)

Prof. (m)	Descrição	C(kPa)	$\Phi$	$\gamma_{\text{nat}}$	e
0	Argila silto-arenosa de alta porosidade muito mole a mole, marrom avermelhada - laterítica	27	30°	13,6	1,72
6,0	Areia fina a média argilo-siltosa, pouco compacta, marrom amarelada	-	-	-	-
6,5	Silte argilo-arenoso, mole a duro, variegado (solo residual), não-laterítico	58	22°	15,5	1,52
14,0	Silte argilo-arenoso, mole a duro variegado (solo residual), não-laterítico	66	20°	16,5	1,51
16,0					

#### 5.4.3.3 Identificação do perfil estratigráfico

Na interpretação do perfil estratigráfico deve-se necessariamente considerar as histórias de formação dos diabásios e de evolução do perfil e do terreno, considerando o contexto geológico descrito no item 5.4.3.2. As informações disponíveis sugerem que o perfil de solo foi originado pela alteração de diabásios em clima tropical que, por rastejo, originou cobertura coluvial. Os aspectos já discutidos no capítulo 2, originários de publicações prévias, mostram que, neste tipo de perfil, o conceito de camada horizontal não pode ser aplicado. As correlações entre ensaios e sondagens devem considerar o grau de alteração de cada trecho do perfil estratigráfico, que é obtido só a partir da análise de amostras, porém nem sempre de fácil avaliação. Por outro lado, a evolução pedogenética tropical extrema, com cimentações, formação de concreções e migração de minerais de argila, podem formar “estratos” mais superficiais, cujas posições e as continuidades vertical e lateral podem estar vinculadas à morfologia do terreno (Gidigas, 1974; Dearman et al., 1989; Cooke & Doornkamp, 1990).

A Figura 5.65 permite que sejam comparados três métodos distintos de interpretação das transições entre “camadas”, em pontos de sondagem próximos (CPT-1, SP-4 e SPT-8). Na situação A os resultados dos ensaios de piezocone são tratados através do teste estatístico  $D^2$  pelo critério das janelas móveis com 2 m. Os picos dos resultados do teste  $D^2$  indicam as transições potenciais, onde os picos mais intensos representam as principais transições. Na situação B são indicadas as transições identificadas pela inspeção visual dos resultados dos

ensaios de piezocone, que exige uma certa experiência prévia. Nas situações C e D são indicadas as transições baseadas em resultados das sondagens de simples reconhecimento, com valores de  $N_{SPT}$ . Apesar das diferenças de precisão entre os métodos, são perceptíveis diferenças sensíveis entre as posições das transições identificadas pelos diferentes métodos, até pela comparação com valores do  $N_{SPT}$  de sondagens muito próximas (distância menor que 3 m) as diferenças são marcantes. A identificação deste tipo de perfil de solo, pode ser bastante difícil e comprometer a própria correlação entre ensaios executados em diferentes posições.

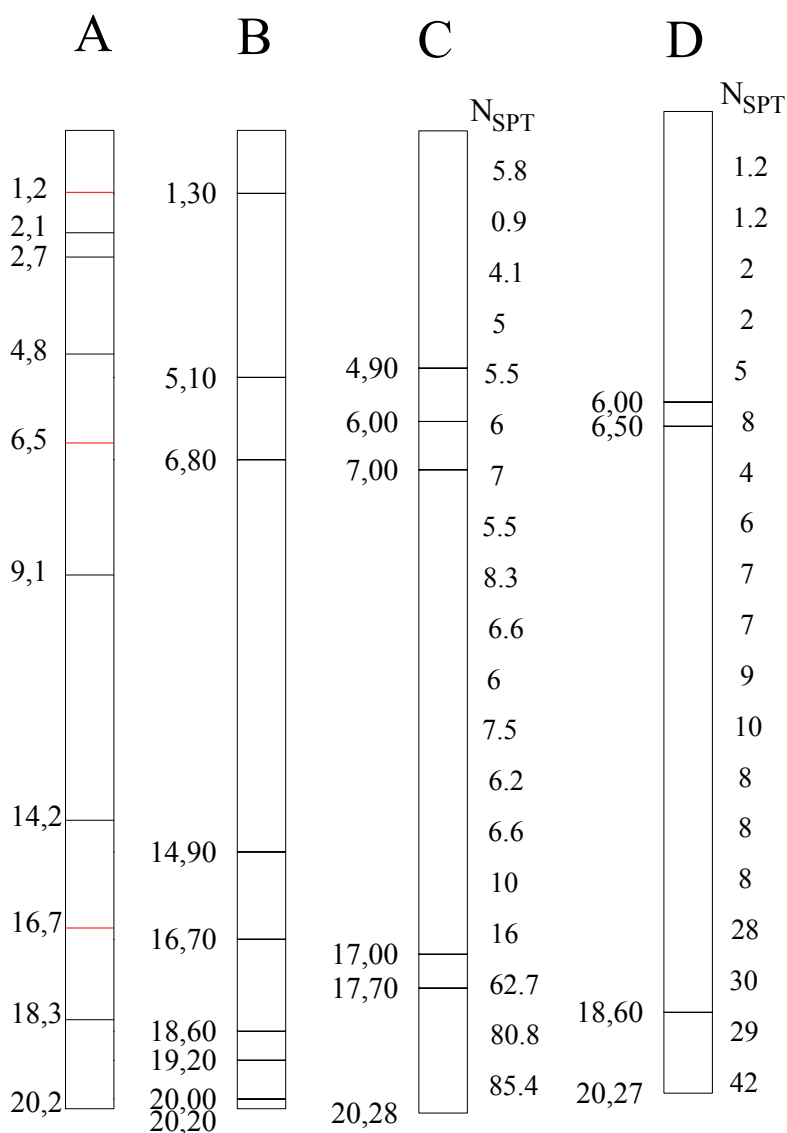


Figura 5.65 - Comparação entre posição dos limites de camadas em perfis de solos, através de distintos métodos. A – Teste estatístico  $D^2$  com janela de 2 m aplicado ao  $q_c$  do ensaio de piezocone, B – Inspeção visual de resultados do piezocone, C e D – Resultados de sondagens de simples reconhecimento, com indicação do  $N_{SPT}$ . CPT-1, SP-4 e SPT-8 do Sítio de Campinas.

Quando são comparadas classificações obtidas a partir dos resultados de sondagens de simples reconhecimento, distantes uma da outra cerca de 7 m, conforme mostrado na Figura 5.66, verifica-se que existem diferenças sensíveis na posição das transições e nas classificações texturais, mesmo quando realizados por uma única empresa. Este fato pode ser atribuído à grande heterogeneidade do perfil, que restringe a indicação, a delimitação e a classificação do perfil estratigráfico segundo o conceito tradicional de camadas.

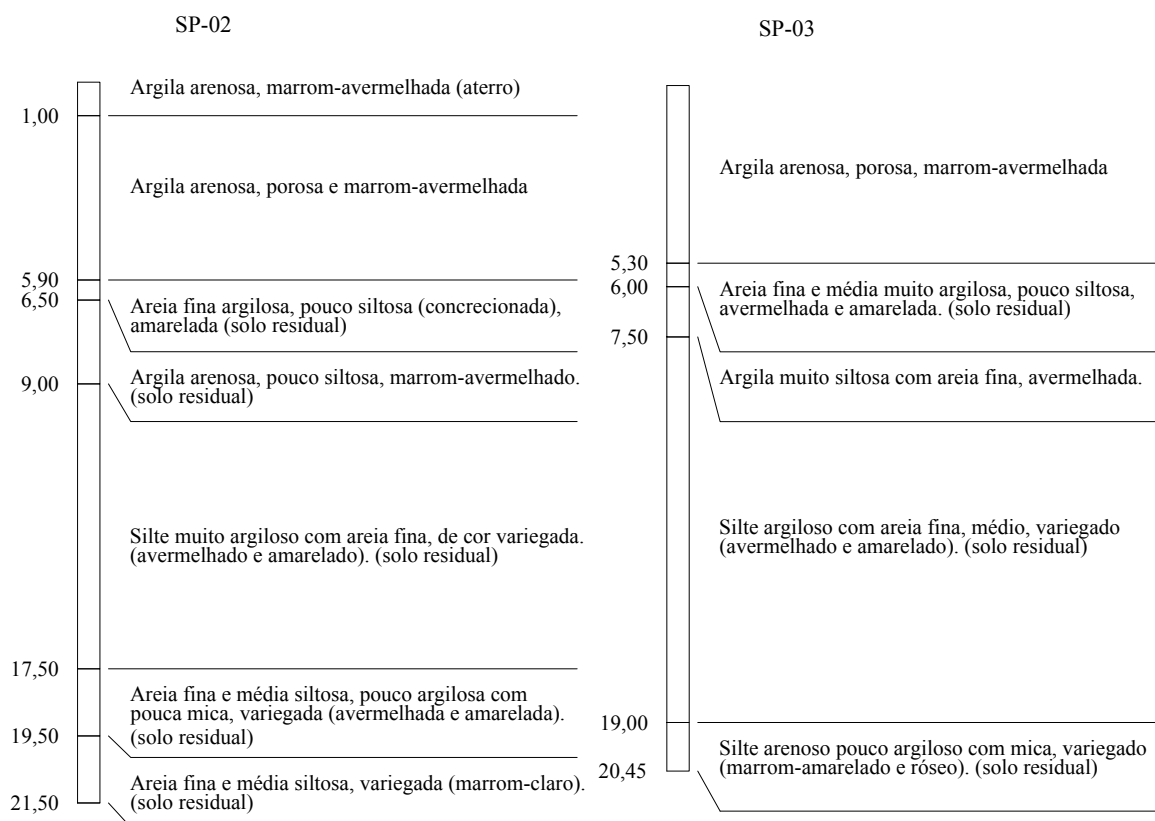


Figura 5.66 – Comparação entre resultados de classificações tácteis-visuais de amostras de sondagens de simples reconhecimento, distantes uma da outra cerca de 7 m (SP-2 e SP-3), realizados por mesma empresa.

Na interpretação do perfil estratigráfico, os níveis classificados como mais arenosos poderiam corresponder a porções menos alteradas do diabásio e a profundidade do limite de penetrabilidade pode variar em função da presença de blocos rochosos não-alterados, em diferentes posições do maciço. Eles são provavelmente controlados pelo padrão de fraturamento da rocha sã. Este aspecto reflete de forma marcante na importância da gênese das rochas e do perfil de intemperismo na interpretação estratigráfica de um perfil de solo. Nas intrusões de diabásio, principalmente em corpos menos espessos, como os do Sítio Campinas, provavelmente não existem grandes diferenças de composição e estrutura interna, e só padrão de fraturamento da rocha sã interferiria na alteração. Se fossem basaltos, estariam estratificados em função de vários derrames e do tempo decorrido entre os derrames, com

possibilidade de diferenças composicionais sensíveis entre os vários estratos, que interferem nos processos de alteração.

Na Figura 5.67 têm-se as interpretações do perfil de solo baseada em ensaios de caracterização em laboratório, em amostras de sondagem de simples reconhecimento e ensaios de piezocone. Conforme resultados de ensaios de piezocone são apresentadas duas formas de interpretação: a primeira envolve a utilização de ábacos da proposta de Robertson et al. (1986) e a segunda segue a proposta de Zhang & Tumay (1999). As interpretações mostram características semelhantes e refletem gênese similar destes solos.

No local da sondagem SPT-18, que foi a mais profunda, foram encontradas características típicas de solos de alteração do diabásio. As porções mais superficiais, até cerca de 6 m, são constituídas por solos argilosos, conforme análises granulométricas em laboratório, porém, em descrição tátil-visual mostram elevada porosidade e também cimentação, com índices de vazios elevados. No entanto, as interpretações a partir dos resultados dos ensaios de piezocone indicam solos arenosos a siltosos, resultantes da pedogênese intensa, com lixiviação de parte da fração argilosa e desenvolvimento de estrutura porosa acentuadamente colapsível (Monacci et al., 1997). Neste caso, o contraste mostrado entre as diferentes interpretações está intimamente ligado à gênese tropical destes solos.

No intervalo de 6 a 14 m (Figuras 5.67 e 5.68), porção do maciço de solo exhibe constituição francamente argilo-siltosa, cujas interpretações táteis-visuais, pelo piezocone e pelos ensaios de laboratório são semelhantes. Este trecho poderia apresentar concentração de fração argila, típica de evolução pedogenética de solos tropicais maduros. Nas porções mais inferiores do perfil, abaixo de 14 m de profundidade, predominam peculiaridades de solos saprolíticos jovens, com intercalações de porções com graus de alteração diferenciados no maciço de solo. Os níveis de comportamento mais arenoso representariam porções menos alteradas do perfil. Este aspecto interfere sensivelmente na identificação da estratigrafia do terreno e nas correlações entre ensaios situados em diferentes posições do maciço, com elevadas variabilidades horizontal e vertical, com valores de resistência à penetração e nas profundidades das zonas de impenetrabilidade variáveis, mesmo a pequenas distâncias, conforme Figura 5.65.

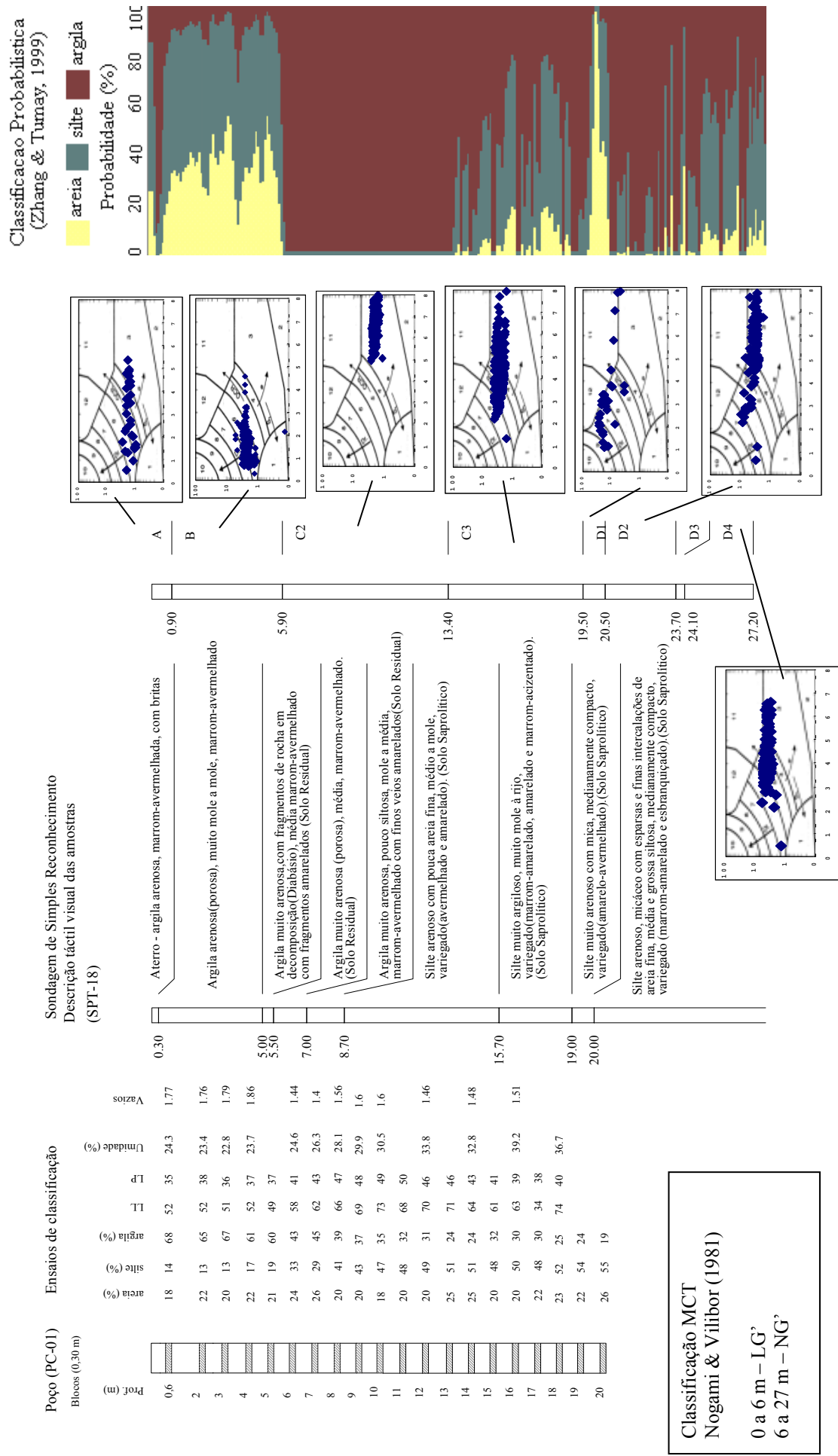


Figura 5.67 - Comparação entre métodos de classificação do solo: Ensaios de laboratório, sondagens de simples reconhecimento e ensaios de piezocone (CPTU-1, SPT-18) do Sítio Campinas

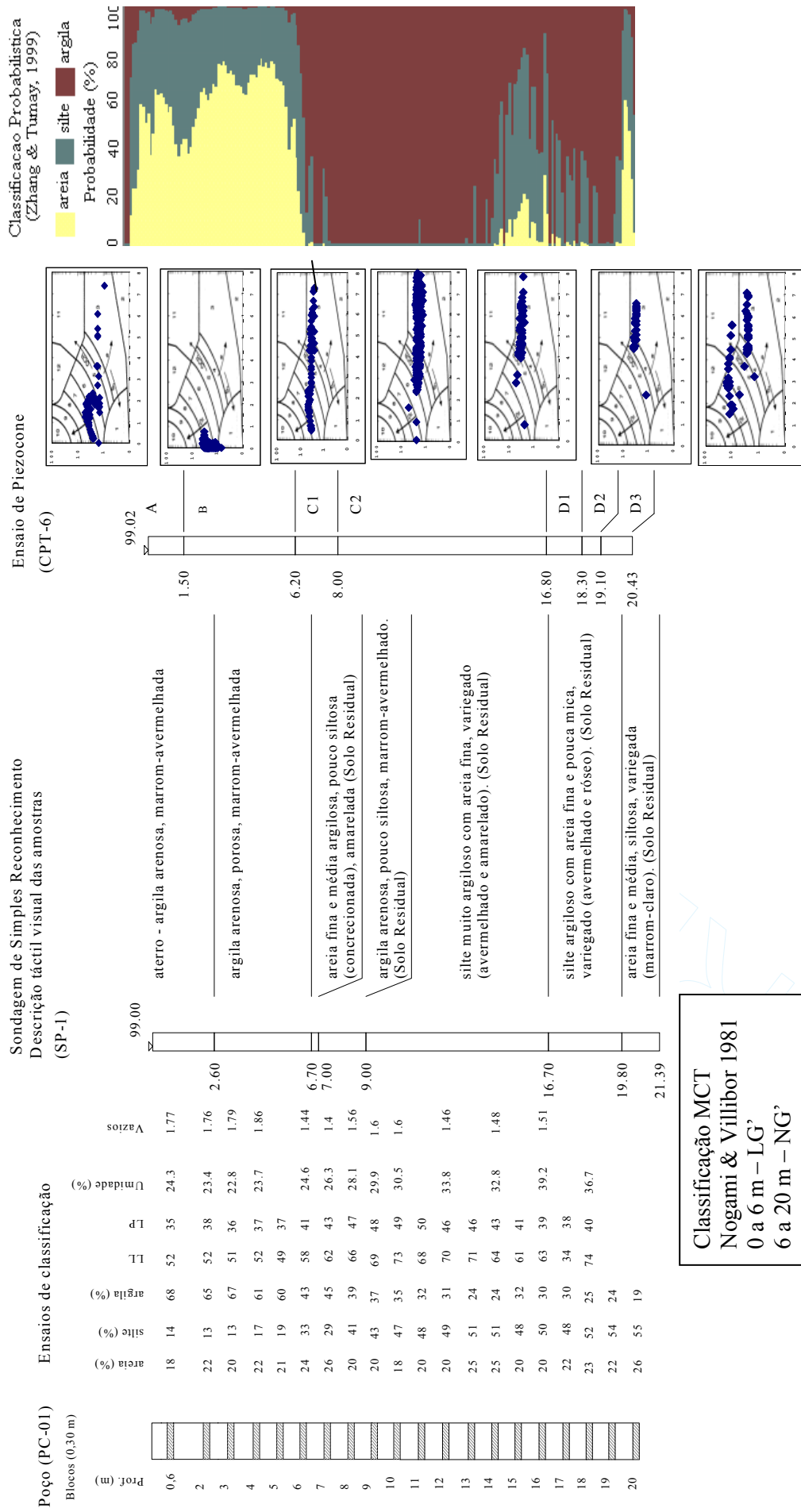


Figura 5.68 - Comparação entre métodos de classificação do solo: Ensaios de laboratório, sondagens de simples reconhecimento e ensaios de piezocone (CPT-6, SP-1). Sítio Campinas.



Neste tipo de perfil, não podem ser utilizados os conceitos de camadas horizontais para interpretação das porções do maciço situadas entre os pontos de sondagem ou entre ensaios e isto dificulta o estabelecimento de parâmetros geotécnicos médios de projeto. A quantidade de sondagens para a melhor caracterização do solo deve ser maior. Mesmo nas porções mais superficiais, em meio ao solo residual maduro, podem ocorrer blocos rochosos. (Foto 5.3)



Foto 5.3 – Blocos rochosos pouco alterados, encontrados em poço a cerca de 7 m de profundidade, no Sítio Campinas (SP).

#### 5.4.3.4 Análise estatística

A partir de todos os resultados dos ensaios de cone elétrico e piezocone foi realizada compartimentação do maciço de solo, procurando subdividir o perfil de cada ensaio em porções razoavelmente homogêneas com base na análise simultânea de  $q_c$ ,  $R_f$  e  $u$ . Os valores de  $q_c$  foram tratados estatisticamente, obtendo-se a média, o desvio padrão, o coeficiente de variação e a escala de flutuação, no interior das “camadas” definidas para cada ensaio, e com profundidades variáveis em cada ponto de ensaio em função da posição das transições identificadas. Estes dados foram agrupados por “camadas”, calculando-se os valores médios

de  $q_c$  para cada trecho, conforme a Tabela 5.9. Apesar da restrição conceitual no uso do termo “camada” neste tipo de perfil, os resultados dos ensaios de piezocone mostram comportamentos semelhantes em vários pontos investigados, sugerindo a presença dessas discontinuidades. Na Figura 5.69 é apresentada a variação do valor médio de  $q_c$ , em todos os ensaios de cone elétrico ou piezocone, onde as referidas “camadas” ocorrem. É importante observar que as profundidades indicadas na Figura 5.69 são variáveis ao longo da área de distribuição dos ensaios, servindo apenas para identificação das posições aproximadas. O valor do desvio padrão indicado representa uma média dos desvios padrões de  $q_c$  no interior de cada “camada” nos ensaios considerados.

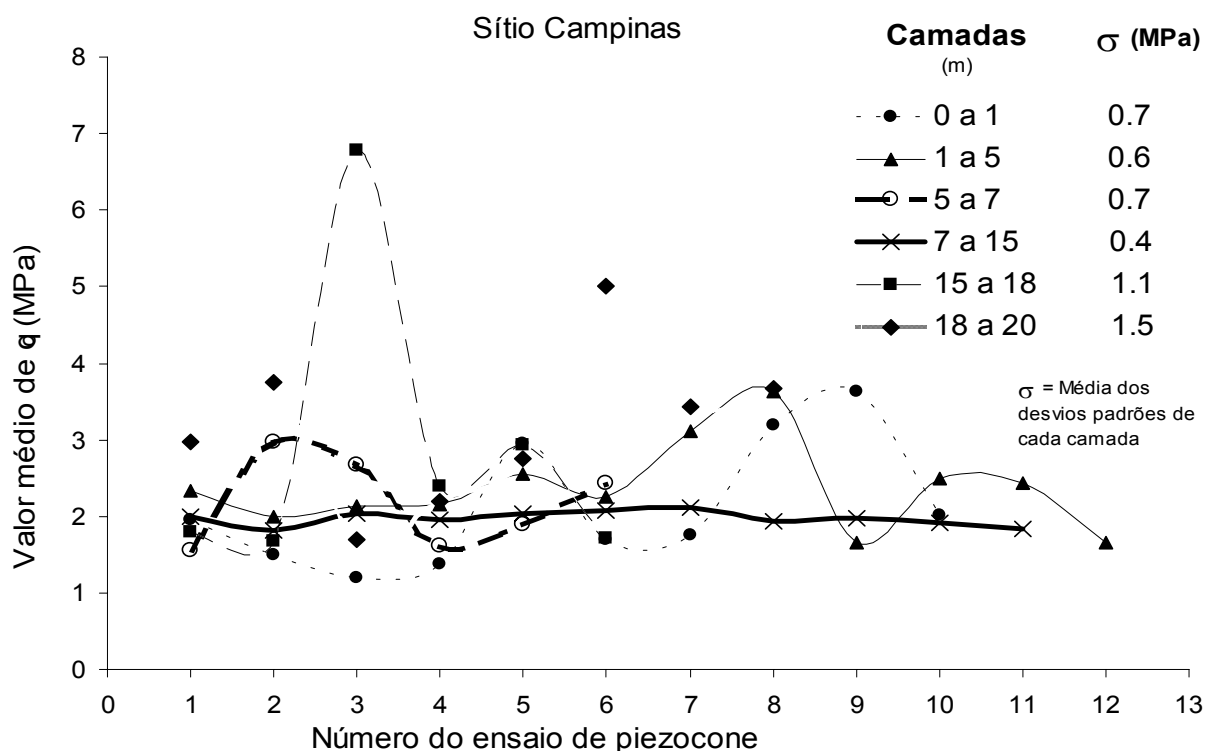


Figura 5.69 - Representação das variações dos valores médios de  $q_c$  em função do número de ensaios de piezocone e cone elétrico realizados, para cada uma das camadas previamente definidas, no Sítio Campinas (SP).

Observa-se que as maiores variações de  $q_c$  ocorrem nos níveis de 15 a 18 m e de 18 a 20 m de profundidade, provavelmente devido aos diferentes graus de alteração em cada posição do maciço de solo, sendo também a porção do maciço onde o desvio padrão de  $q_c$  em cada “camada” é sensivelmente maior. O nível que apresenta a menor variação dos valores de  $q_c$  é o situado entre 7 a 15 m de profundidade, que coincide com o intervalo onde os valores de  $R_f$  são mais altos, provavelmente por efeito de processos pedogenéticos, ainda não esclarecidos adequadamente.

Tabela 5.9 – Resultados da aplicação de testes estatísticos aos valores de  $q_c$  para as camadas definidas do Sítio Campinas (SP).

Camada	Ensaio	Valores de $q_c$ (MPa)						Escala de flutuação (cm)	Média das escalas de flutuação	Camada	
		Média de $q_c$ por ensaio	Média das médias	Desvio padrão de $q_c$ por ensaio	Média dos desvios padrões	Variância por ensaio	Média das variâncias			Topo	Base
A	CPT-10	1.96		0.73		0.37		5.48		0	0,6
	CPT-2	1.5		0.31		0.19		6.9		0	0,5
	CPT-4	1.19		0.72		0.36		21.75		0	1,8
	CPT-1	1.37		0.64		0.46		11.04		0	1,3
	CPT-6	2.95		1.13		0.38		32.24		0	1,5
	CPTU-1	1.69		0.45		0.27		11.08		0	0,9
	CPT-5	1.75		0.47		0.27		18.33		0	1,5
	CPT-7	3.19		0.86		0.27		12.14		0	1,1
	CPT-9	3.63		0.48		0.13		2.87		0	0,8
	CPTU-2u2	2.02	2.13	1.36	0.72	0.68	0.34	8.37	13.02	0	1,7
B	CPT-10	2.34		0.72		0.31		19.61		0,6	5,2
	CPT-2	2		0.52		0.26		41.78		0,5	2,6
	CPT-1	2.14		0.66		0.31		56.3		1,3	5,1
	CPT-3	2.15		0.17		0.08		20.87		3,1	4,6
	CPT-6	2.55		0.8		0.31		66.63		1,5	6,2
	CPTU-1	2.26		0.74		0.33		56.9		0,9	5,9
	CPT-4	3.11		0.39		0.13		27.22		1,8	4,2
	CPT-5	3.64		1.41		0.39		35.36		1,5	5,8
	CPT-7	1.66		0.44		0.26		43.85		1,1	4,1
	CPT-8	2.5		0.46		0.18		24.78		0	4,6
CPT-9	2.43		0.39		0.16		23.85		0,8	5,1	
CPTU-2	1.65	2.37	0.24	0.58	0.15	0.24	27.04	37.02	1,7	4,8	
C1	CPT-10	3.15		0.36		0.11		15.7		5,2	7
	CPT-2	3.3		0.64		0.19		30.73		2,6	5,3
	CPT-1	2.85		0.54		0.19		11.06		5,1	6,8
	CPT-3	1.78		0.29		0.17		11.68		4,6	6,2
	CPT-4	3.67		1.78		0.48		35.7		4,2	7
	CPT-6	3.6		0.62		0.17		27.9		6,2	8
	CPT-7	2.8		0.27		0.1		27.07		4,1	7,6
	CPT-8	3.25		0.28		0.09		14.52		4,6	6,7
	CPT-9	2.92		0.44		0.15		40.24		5,1	8
	CPTU-2	2.84	3.02	1.34	0.66	0.47	0.21	14.5	22.91	4,8	6
C2	CPT-10	1.99		0.36		0.18		86		7	16,8
	CPT-1	1.81		0.23		0.13		55.62		6,8	14,9
	CPT-3	2.03		1.01		0.5		18.67		6,2	15,8
	CPTU-1	1.96		0.24		0.12		46.95		5,9	13,4
	CPT-4	2.03		0.27		0.13		47.15		7	15
	CPT-5	2.08		0.34		0.16		47.38		5,8	15,52
	CPT-6	2.12		0.37		0.17		51.7		8	16,8
	CPT-7	1.93		0.19		0.1		14.4		7,6	13,9
	CPT-8	1.97		0.28		0.14		33.25		6,7	14,7
	CPT-9	1.91		0.36		0.19		170		8	18,1
CPTU-2	1.83	1.97	0.23	0.35	0.13	0.18	36.39	55.23	6	18,4	
C3	CPT-10	1.79		0.22		0.12		20.03		16,8	20,2
	CPT-1	1.67		0.14		0.09		6.9		14,9	16,7
	CPT-3	6.78		4.39		0.65		47.22		15,8	18
	CPTU-1	2.39		0.58		0.24		92.49		13,4	19,5
	CPT-7	2.94		0.8		0.27		20.96		13,9	15,9
	CPT-8	1.72	2.88	0.25	1.06	0.14	0.25	11.03	33.11	14,7	19
D	CPT-10	2.97		0.48		0.16		12.92		20,2	22,8
	CPT-8	3.75		1.83		0.49		3.37		19	20,08
	CPT-9	1.7	2.81	0.61	0.97	0.36	0.34	14.84	10.38	18,1	20,92
D1	CPT-2	2.2		0.44		0.2		55.19		5,3	14,1
	CPT-1	2.76		0.47		0.17		34.04		16,7	18,6
	CPTU-1	5		7.49		0.52		19.47		19,5	20,5
	CPT-6	3.44		0.61		0.18		5.54		16,8	18,3
CPTU-2	3.67	3.41	1.75	2.15	0.48	0.31	10.97	25.04	18,4	18,95	
D2	CPT-2	1.5		0.08		0.05		9.97		14,1	15,02
	CPT-1	1.82		0.2		0.11		9.33		18,6	19,2
	CPT-6	3.06		0.35		0.12		11.56		18,3	19,1
	CPTU-1	3.57	2.13	1.18	0.21	0.33	0.09	10.22	10.29	20,5	23,7
D3	CPT-1	2.94		1.79		0.61		18.08		19,2	20
	CPT-3									19,9	21,13
	CPT-6	6.93		5.25		0.76		31.3		19,1	20,425
CPTU-1	3.29	4.39	0.22	2.42	0.07	0.48	9.46	19.61	23,7	24,1	
D4	CPT-1	5.1		4.73		0.93		4.04		20	20,2
	CPTU-1	3.78	4.44	0.52	2.63	0.14	0.54	14.5	9.27	24,1	27,2

Os níveis mais superficiais apresentam grandes variações consideráveis nos valores médios de  $q_c$ , porém os desvios padrões são menores. Estas variações podem estar ligadas às variações nos teores de umidade e conseqüentemente nos valores de sucção, ou devido ao próprio processo pedogenético tropical, que não ocorre de forma homogênea em todas as partes do maciço de solo.

#### 5.4.3.5 – Ensaio com piezocone sísmico

Durante o desenvolvimento desta pesquisa foram realizados dois ensaios de piezocone sísmico seguindo os procedimentos descritos no Capítulo 4 (Materiais e Métodos). Ambos ensaios foram executados na mesma região do sítio onde foram realizados ensaios sísmicos de cross-hole, com localização indicada na Figura 5.63. Os resultados dos ensaios, com os registros de  $q_c$ ,  $R_f$  e *velocidade da onda S*, são apresentados na Figura 5.70 e mostram que, apesar da distância de apenas 3 m entre os ensaios, existem diferenças consideráveis entre os resultados.

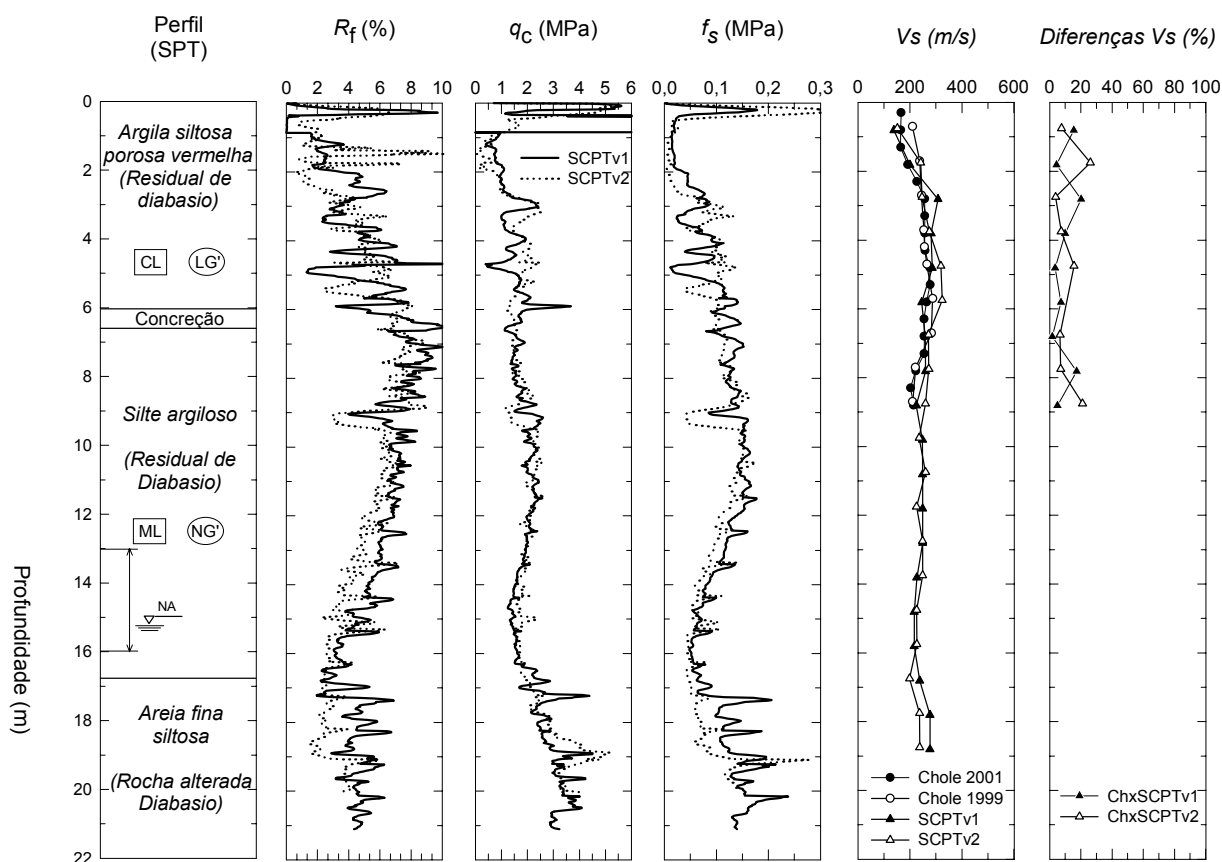


Figura 5.70 – Resultados de ensaios de piezocone sísmico (SCPTV5 e SCPTV6), com destaque para a velocidade da onda S no Sítio Campinas (SP).

A tendência geral encontrada no perfil é semelhante, porém ocorrem alguns picos e reduções nos valores dos registros de  $q_c$  e de  $R_f$ , que são interpretadas como resultantes de diferentes graus de alteração, característicos deste tipo de perfil (Foto 5.3). A presença de núcleos menos alterados em meio ao solo residual pode interferir tanto nos valores de  $q_c$ , como na velocidade das ondas S.

A determinação das velocidades das ondas S, a partir dos resultados dos ensaios de piezocone sísmico, calculadas pelo método da velocidade intervalar, são comparadas com os resultados de dois ensaios de “cross-hole”, realizados nos mesmos furos, porém em intervalos de leitura e épocas distintas (Figura 5.71).

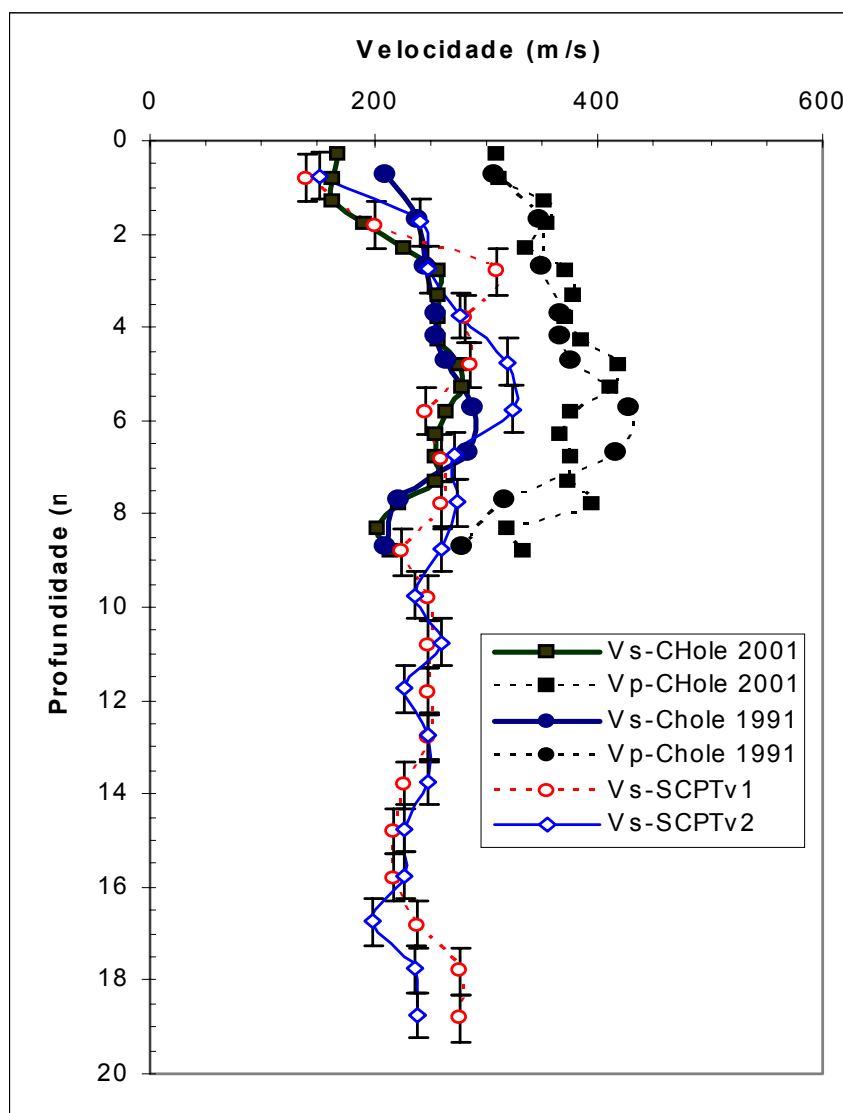


Figura 5.71 - Comparação entre resultados de medidas da velocidade das ondas S em ensaios sísmicos de “cross-hole” e de piezocone sísmico no Sítio Campinas (SP).

Os resultados dos ensaios com piezocone sísmico mostram tendência similar, com diferenças localizadas atribuíveis a variabilidade do próprio perfil de solo, refletida por diferentes graus de alteração. Os resultados dos ensaios sísmicos de “cross-hole” mostram tendência semelhante, sendo que próximo a 8 m de profundidade as velocidades das ondas medidas no ensaio de “cross-hole” são menores que as obtidas a partir dos piezocones sísmicos.

#### 5.4.3.6 – Ensaio de piezocone com filtro de cavidade preenchido com graxa

Neste sítio, três ensaios de piezocone foram executados utilizando o filtro de cavidade preenchido com graxa, devido a presença de nível de água profundo. Na Figura 5.72 tem-se os resultados de um ensaio de piezocone, que é o mais profundo e representativo entre os ensaios realizados, destacando-se os registros de poro-pressão, que se iniciam alguns metros acima da posição do nível de água (cerca de 12 a 15 m), talvez por influência do aumento da umidade do solo pela ascensão capilar. O registro de poro-pressão indica também porções diferentes, onde ocorrem reduções marcantes dos valores de poro-pressão, especialmente no trecho entre 20 e 24 m de profundidade. Estas porções não podem ser consideradas camadas, e talvez correspondam a núcleos menos alterados em meio ao solo residual, com comportamento areno-siltoso, que pode ter implicações importantes em projetos de fundações.

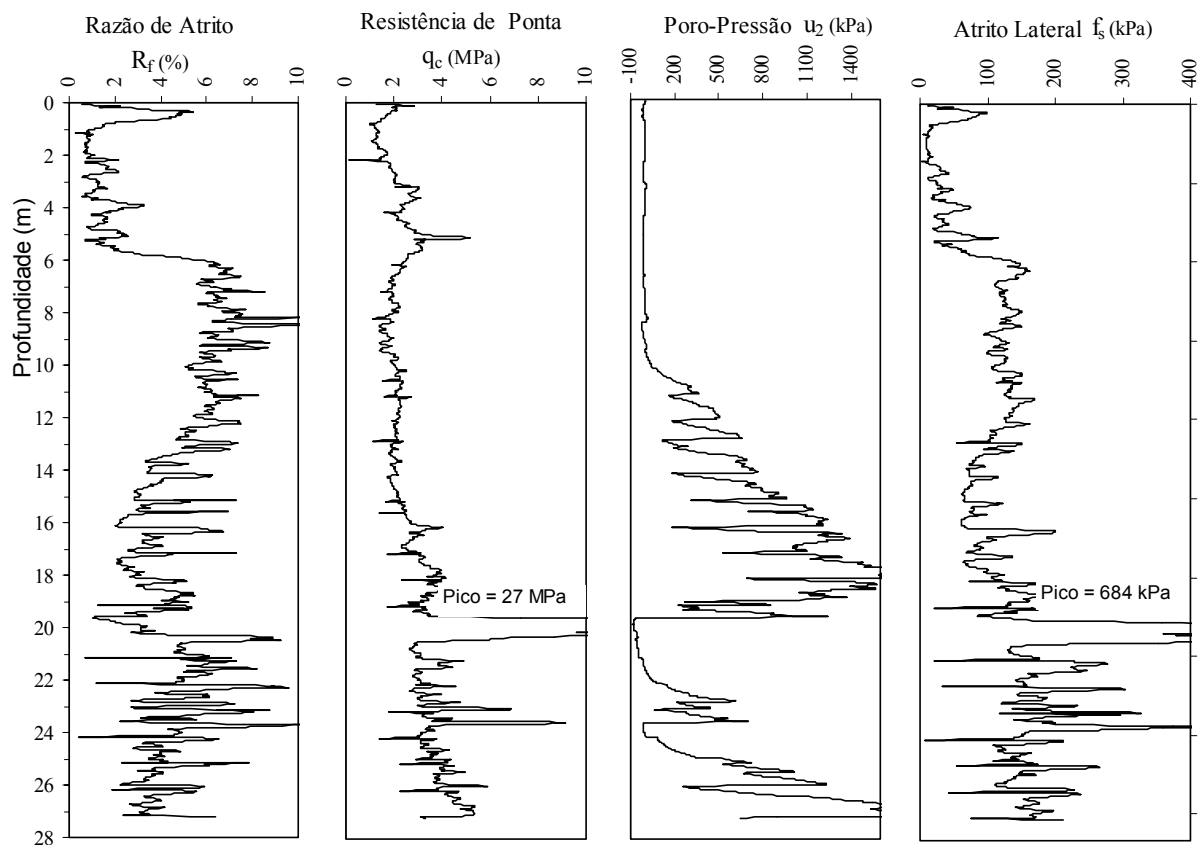


Figura 5.72 Resultado de ensaio de piezocone (CPTU-1) característico do Sítio Campinas (SP)

### 5.4.3.7 Correlações entre parâmetros

#### 5.4.3.7.1 – Relação $q_c/N_{SPT}$

Na análise da relação  $q_c/N_{SPT}$  foram utilizados os três critérios definidos no capítulo 4 (Materiais e Métodos). Além disso, esses valores foram comparados com as propostas de Robertson et al. (1983) e Jefferies & Davies (1993) para estimativa de  $N_{SPT}$  a partir de  $q_c$ . A Figura 5.73 mostra os resultados da aplicação dos critérios de correlação para resultados de ensaios contíguos de SPT e de CPTU.

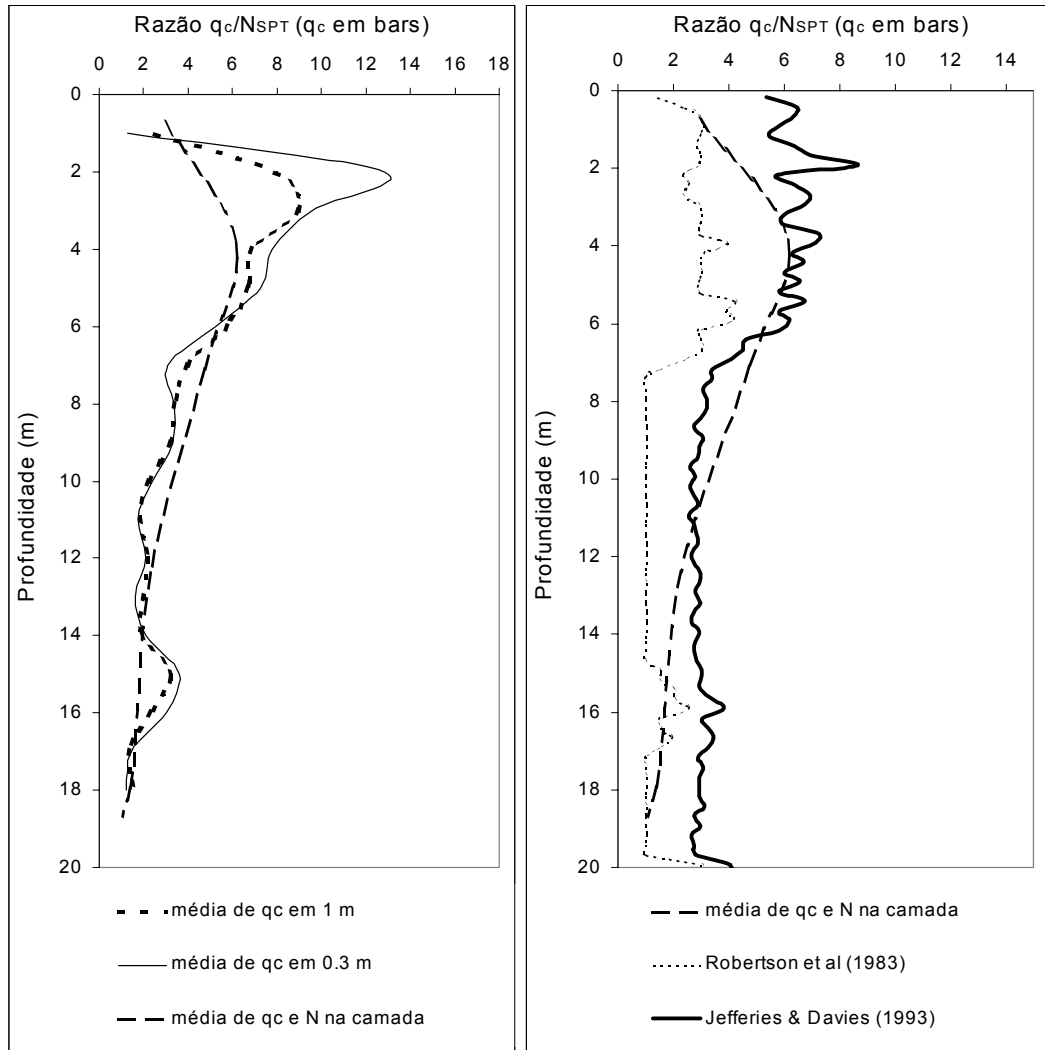


Figura 5.73 - Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  de medições em campo (CPT-6 e SP-1) e previsões com base em correlações no Sítio Campinas (SP).

Observa-se, na Figura 5.73.a, que existe razoável correspondência entre os critérios utilizados, porém com algumas diferenças significativas atribuídas a posição das transições entre camadas e a diferença de resolução de cada ensaio. Quando se utiliza a média dos parâmetros, dentro de “camadas” previamente definidas, a curva tende a suavizar-se, porém com a mesma tendência. Na comparação com o resultado da previsão utilizando a proposta de Robertson et al. (1983) observam-se diferenças sensíveis (Figura 5.73.b), porém a partir da profundidade de 14 m o critério da média de “camadas” leva a resultados próximos à previsão com base na proposta de Robertson et al. (1983), mesmo sem as correções de energia do ensaio SPT. Este fato pode estar relacionado às variações de energia do ensaio SPT, pois apesar de diversos autores (Belincanta, 1985; Peixoto, 2001) afirmarem que a eficiência média dos ensaios no Brasil é de 72%, podem ocorrer variações sensíveis, por variações no procedimento, equipamentos ou mesmo por influência do comprimento das hastes no ensaio



SPT. A previsão da relação  $q_c/N_{SPT}$  a partir de valores de  $q_c$ , com base na proposta de Jefferies & Davies (1993) (Figura 5.73.b) mostra valores superiores aos da previsão de Robertson et al. (1983) estando muito próximas das relações medidas a partir dos ensaios em campo, principalmente nas porções mais superiores do maciço.

#### 5.4.3.7.2 – Relação $G_0/q_c$

Os valores de  $G_0$  foram calculados a partir de resultados de ensaios sísmicos de “cross-hole” e de ensaios de piezocone sísmico, seguindo procedimento descrito no Capítulo 4 (Materiais e Métodos). Todos estes ensaios foram realizados na mesma parte do terreno, conforme indicado na Figura 5.63 e, desta forma, a relação  $G_0/q_c$  é aplicada a estes ensaios de forma a verificar se existe diferenciação entre os solos lateríticos (mais superficiais) e os solos não-lateríticos. Na Figura 5.74 tem-se as relações  $G_0/q_c$  versus profundidade obtidas do ensaio sísmico de “cross-hole” (CHT-1) (Giacheti, 1991 e 2001) e dois ensaios de piezocone próximos.

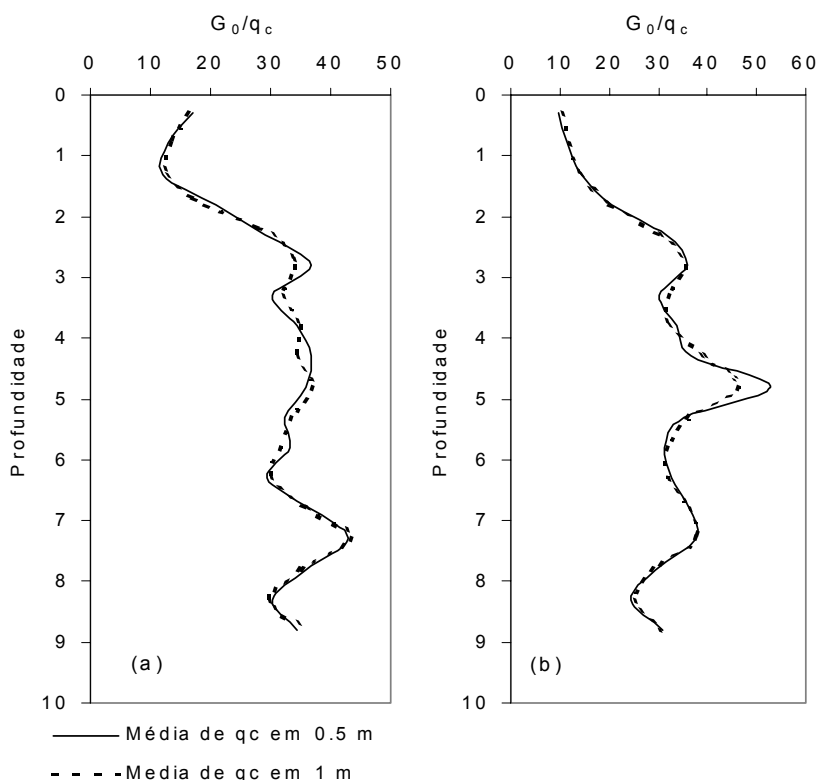


Figura 5.74 Relação  $G_0/q_c$ , comparando diferentes critérios na seleção do valor de  $q_c$ , com base em resultados de ensaios de piezocone e de “cross-hole” (a) CPT-8 – CHT-1 e (b) CPT-9 - CHT-1, executados no Sítio Campinas (SP).

Foram utilizados dois critérios distintos para seleção de  $q_c$ . O primeiro considera a média dos registros de  $q_c$  em intervalo de 0,5 m, com ponto central equivalente à profundidade de execução do ensaio de “cross-hole”, e o segundo utiliza o intervalo de 1 m. Os resultados mostraram que os valores da relação  $G_0/q_c$  variam muito pouco com a mudança destes critérios, indicando que existe baixa variabilidade no sentido vertical nos registros de  $q_c$ . Quando se comparou os valores da relação a partir  $q_c$  obtidos de diferentes ensaios de cone observam-se variações, porém a tendência é a mesma. Os valores da relação  $G_0/q_c$  são crescentes até a profundidade de 2,5 m, e a partir desta profundidade tendem a manter-se constantes, variando de 30 a 40, até o limite dos ensaios de “cross-hole”. Os valores mais baixos da relação, próximos a superfície, devem estar ligados à ressecção superficial do solo, ou a efeitos da sucção, que tendem a elevar os valores de  $q_c$ .

Na Figura 5.75 são mostrados os valores da relação  $G_0/q_c$  obtidos a partir de dois ensaios de piezocone sísmico, distantes entre si cerca de 3 m, próximos à posição do ensaio de “cross-hole” (Figura 5.63). Os resultados mostram relação  $G_0/q_c$  variável, sendo que até 8 m de profundidade os valores situam-se entre 50 e 110, com valores médios de 80 e a partir desta profundidade tendem a diminuir e manter maior regularidade, porém variando de 30 a 50, com valores médios de 40.

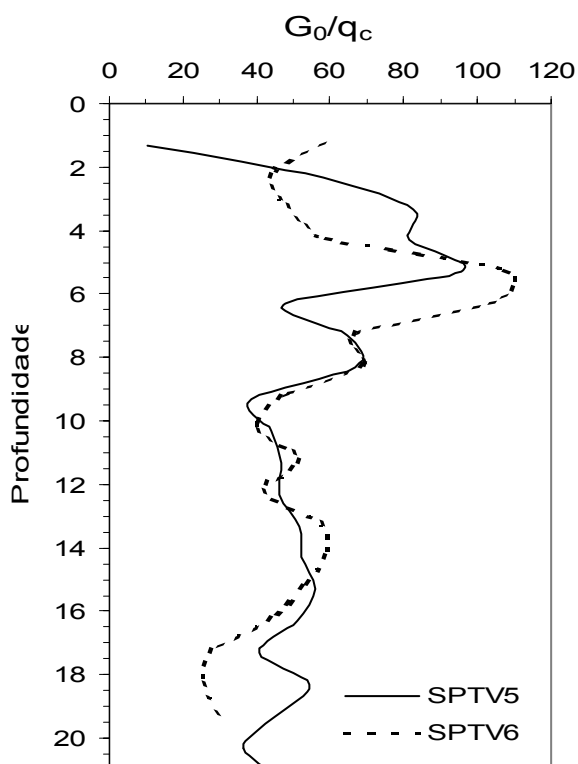


Figura 5.75 – Relação  $G_0/q_c$ , com base em ensaios de piezocone sísmico (SCPTV5 e SCPTV6) no Sítio Campinas (SP)

Os resultados dos vários procedimentos para obtenção da relação  $G_0/q_c$  mostram que existem discrepâncias entre os dados obtidos a partir dos ensaios de “cross-hole” e aqueles obtidos a partir dos ensaios de cone sísmico. Os valores da relação parecem ser um pouco superiores nas porções mais superficiais do maciço, sugerindo comportamento distinto na interface de 8 m de profundidade. No entanto, apesar destas diferenças os dados indicam que a relação  $G_0/q_c$  é diferente nos horizontes lateríticos e não-lateríticos.

#### **5.4.4 Sítio Londrina**

##### **5.4.4.1 Considerações gerais**

No Sítio Londrina os ensaios foram realizados junto ao Campo Experimental de Fundações, situado no Câmpus da Universidade Estadual de Londrina, na cidade homônima (PR). Neste local foram realizados diversos ensaios, sondagens de simples reconhecimento e provas de carga em diferentes tipos de fundações, apresentados por Branco et al. (1998) e Miguel et al. (2002). De todos os ensaios foram selecionadas duas sondagens de simples reconhecimento e dois ensaios de cone elétrico contíguos, com objetivo de apresentar um exemplo típico de solo residual formado a partir da alteração intempérica de basaltos, para fornecer subsídios a algumas das discussões que serão apresentadas a seguir neste trabalho. A Figura 5.76 mostra a localização da cidade de Londrina e a posição dos ensaios, cujos resultados foram utilizados neste trabalho.

##### **5.4.4.2 Caracterização Geológica**

A região de Londrina está inserida no Terceiro Planalto Paranaense, situando-se sobre as rochas vulcânicas relacionadas aos extensos derrames basálticos ocorridos no Mesozóico (Petri & Fulfaro, 1983), que fazem parte do denominado Grupo São Bento. A espessura total destes derrames pode atingir até 1.500 m e recobrem diretamente os sedimentos arenosos predominantemente eólicos da Formação Botucatu. Estes derrames ocorreram em diversas fases ou pulsos, sendo freqüente a ocorrência de camadas de arenito intercalados. Inspeções na região, realizadas para desenvolvimento deste trabalho, indicaram que a estratigrafia destes derrames pode ser complexa, com intercalações de tufos e cinzas vulcânicas, níveis com diferentes graus de alteração em função dos intervalos de tempo entre derrames, entre outros que, posteriormente foram submetidos a intensa alteração intempérica e pedogênese, podendo resultar em perfis estratigráficos complexos.

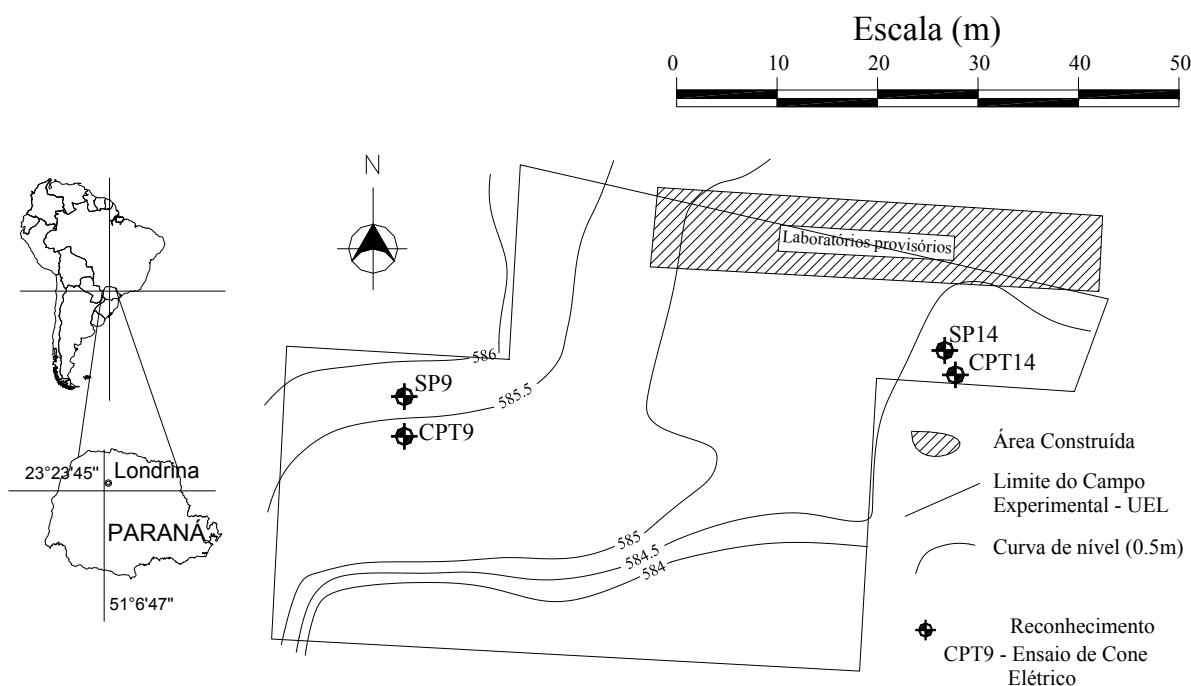


Figura 5.76 – Localização dos ensaios de cone elétrico e sondagens de simples reconhecimento no Sítio Londrina

É importante observar que a constituição basáltica (extrusiva) destas rochas é semelhante a do diabásio (intrusivo) identificado no Sítio Campinas, porém exibem diferenças de textura e gênese e podem produzir perfis geotécnicos distintos.

As principais características dos solos são mostradas na Tabela 5.10, apresentadas por Miguel et al. (2002). Nessa tabela tem-se as médias dos resultados de cada ensaio realizados em amostras provenientes de 14 sondagens de simples reconhecimento.

Tabela 5.10 – Ensaio de caracterização e classificação dos solos no Sítio Londrina, PR (Miguel et al., 2002)

Valores médios	Prof. média (m)	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4
		0 a 12	12 a 16	16 a 21	21 a 23
Umidade (%)		33	39	48	45
Limite de liquidez (%)		61	67	74	72
Limite de plasticidade (%)		45	50	53	52
Índice de plasticidade (%)		16	17	21	20
Argila (%)		81	75	69	62
Silte (%)		12	14	17	18
Areia fina (%)		7	11	15	20
Densidade dos sólidos (g/cm <sup>3</sup> )		3,058	3,066	3,101	3,007

#### 5.4.4.3 Identificação do perfil estratigráfico

A Figura 5.77 mostra os resultados dos ensaios de cone elétrico executados neste sítio. Os dois ensaios de cone elétrico analisados neste trabalho, distantes cerca de 50 m um do outro. Apesar de ser considerado um terreno homogêneo (Miguel et al., 2002) as diferenças são sensíveis, podendo ser atribuídas às diferenças na própria estrutura da rocha basáltica, e nas intensidades dos processos de intemperismo tropical.

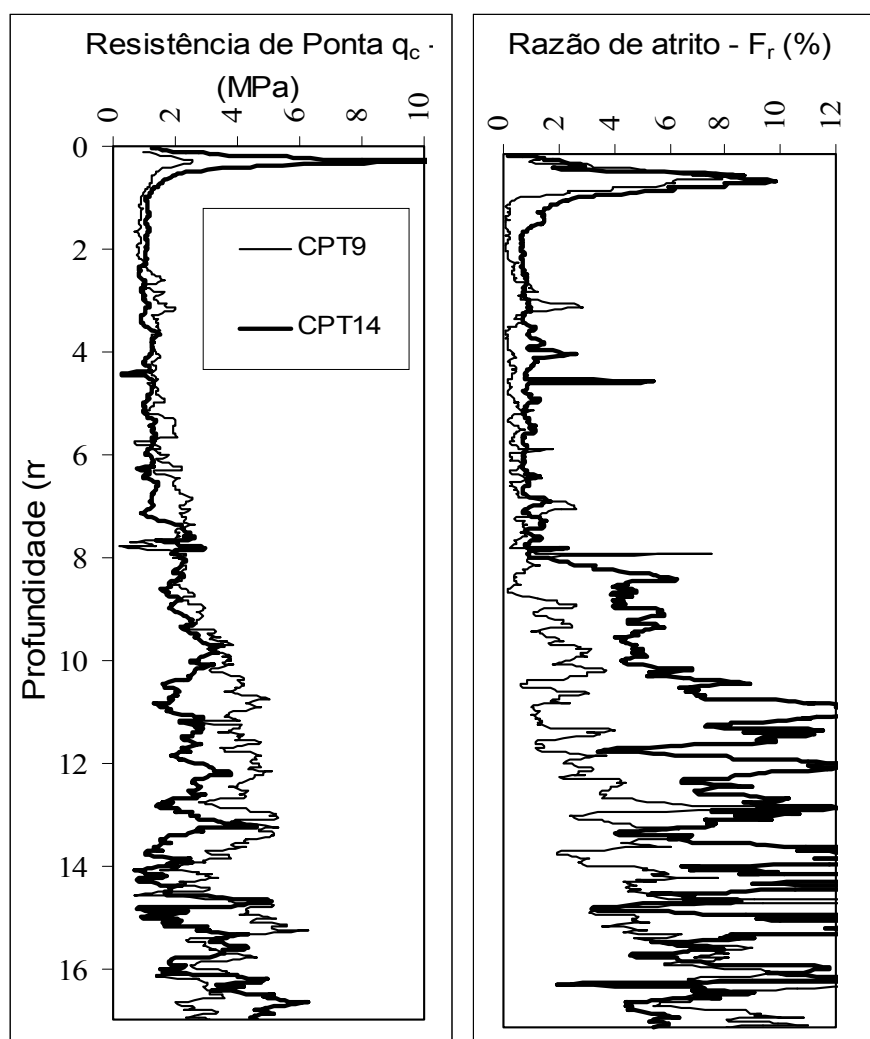


Figura 5.77 – Resultado dos ensaios de cone elétrico, CPT-9 e CPT-14 no Sítio Londrina.

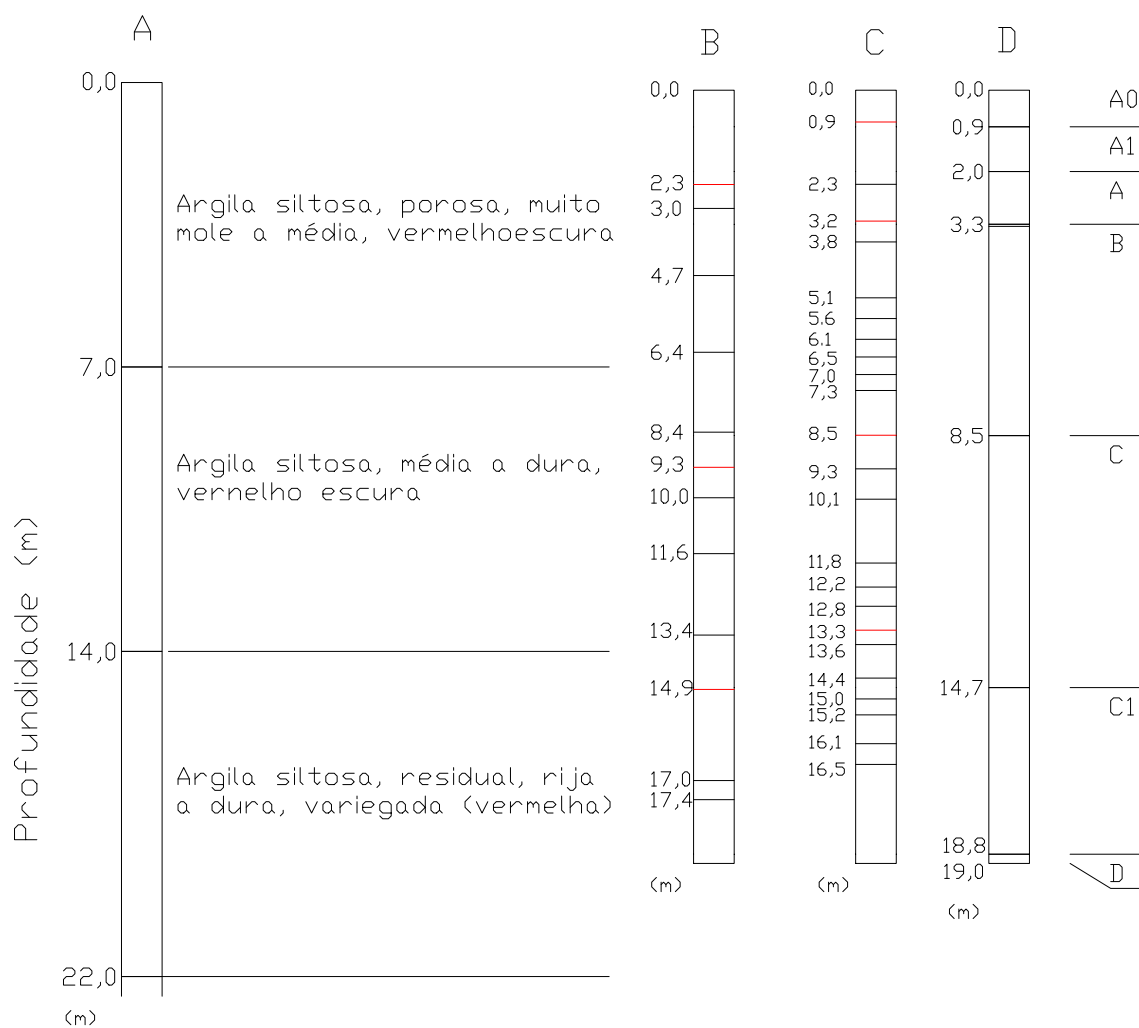


Figura 5.78 - Comparação entre as posições de transição das camadas em perfis de solo, utilizando métodos distintos. **A** - Descrição de sondagem de simples reconhecimento, **B** - teste estatístico  $D^2$  com janela de 2 m aplicado aos registros de  $q_c$ , **C** - teste estatístico  $D^2$  com janela de 1 m aplicado aos registros de  $q_c$ , **D** - Inspeção visual dos resultados do piezocone. (SP9 e CPT9) no Sítio Londrina.

Nas Figuras 5.78 e 5.79 são apresentadas comparações entre os diferentes métodos para identificação das transições entre camadas. São comparadas as descrições e transições obtidas a partir das sondagens de simples reconhecimento, os resultados do teste estatístico  $D^2$ , com janela móvel de 1 e 2 m, e a inspeção visual dos resultados dos ensaios de cone elétrico. As transições indicadas pelos resultados dos ensaios CPT mostram um maior detalhamento, indicando que algumas diferenças de comportamento do solo podem não ser identificadas tátil-visualmente. Por outro lado, processo de amostragem descontínua das sondagens de simples reconhecimento pode dificultar ou tornar imprecisa a identificação da posição das transições entre diferentes pacotes de solo. O resultado do teste estatístico  $D^2$ ,

mostra que a variação do tamanho da janela permite identificar as transições em diferentes escalas de detalhamento.

A variação do tamanho da janela pode funcionar como evidência das variabilidades a partir de  $q_c$ , pois quanto maior for o número de transições maior será a variabilidade. Em pacotes de solo homogêneos as diferenças nos resultados dos testes estatísticos com janelas de 1 e 2 m tendem a ser pequenas, enquanto que em solos com grande heterogeneidade as diferenças no resultado do teste  $D^2$  com a variação do tamanho da janela são mais sensíveis.

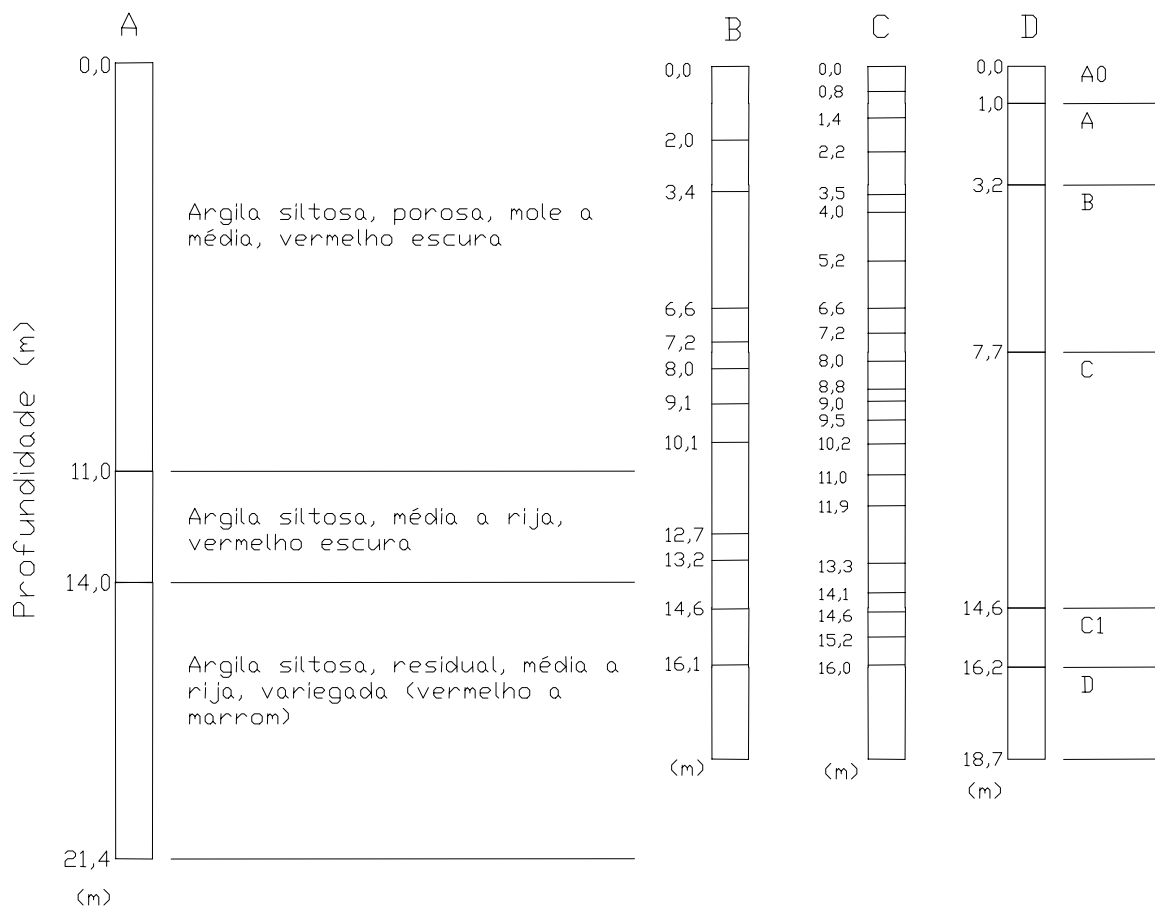


Figura 5.79 – Comparação entre as posições de transição das camadas em perfis de solo, utilizando métodos distintos. **A** - Descrição de sondagem de simples reconhecimento, **B** - teste estatístico  $D^2$  com janela de 2 m aplicado aos registros de  $q_c$ , **C** - teste estatístico  $D^2$  com janela de 1 m aplicado aos registros de  $q_c$ , **D** - Inspeção visual dos resultados do piezocone. (SP14 e CPT14).

Nas Figuras 5.80 e 5.81 são comparadas diferentes interpretações dos solos obtidas dos resultados das sondagens de simples reconhecimento e da aplicação dos critérios de classificação propostos por Robertson et al. (1986) e por Zhang & Tumay (1999), ambos aplicados aos ensaios de cone elétrico realizados na área.

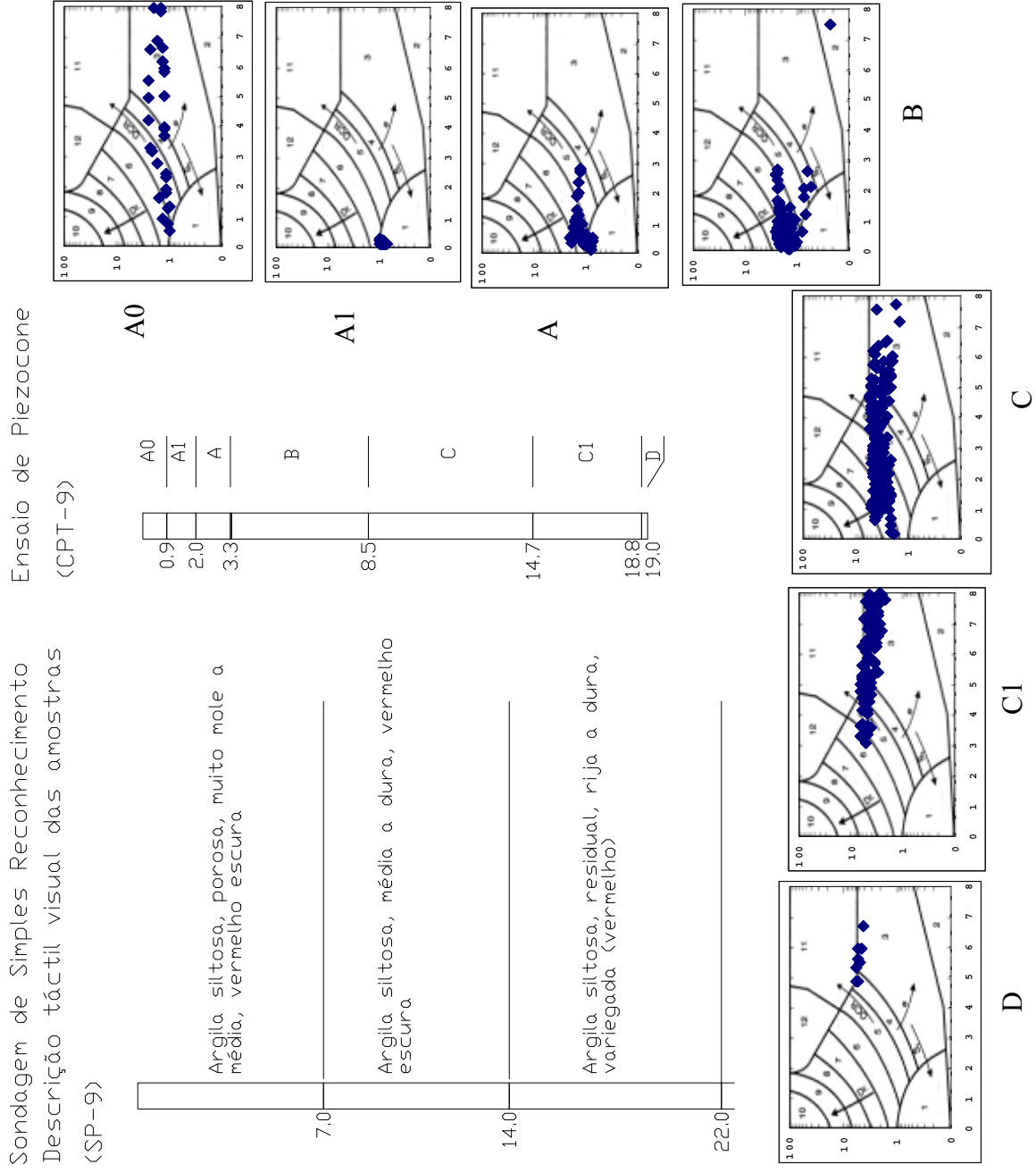
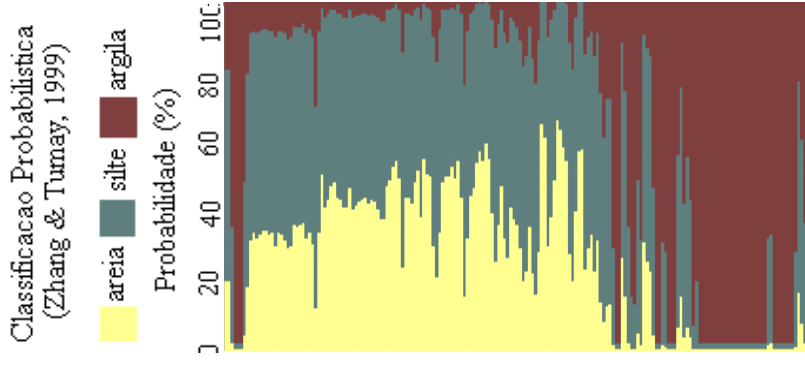
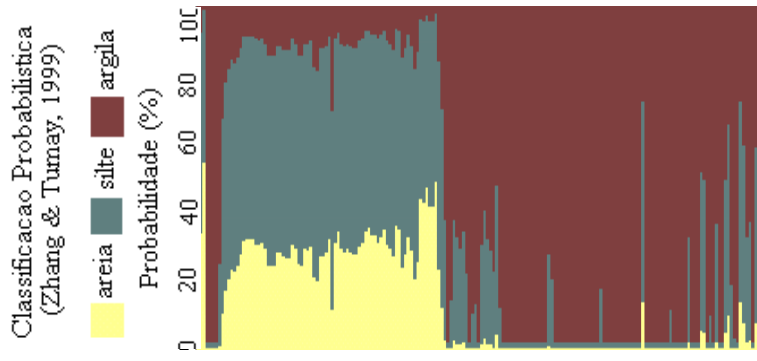
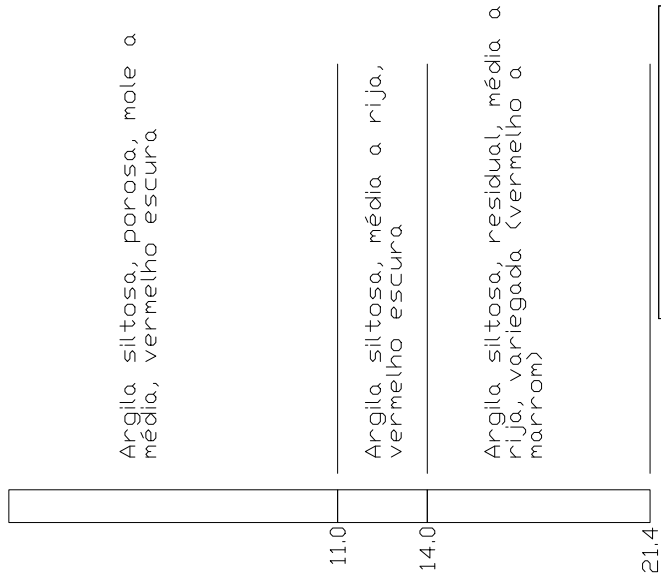


Figura 5.80 - Comparação de métodos de classificação do solo: Sondagens de simples reconhecimento (SP-9) e ensaio de piezocone (CPT-9). Sítio Londrina.





Sondagem de Simples Reconhecimento  
Descrição táctil visual das amostras  
(SP-14)



Ensaio de Piezocone  
(CPT-14)

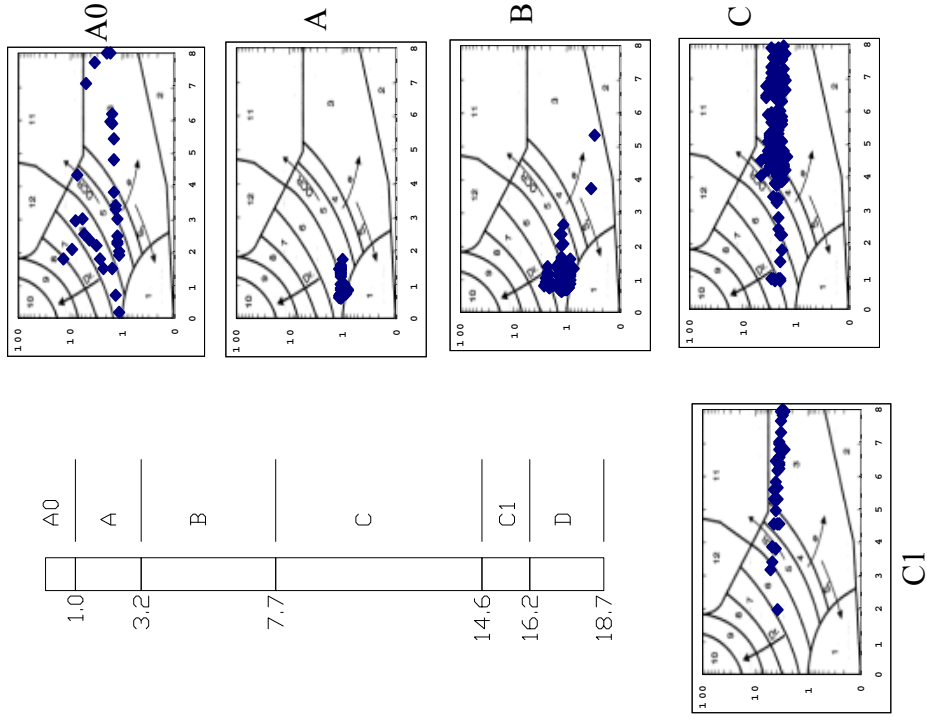


Figura 5.81 - Comparação de métodos de classificação do solo: Sondagens de simples reconhecimento (SP-14) e ensaio de piezocone (CPT-14). Sítio Londrina

A análise dos resultados dos ensaios no ábaco de Robertson et al. (1986) mostra que a camada mais superficial denominada A0 apresenta grande dispersão, podendo ser evidência de ressecção superficial. Já, as camadas denominadas de A, A1 e B mostram concentração marcante dos pontos que, pela classificação original do ábaco, indica presença de solos arenosos. No entanto, as análises granulométricas indicam que esses solos são francamente argilosos e as descrições táteis-visuais o identificam como solos porosos. Este fato deve-se ao intenso intemperismo tropical, indicando solos com lixiviação da fração argila, cimentação por óxidos de ferro e alumínio, conforme já ressaltado por diversos autores (Prado, 1991; Gidigas, 1990).

Desta forma, o ábaco mostrado delimita claramente a posição destes solos porosos e colapsíveis, apesar de não os classificarem texturalmente de forma adequada, o que indica que é possível adequá-lo para este tipo de perfil. A classificação probabilística marca estas transições, apesar de indicar estes solos com maior probabilidade de serem areias ou siltes. Nas camadas mais inferiores, denominadas C, C1 e D a proposta de Robertson et al. (1986) indica presença de solos francamente argilosos e razoável correspondência com os resultados de ensaios de laboratório e da classificação tátil-visual. Estes níveis mais inferiores devem representar solos residuais menos evoluídos, onde a estrutura da rocha original ainda é marcante, mostrando variações sensíveis na razão de atrito, apesar dos resultados da resistência de ponta manterem-se constantes dentro da camada. Este fato pode estar ligado a diferentes graus de alteração da rocha-mãe e pode interferir sensivelmente na delimitação de camadas e nas correlações de ensaios situados em diferentes porções do maciço, apesar de situarem-se em uma mesma profundidade. Mostra, desta forma, as dificuldades em se estabelecer os parâmetros geotécnicos dos solos tropicais, os quais favorecem o uso de ensaios combinados, como o SCPTU, RCPTU e PCPTU, onde diversos parâmetros podem ser obtidos em uma mesma posição de ensaio.

#### 5.4.4.4 – Correlações entre parâmetros

Ensaio de cone elétrico e sondagens de simples reconhecimento foram realizados próximos uns aos outros, e desta forma permitiram uma análise consistente da relação  $q_c/N_{SPT}$ . Na análise da relação  $q_c/N_{SPT}$  foram utilizados os três critérios definidos no capítulo 4 (Materiais e Métodos). Além disso, esses valores foram comparados com as propostas de Robertson et al. (1983) e Jefferies & Davies (1993), para estimativa de  $N_{SPT}$  a partir de  $q_c$ .

Nas Figuras 5.82 e 5.83 são apresentados os resultados dos diferentes critérios na relação  $q_c/N_{SPT}$ .

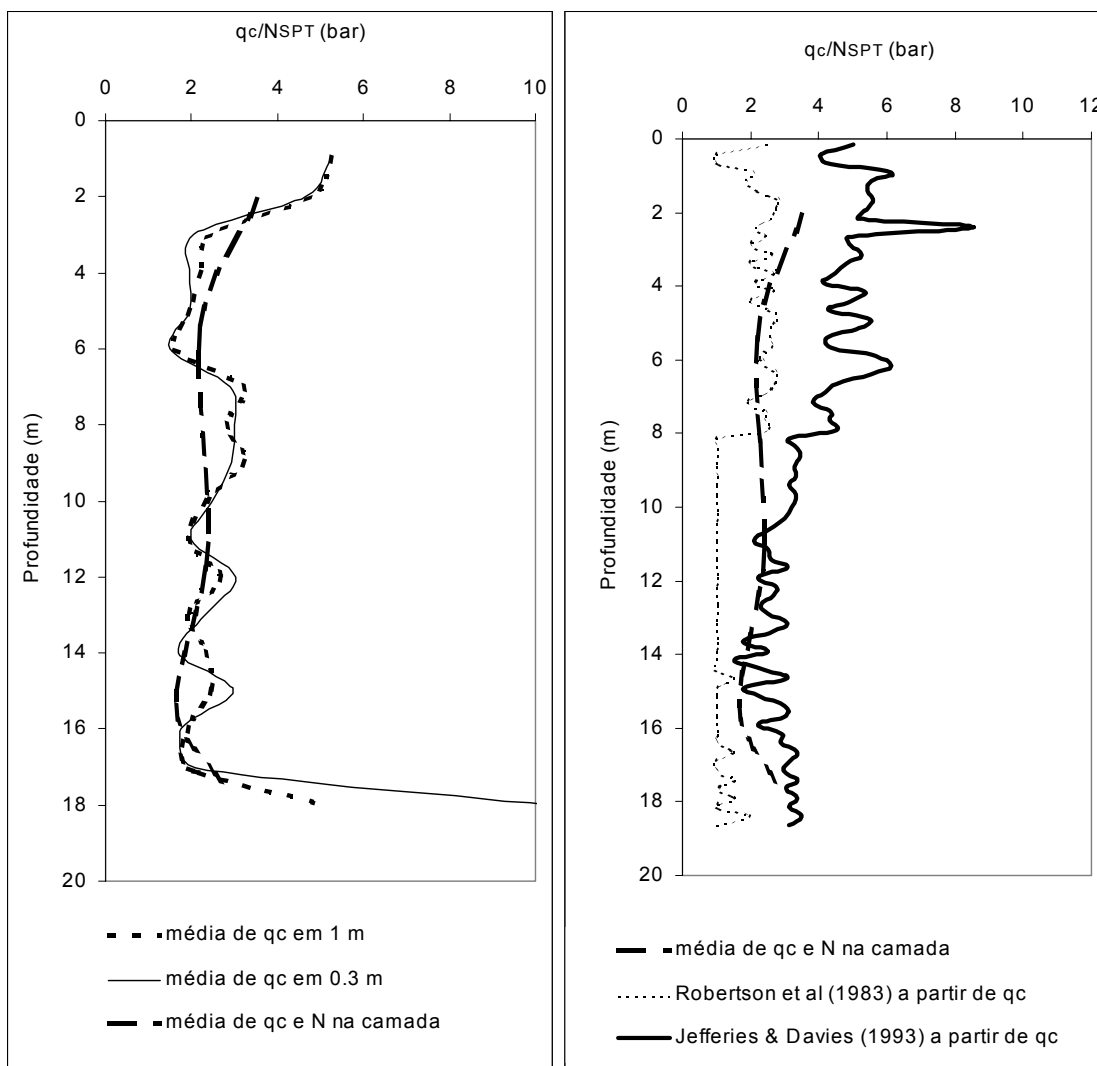


Figura 5.82 Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  comparando medições em campo e previsão com base em correlações. Sítio Londrina (CPT14 e SP14).

A análise dos resultados apresentados nas Figuras 5.82 e 5.83 mostra que a tendência de correlação é a mesma para os vários critérios, porém ocorrem diferenças sensíveis. Nas porções superficiais ocorrem as maiores diferenças, e quando é utilizado o critério das médias dos parâmetros no interior das camadas ocorre suavização da curva, minimizando as interferências das transições entre as camadas (Figuras 5.82.a e 5.83.a). Outro aspecto interessante é que existe variação sensível na correlação proposta por Robertson et al. (1983),

forneendo valores de previsão abaixo daqueles obtidos a partir dos valores de  $q_c$ , nas profundidades abaixo de 8 m (Figura 5.82.b e 5.83.b).

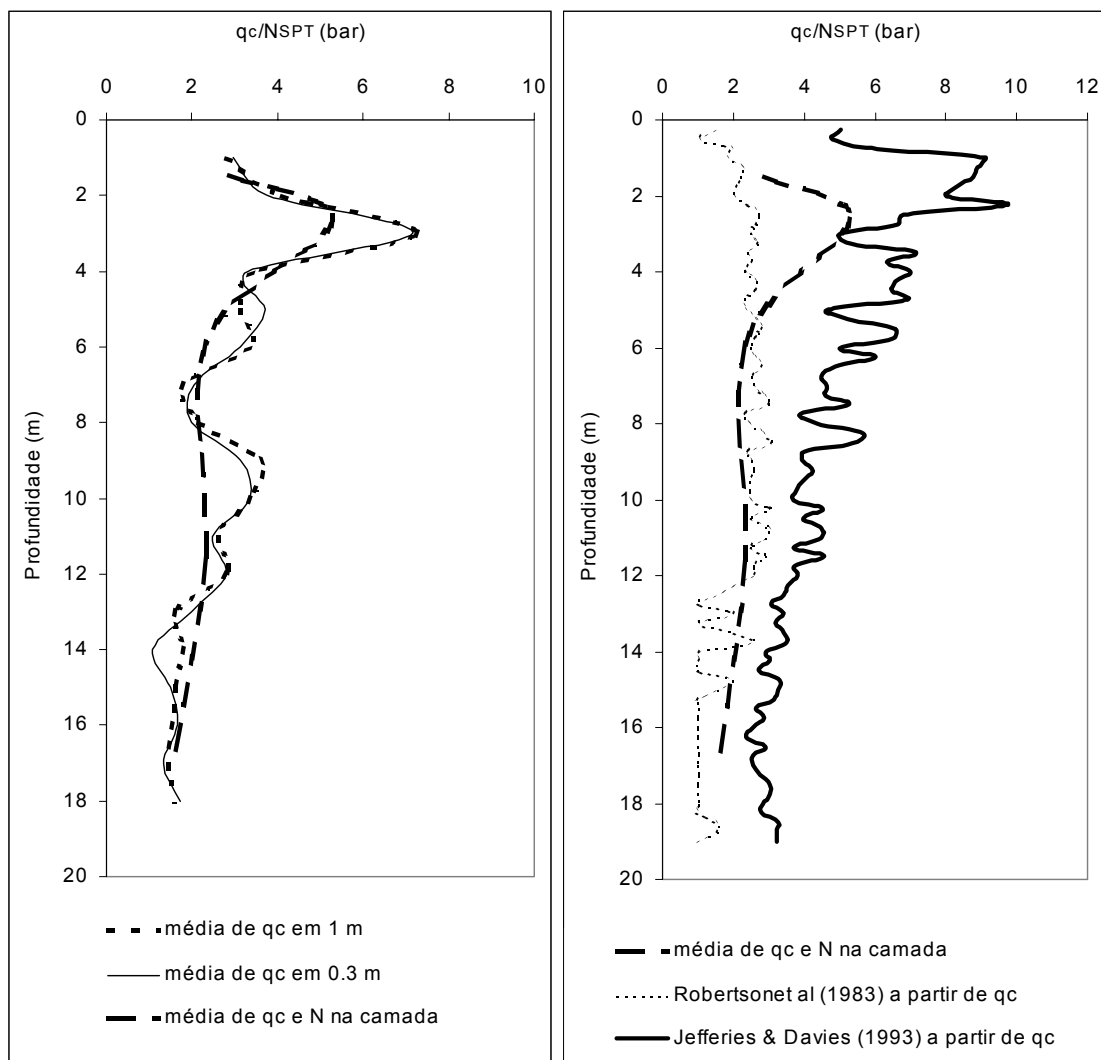


Figura 5.83 - Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  comparando medições em campo e previsão com base em correlações. Sítio Londrina (CPT9 e SP9).

As previsões obtidas a partir da proposta de Jefferies & Davies (1993) estão sistematicamente acima daquelas da proposta de Robertson et al. (1983) e também dos valores obtidos pelas medidas em campo, principalmente nas porções mais superficiais do terreno (Figuras 5.82.b e 5.83.b).

### 5.4.5 Sítio Bauru

#### 5.4.5.1 Considerações gerais

Os ensaios disponíveis no Campo Experimental da UNESP, em Bauru (SP), foram realizados para fins de pesquisa sobre comportamento de fundações e sobre investigações de campo. Dos ensaios disponíveis foram analisados resultados de seis ensaios de cone elétrico, dois ensaios de piezocone sísmico, seis sondagens de simples reconhecimento, ensaios laboratoriais executados a partir de amostras retiradas de um poço de inspeção de 20 m de profundidade e resultados de uma campanha de ensaios sísmicos “cross-hole”. Detalhes sobre os ensaios e resultados específicos podem ser encontrados em Ferreira et al. (1998) e Giacheti (2001). A Figura 5.84 mostra a localização da cidade de Bauru e a distribuição dos ensaios utilizados para realização deste trabalho.

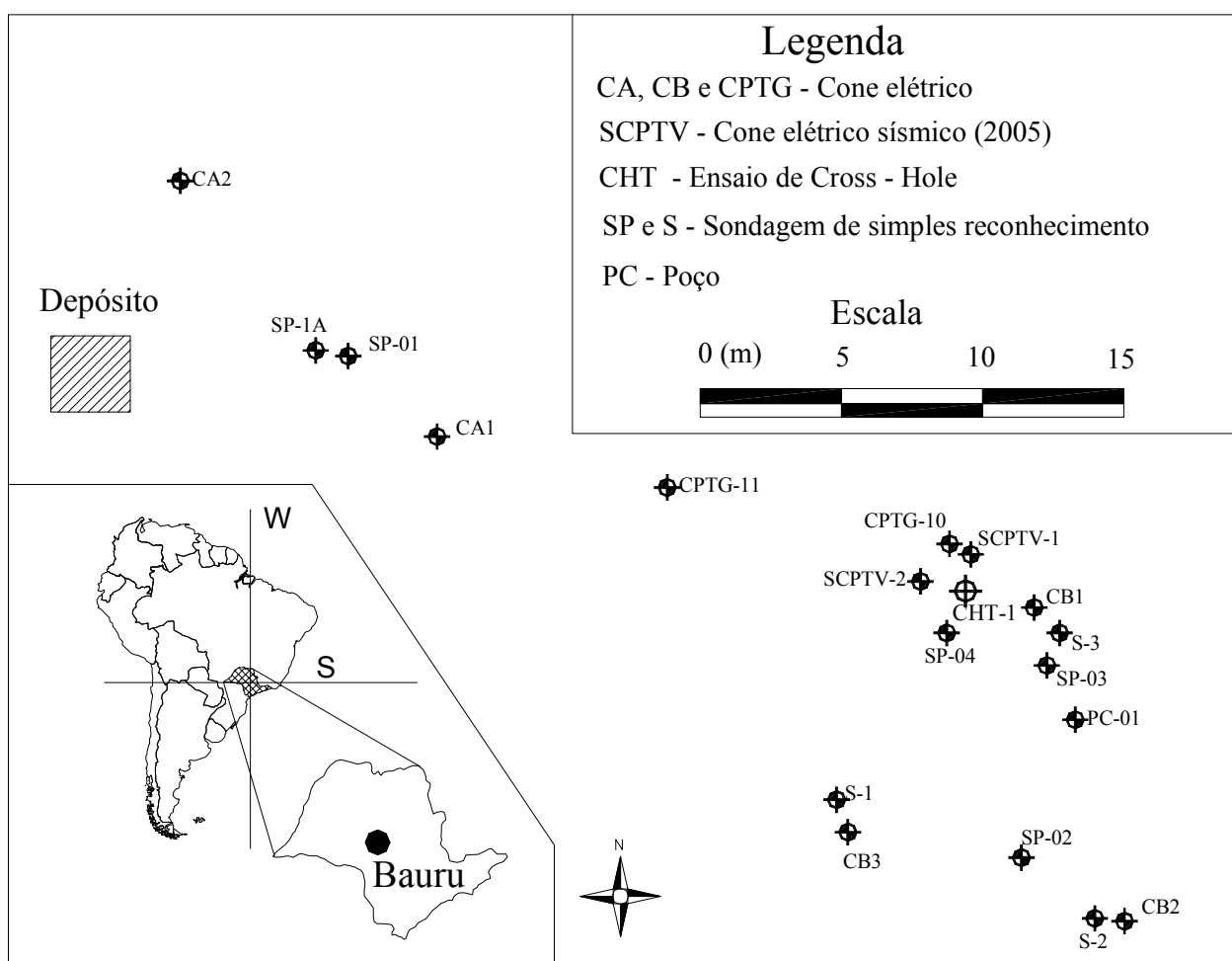


Figura 5.84 – Localização dos ensaios no Sítio Bauru.

#### 5.4.5.2. Caracterização geológica

O campo experimental situa-se no Câmpus da UNESP em Bauru, em frente ao Instituto de Pesquisas Meteorológicas, nas porções elevadas do terreno. Conforme IPT (1989) o local é constituído pelo Grupo Bauru, com predominância da Formação Marília nos interflúvios e da Formação Adamantina nos vales e porções mais baixas do terreno.

A Formação Marília, é representada pelo Membro Echaporã, que é constituído por arenitos de granulação fina a grossa, compreendendo bancos maciços com tênues estratificações cruzadas de médio porte, incluindo lentes e intercalações subordinadas de siltitos, argilitos e arenitos muito finos com estratificação plano-paralela e freqüentes níveis rudáceos, e cimentação carbonática disseminada e na forma de nódulos e concreções carbonáticas, que foram formadas em pelo menos três fases distintas, Conforme mostra Fernandes (1998) a primeira fase de formação dos carbonatos está relacionada à época de deposição dos sedimentos, a segunda está relacionada a precipitação por processos hidrogeológicos e a terceira está relacionada a remobilização durante a ação dos processos pedogenéticos, sob atuação das variações climáticas presumivelmente no Quaternário. Segundo Fernandes (1998) a Formação Marília desenvolveu-se em embaciamento restrito, em regimes torrenciais característicos de leques aluviais e com a deposição de pavimentos detríticos, durante a instalação progressiva de clima semi-arido. Esses autores também identificam que os elevados teores de carbonato de cálcio da Formação Marília produziram uma cimentação extensiva e irregular nos arenitos e os solos originários desta formação contribuíram para a ocupação agrícola da região. A distribuição aleatória dos teores de cimento carbonático tem implicações geotécnicas e geoambientais importantes, relacionadas às diferenças de resistência, permeabilidade e estabilidade química das cimentações.

A Formação Adamantina é constituída por depósitos fluviais com predominância de arenitos finos e muito finos podendo localmente apresentar cimentação e nódulos carbonáticos e lentes de siltitos arenosos e argilitos em bancos maciços com estratificação cruzada de pequeno e médio porte. As fácies de deposição sugerem extenso sistema fluvial meandrante, e na parte inferior da Formação Adamantina a drenagem era pouco organizada e o ambiente de deposição de menor energia, com predominância de lagos rasos. Nas porções mais superiores predominam sistemas fluviais com rios de maior porte e maior energia.

### 5.4.5.3 Identificação do perfil estratigráfico

A interpretação do perfil estratigráfico deve considerar o contexto geológico regional e outras informações disponíveis para compreensão da história e gênese do perfil. No Sítio Bauru predominam rochas sedimentares da Formação Marília, posteriormente submetidas a processos de morfogênese e pedogênese. Desta forma, o perfil deve refletir características de rochas sedimentares e as transformações destes materiais pelos processos de pedogênese e morfogênese e coberturas por solos coluviais polifásicos.

Na Figura 5.85 tem-se a comparação de três métodos distintos para identificação das transições entre camadas, a partir dos resultados de um ensaio de piezocone (CB1) e uma sondagem de simples reconhecimento (SP-3) distantes 2,5 m uma da outra.

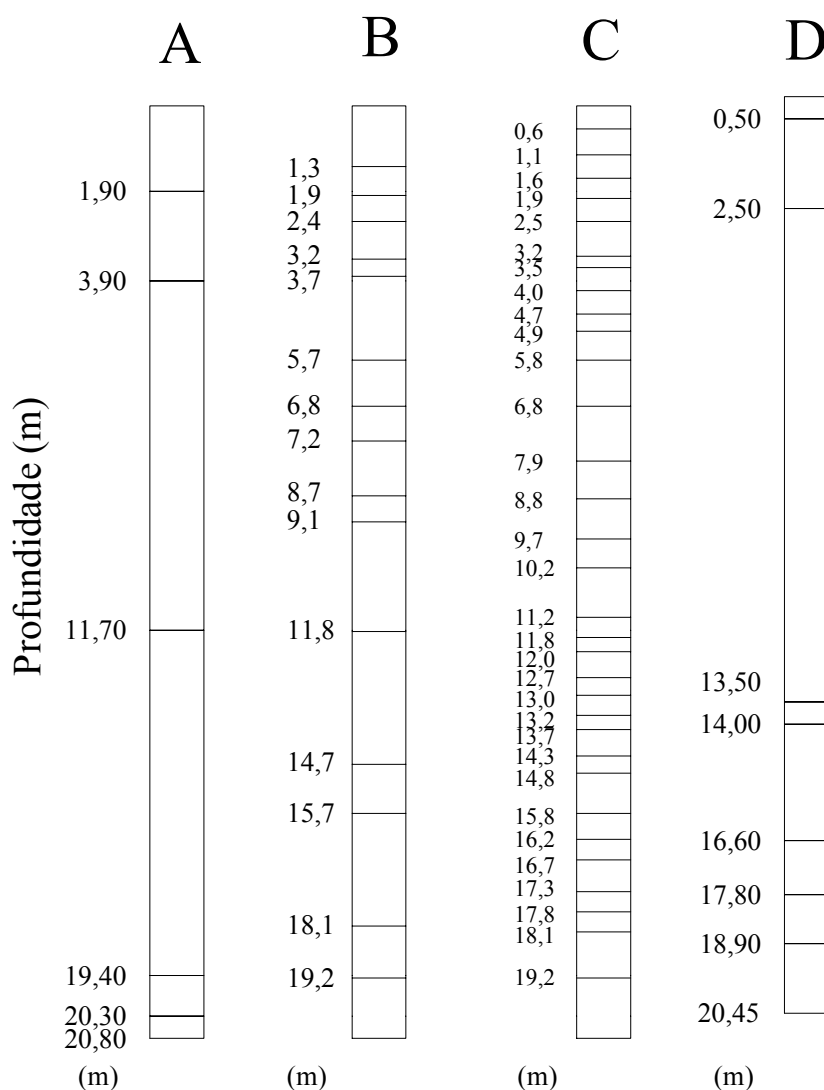


Figura 5.85 - Comparação entre as transições das “camadas” em perfis de solo, utilizando métodos distintos. A – Inspeção visual de resultados de piezocones (CB1), B - Teste estatístico  $D^2$  com janela de 2 m aplicado a  $q_c$  do ensaio de piezocone (CB1), C – Teste estatístico  $D^2$  com janela de 1 m aplicado a  $q_c$  do ensaio de piezocone (CB1), D - Resultado da sondagem de simples reconhecimento (SP-3).

Observa-se, nessa figura, sensível diferença no grau de detalhamento da subdivisão em função do método utilizado. Neste local as descrições obtidas a partir das sondagens de simples reconhecimento mostram poucos detalhes, provavelmente em função da constituição razoavelmente homogênea, arenosa e sem grandes contrastes de cores. Isto dificulta a identificação visual das transições que, quando executadas a partir do resultado do ensaio de piezocone, fornecem um maior detalhamento. Uma análise mais abrangente dos resultados dos diversos ensaios de piezocone e sondagens de simples reconhecimento mostra que existe uma grande variação vertical e horizontal nas características dos materiais identificados no sítio Bauru. Na Figura 5.86 tem-se a comparação entre resultados de dois ensaios de piezocone e uma sondagem de simples reconhecimento, onde é ressaltada a diferença entre os registros de  $q_c$  e a descrição das amostras e transições obtidas a partir das sondagens de simples reconhecimento.

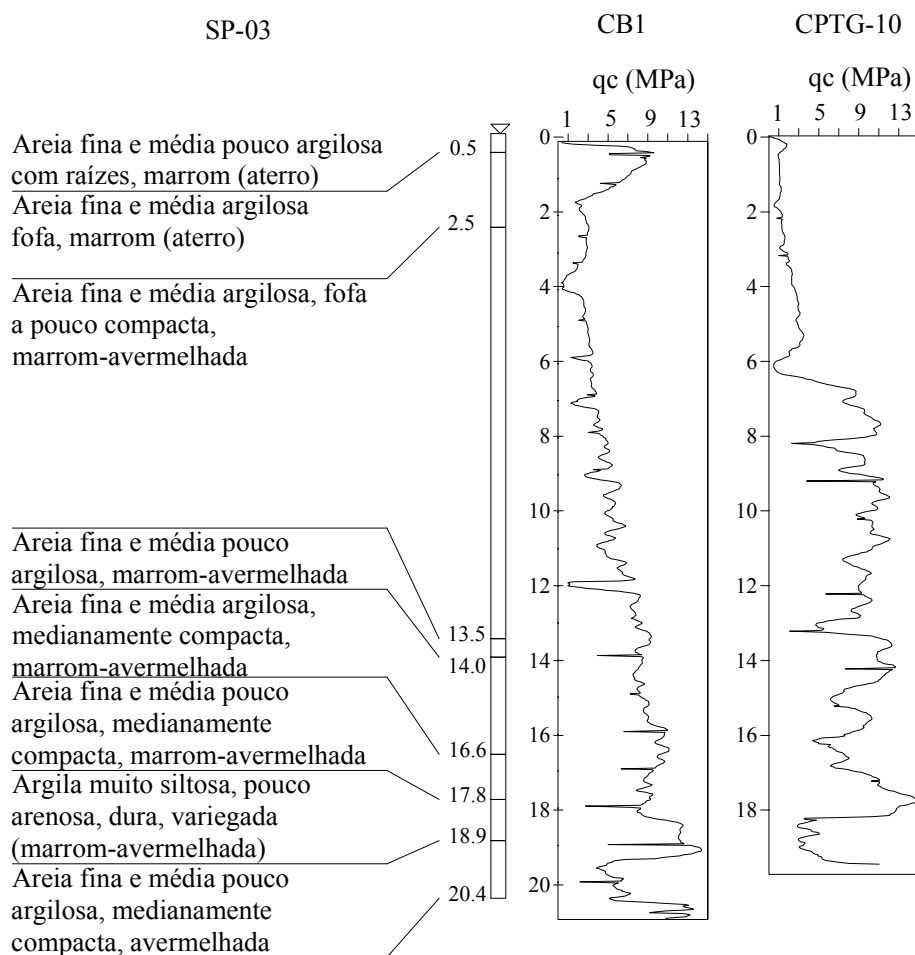


Figura 5.86 – Comparação entre as descrições e transições identificadas a partir de sondagens de simples reconhecimento (SP-3) e os registros de  $q_c$  em dois ensaios de piezocone contíguos (CBI e CPTG-10).



Nas porções abaixo de 13 m de profundidade sugere-se a presença de camadas provavelmente relacionadas à época de formação dos sedimentos. A porção superior do perfil não evidencia a presença destas “camadas”, que podem ter sido destruídas durante a pedogênese ou mesmo durante a colúviação. As heterogeneidades do solo, registrados nos ensaios de piezocone pelas variações nos valores de  $q_c$ , conforme mostrado na Figura 5.86, devem estar ligadas aos processos pedogenéticos e morfogenéticos, com diferentes graus de cimentação carbonática ou colúviação polifásica.. As diferenças identificadas no perfil são também registradas de forma clara nas sondagens de simples reconhecimento.

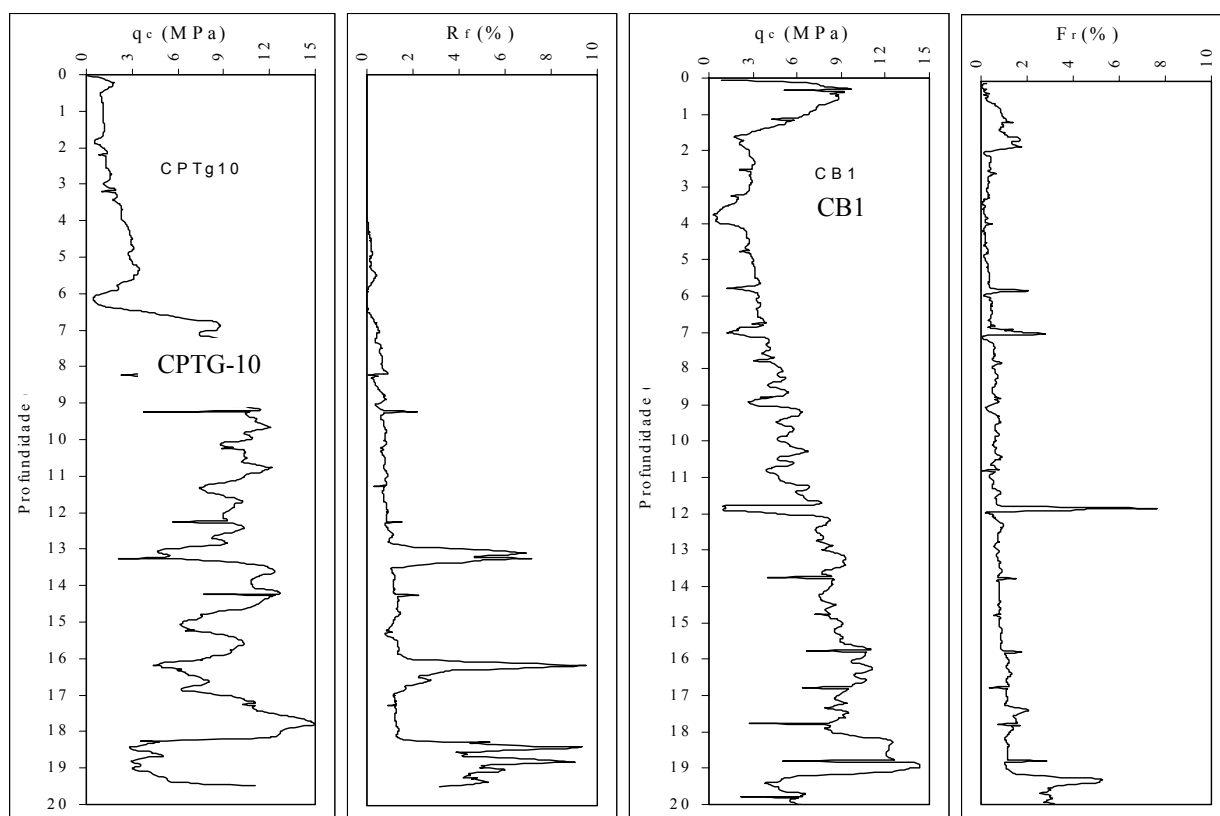


Figura 5.87 – Resultado de dois ensaios de piezocone mostrando diferenças sensíveis nos registros de  $q_c$  e picos de razão de atrito que indicam diferentes horizontes, principalmente abaixo de 13 m de profundidade.

Os solos aqui investigados foram submetidos a processos de intemperismo tropical e tendem a apresentar uma complexidade de geometria das diferentes zonas devido a somatória de processos relacionados à gênese dos sedimentos e às modificações devido à pedogênese tropical.

Na Figura 5.88 tem-se os resultados de duas sondagens de simples reconhecimento, distantes 7 m uma da outra, destacando os resultados do ensaio de penetração SPT. As sondagens foram executadas pela mesma equipe, na mesma época do ano, e mostram resultados muito distintos, principalmente nas porções mais superficiais do terreno, onde os

valores do  $N_{SPT}$  variam em mais de 100%. Isto evidencia diferenças de intensidade dos processos intempéricos, sugestivos de possibilidade de existência de deficições ou estruturas, que condicionam a intensidade da pedogênese.

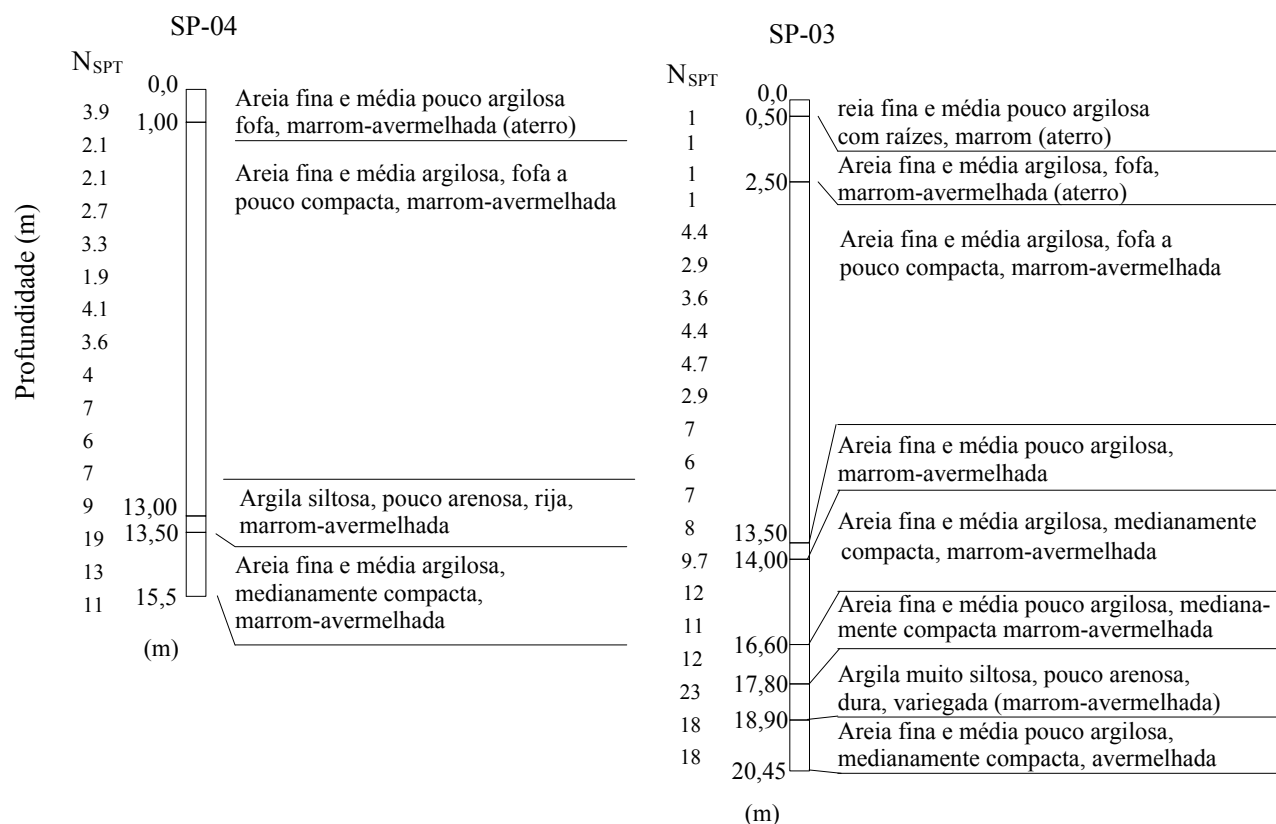


Figura 5.88 - Comparação entre resultados de duas sondagens de simples reconhecimento, distantes cerca de 7 m uma da outra, evidenciando resultados sensivelmente distintos.

Na Figura 5.89 tem-se a comparação entre diferentes métodos de interpretação com base nos resultados de ensaios de piezocone e de sondagens de simples reconhecimento. Os resultados mostram uma razoável correspondência entre as diversas classificações. A classificação de Robertson et al. (1986) com base em resultados de ensaios de piezocone, sugere a ocorrência de solos areno-siltosos, enquanto que a classificação de Zhang & Tumay (1999) indica uma predominância de solos arenosos, com probabilidades acima de 70 %. O caráter colapsível destes solos até 13 m de profundidade, corresponde ao limite dos solos identificados como de comportamento laterítico na classificação MCT, porém esta distinção não é reconhecível de forma clara a partir dos vários resultados dos ensaios de piezocone, provavelmente devido à superposição dos processos de cimentação por carbonatos.

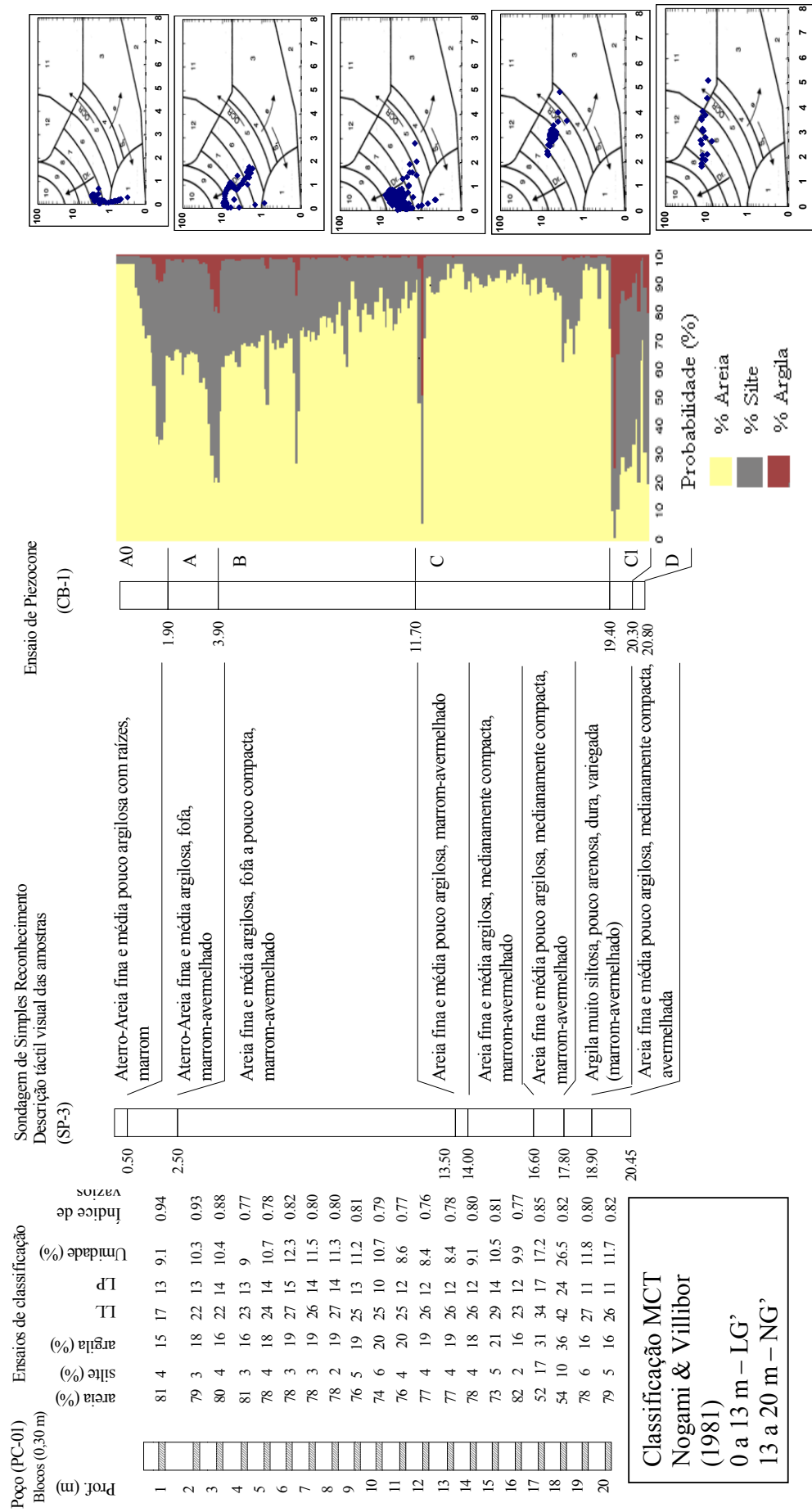


Figura 5.89 - Comparação de métodos de classificação do solo: ensaios de laboratório, sondagem de simples reconhecimento (SP-3) e ensaio de piezocone (CB1) no Sítio Bauru

Com base na interpretação dos ensaios de piezocone e sondagens de simples reconhecimento foi construída uma seção estratigráfica (Figura 5.91), onde a porção mais superficial do maciço é interpretada como produto de morfogênese associada a pedogênese. Nas porções mais superficiais, entre 0 e 13 m de profundidade, os resultados dos ensaios não acusam a presença de camadas bem definidas e devem, desta forma, representar porções do terreno desenvolvidas por processos de colúviação ou por pedogênese em estágio avançado, que mascara ou suaviza os contatos entre camadas. Em função da transição próxima a 13 m de profundidade ser abrupta, julga-se que a porção mais superficial deve ser um colúvio. No entanto, no interior deste colúvio ocorrem diferenças sensíveis nos registros de  $q_c$ , como a variação brusca a 6 m de profundidade, indicada na Figura 5.87, que não podem ser explicadas somente pelos processos de pedogênese, podendo estar ligada a processos de dissolução da cimentação e conseqüente amolecimento.

Desta forma, a interpretação aqui adotada conduz a identificação de diferentes fases de colúviação, além de três fases de remobilização de cimento carbonático, sugeridas por Fernandes (1998), que devem interferir no registro dos valores de  $q_c$  de forma sensível. As reduções bruscas de resistência e as alterações das velocidades sísmicas, em um dos ensaios sísmicos realizados nas profundidades entre 10 e 16 m (Figura 5.90), provavelmente indicam a presença de uma anomalia, responsável pela grande heterogeneidade no local, e evidenciada também pelos resultados anômalos de ensaios pressiométricos realizados a cerca de 13 m de profundidade, por Cavalcante et al. (2005) e mostrados na Figura 5.90.

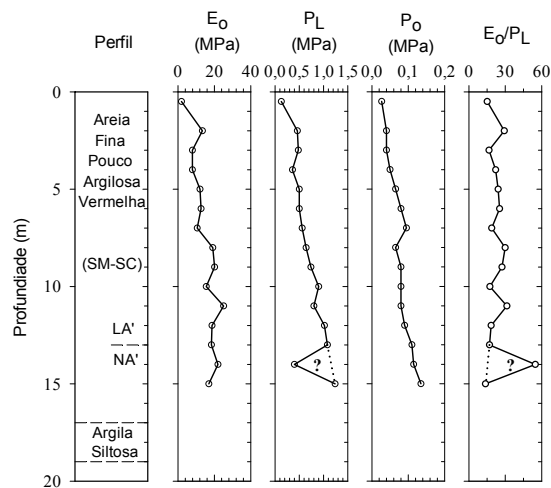


Figura 5.90 - Resultados dos ensaios pressiométricos de Ménard realizados no Campo Experimental da Unesp de Bauru (Módulo Pressiométrico -  $E_p$ , Pressão Limite -  $P_L$  e Pressão Horizontal -  $P_0$ ). Cavalcante et al. (2004).

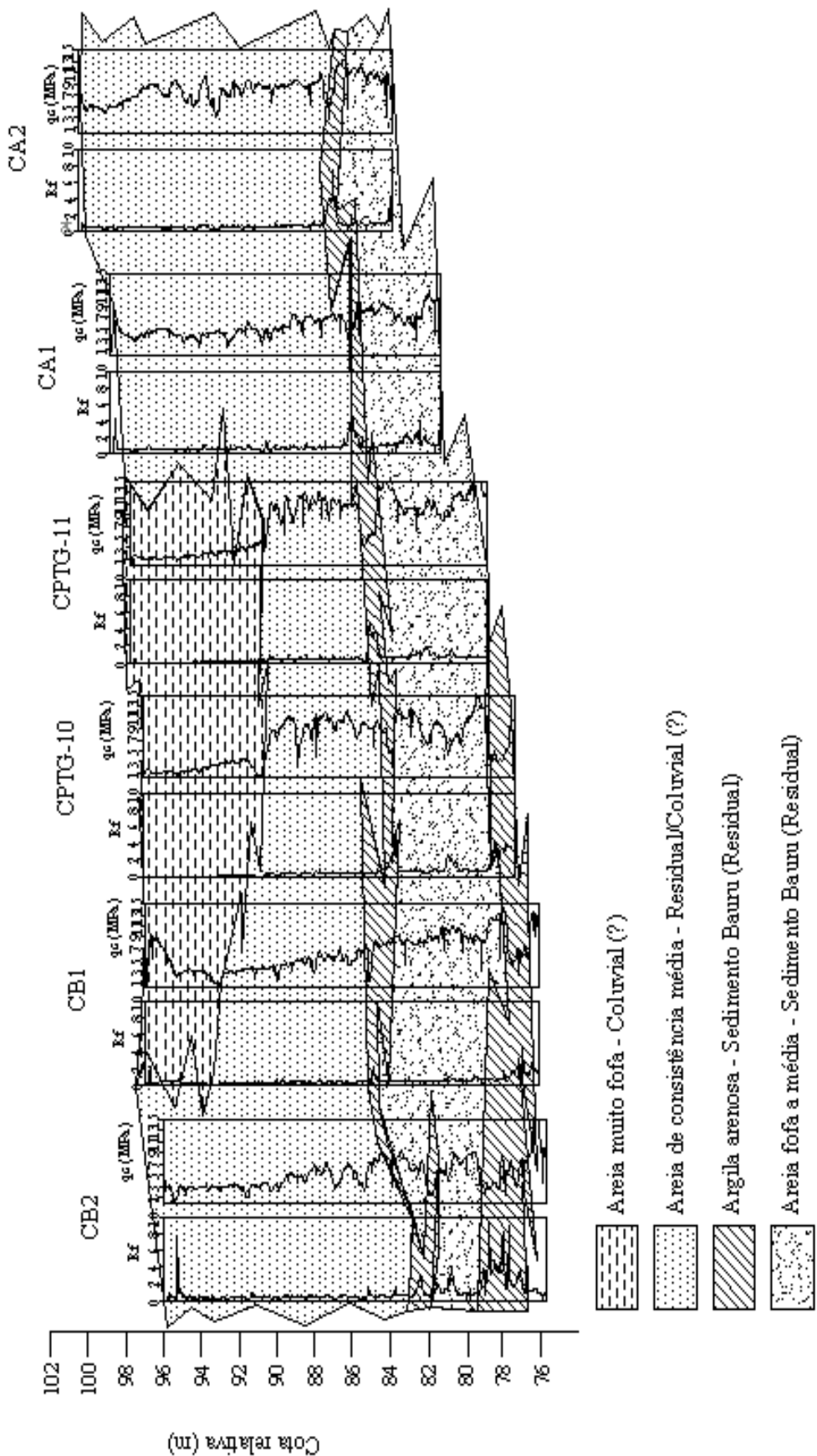


Figura 5.91 – Seção estratigráfica, interpretada a partir de valores de  $q_c$  e  $R_f$  dos ensaios de piezocone do Sítio Bauru

#### 5.4.5.4 – Ensaios com piezocone sísmico

Dois ensaios de piezocone sísmico, executados durante a pesquisa, possibilitaram a determinação da velocidade da onda cisalhante ( $V_s$ ), conforme detalhado no Capítulo 4 (Materiais e Métodos). A Figura 5.92 mostra o resultado destes ensaios, indicando os registros de  $q_c$ ,  $R_f$  e de velocidade da onda  $S$ . Os ensaios foram realizados alinhados e distantes 3 m um do outro, conforme mostrado na Figura 5.83. Os resultados mostram uma grande variação no perfil, principalmente nos registros de  $q_c$ , o que também afetou os valores da velocidade da onda cisalhante, especialmente no ensaios SCPTV-1. A interpretação mostrada na seção estratigráfica da Figura 5.91 evidencia uma região de grande variação nos diversos ensaios de piezocone. Esta variação, em princípio, não pode ser explicada pela presença de camadas mais moles, pois as feições de amolecimento parecem indicar uma geometria irregular e localizada, sendo aqui sugerida a interpretação como ligada a diferenças de cimentação das areias.

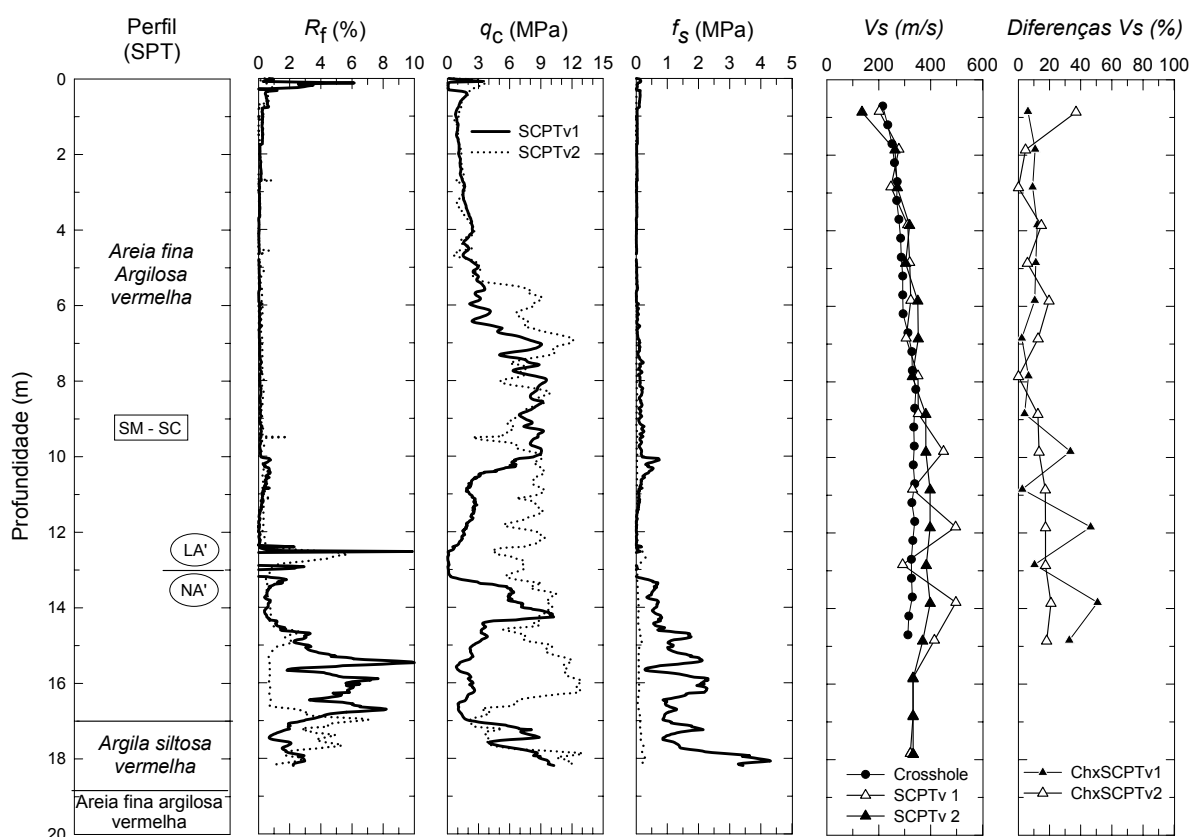


Figura 5.92 – Resultado de dois ensaios de piezocone sísmico (SCPTV-1 e SCPTV-2) distantes de 3 m, evidenciando a grande variabilidade no intervalo entre 10 e 16 m do Sítio Bauru.

Na Figura 5.93 tem-se os registros de velocidade de onda cisalhante determinado a partir de ensaios de piezocone sísmico, comparados com resultados de ensaios de “cross-hole”, executados ortogonalmente aos ensaios de piezocone sísmico.

Os valores de velocidade da onda S, apresentados na Figura 5.93 variam significativamente dependendo do ensaio realizado, mesmo para ensaios situados muito próximos um do outro. Isto pode ser explicado pela variabilidade local dos sedimentos. Até a profundidade de cerca de 10 m os resultados são semelhantes, no trecho de 10 a 16 m ocorrem diferenças significativas, e abaixo dos 16 m de profundidade os valores tendem a ser semelhantes, apesar da ausência de resultados de ensaios de “cross-hole” abaixo de 15 m de profundidade. Estas variações devem estar ligadas à diferentes graus de cimentação dos materiais, que refletem a complexidade destes perfis sedimentares submetidos a processos de pedogênese tropical.

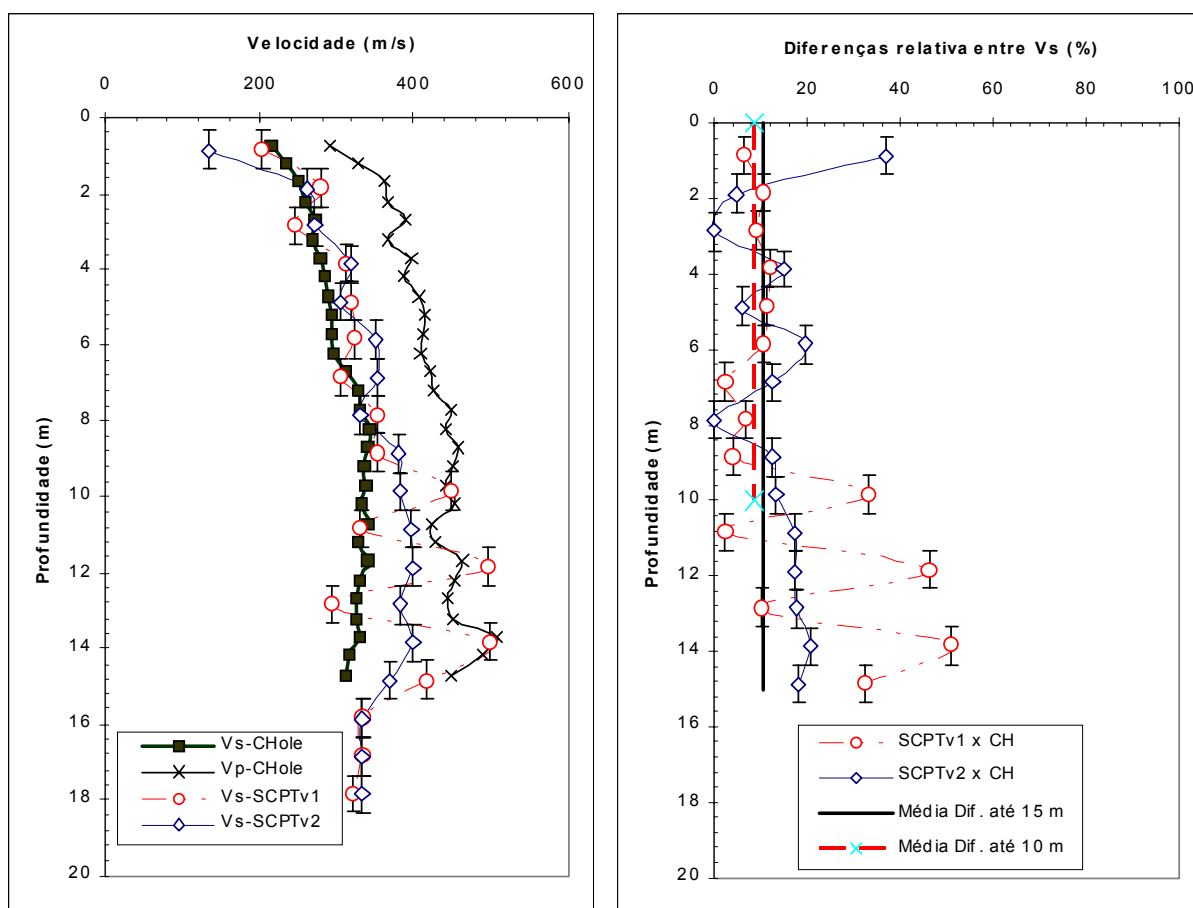


Figura 5.93 – Velocidade de onda sísmica a partir de ensaios de piezocone sísmico e ensaio de cross-hole.

Neste mesmo local, Cavalcante et al. (2005) identificaram comportamento anômalo dos resultados de ensaios pressiométricos, com queda abrupta dos valores da pressão limite ( $P_L$ ) exatamente a 13 m de profundidade, conforme mostrado na Figura 5.90. Além disto, os

teores de umidade nesta posição tiveram aumento sensível, nas amostras coletadas quando da abertura do furo para execução do ensaio PMT. Observa-se que, no trecho entre 10 e 16 m de profundidade, ocorre sensível diferença entre os dois perfis de ensaio, e as variações na velocidade da onda cisalhante coincidem com o trecho onde ocorre essa sensível redução nos valores de  $q_c$ , especialmente no ensaio SCPTV-1. Variações de tal intensidade a curtas distâncias são difíceis de serem justificadas portanto, devem estar vinculadas aos processos de pedogênese, onde a ação intempérica provocou transformações das características originais dos sedimentos, aumentando a complexidade. As variações identificadas neste local, indicadas pelos resultados do ensaio de piezocone, do ensaio pressiométrico e que afetaram a determinação da velocidade da onda cisalhante, pela técnica do “down-hole” no ensaio SCPTV-1, interferem na seleção de parâmetros de projeto, e podem justificar comportamentos anômalos, mesmo em resultados de provas de carga como aqueles que ocorreram em pesquisa realizada neste sítio e apresentadas em Ferreira et al. (1998), discutidos por Godoy (1999) e Giacheti & Esquivel (2001).

#### 5.4.5.5 Correlações entre parâmetros

##### 5.4.5.5.1 – Relação $q_c/N_{SPT}$

Foram selecionados um ensaio de cone elétrico e uma sondagem de simples reconhecimento contíguos para avaliar as variações da relação  $q_c/N_{SPT}$  em função da mudança de critério de seleção dos parâmetros, comparando-os com previsões a partir de correlações, conforme detalhado no Capítulo 4 (Materiais e Métodos). A Figura 5.94 mostra o resultado obtido quando se emprega diferentes critérios de correlação, já descritos.

Os resultados mostram que existe uma correspondência quase perfeita entre os critérios de seleção de  $q_c$  com base na média em 1,0 e em 0,3 m, conforme mostra Figura 5.94.a .



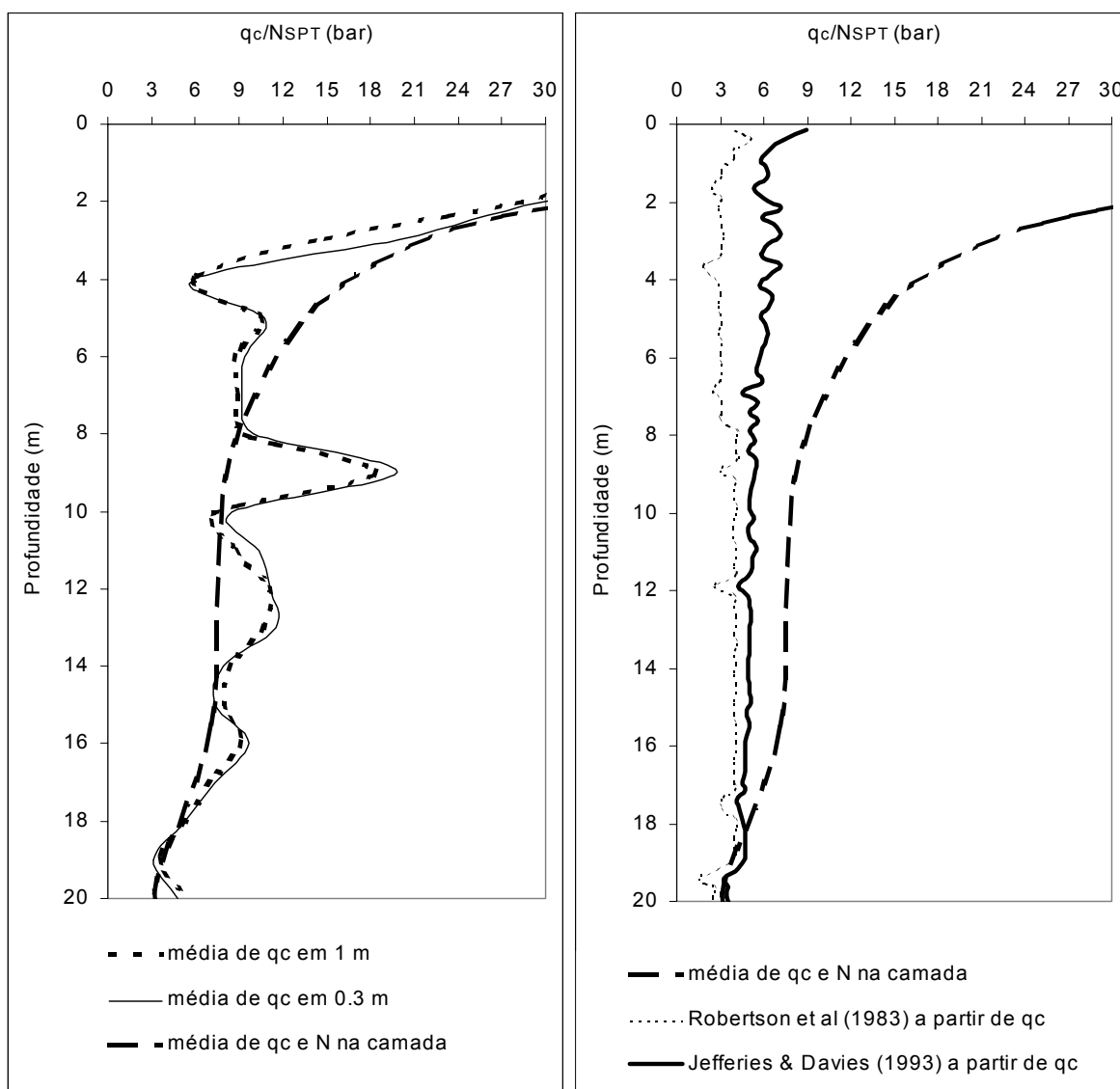


Figura 5.94 Correlação entre  $q_c$  e  $N_{SPT}$  comparando medições em campo e previsões com base em correlações no Sítio Bauru (CB1 e SP-3).

Na aplicação do critério de seleção com base da média de parâmetros no interior das camadas pré-definidas (Figura 5.94.b), verifica-se uma suavização dos picos e a uma maior semelhança com os resultados obtidos pelas propostas de Robertson et al (1983) e Jefferies & Davies (1993), a partir de  $q_c$ , sendo que os valores da razão  $q_c/N_{SPT}$  previstos por e Jefferies & Davies (1993) são sistematicamente maiores. Nas porções mais superficiais, acima de 3 m, a relação  $q_c/N_{SPT}$  obtidas dos ensaios são muito diferentes daquelas previstas pelas correlações a partir dos valores de  $q_c$ , estando provavelmente ligadas a presença de cimentação ou a variações sazonais do teor de umidade, que podem modificar os valores de resistência do solo.

5.4.5.5.2 – Relação  $G_0/q_c$ 

Na Figura 5.95 são mostradas as relações  $G_0/q_c$ , com base em um ensaio de “cross-hole” situado entre os dois ensaios de piezocone, variando-se o critério de seleção de  $q_c$ . Nota-se, nessa figura, que os resultados são contrastantes e dificultam a interpretação da estratigrafia e a seleção de parâmetros.

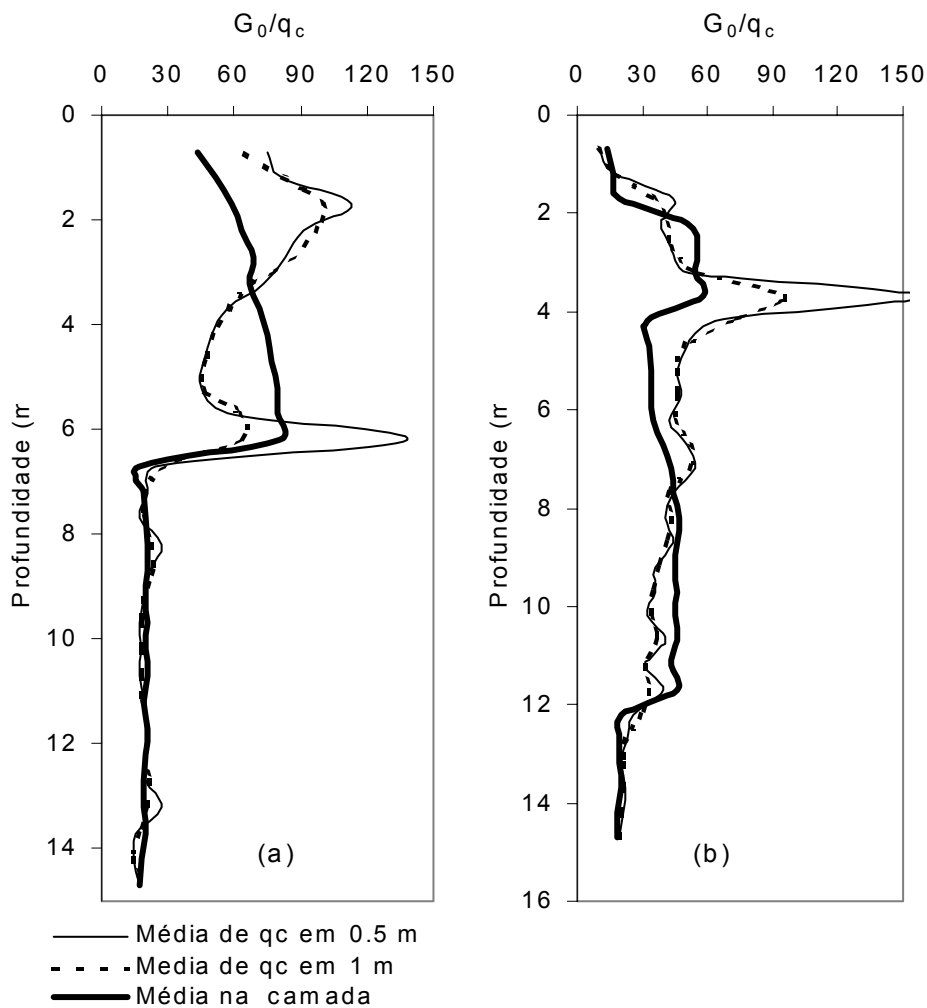


Figura 5.95 – Relação  $G_0/q_c$ , com base no resultado de ensaio cross-hole e ensaio de piezocone contíguos, comparando diferentes critérios de seleção de  $q_c$ . (a) CPTG10 e CHT-1, (b) CB1 e CHT-11.

Quando são comparados os resultados dos dois critérios de seleção de  $q_c$  (média em 0,5 e 1 m) observa-se que os valores da relação  $G_0/q_c$  são muito próximos, a exceção de aproximadamente 6 e 4 m de profundidade (Figuras 5.95.a e 5.95.b respectivamente), onde os valores dos picos são sensivelmente diferentes, devido a variabilidade de  $q_c$  registrado no ensaio de cone elétrico. Quando se analisa o critério de média dos valores nas camadas

(Figura 5.95), permanecem as mesmas tendências, porém ocorre uma suavização da curva e minimização dos picos. Nessa figura observa-se que os valores da relação  $G_0/q_c$  tendem a permanecer entre 50 e 80 nas porções mais superficiais do maciço, sendo reduzido para 20 nas porções mais profundas. No entanto a profundidade de interface é registrada na posição de 6,5 m no ensaio CB1 e 12 m no CPTG-10. Isto reflete a grande variação de  $q_c$  nos ensaios de piezocone, refletindo a variabilidade natural do solo.

A relação  $G_0/q_c$ , obtida a partir dos resultados de ensaios de piezocone sísmico, tende a minimizar os efeitos da variabilidade, pois os parâmetros são medidos em uma mesma porção do maciço de solo. Desta forma a relação  $G_0/q_c$  foi também obtida, nesse sítio, a partir de ensaio de piezocone sísmico, conforme mostrado na Figura 5.96.

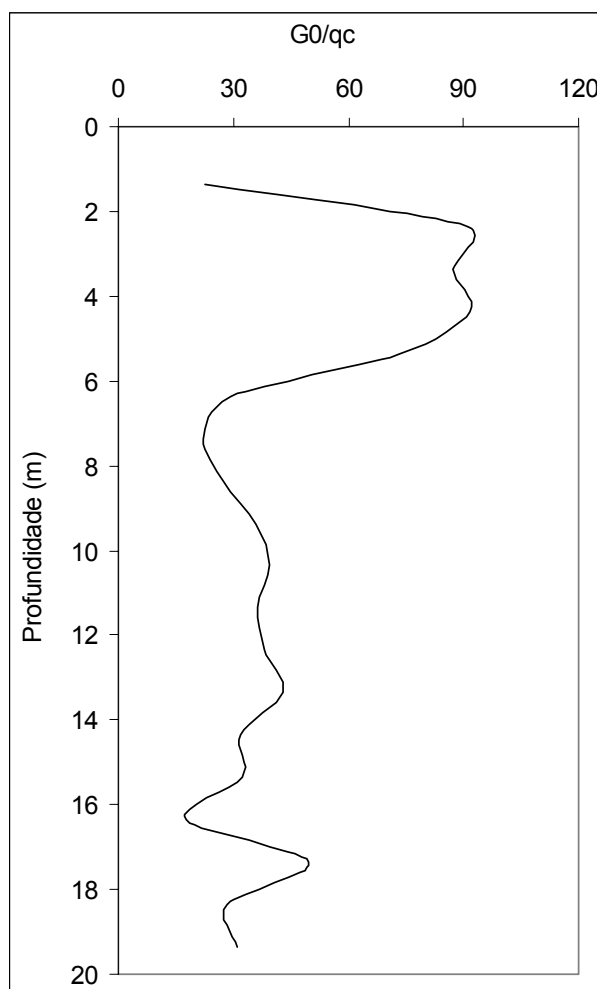


Figura 5.96 – Relação  $G_0/q_c$ , a partir de resultados dos ensaios de piezocone sísmico SCPTV-2.

A elevada variabilidade do perfil estratigráfico no local deste ensaios, refletida nos registros de  $q_c$  e  $R_f$  dos ensaios de piezocone, em especial no ensaio SCPTV-1 (Figura 5.92),

mostra que a relação  $G_0/q_c$  sofre influência direta desta variabilidade. As porções mais superficiais do terreno tendem a apresentar relações  $G_0/q_c$  variáveis de 60 a 100, enquanto as porções mais profundas tendem a apresentar relações com valores em torno de 20 a 30, com interface, indicada pelo ensaio SCPTV-2, na profundidade de 6 m. Esta relação sofre influências, por um lado, das cimentações (ferricretes e silcretes) produzidas pelo intemperismo tropical nas porções mais superficiais pelo intemperismo tropical, ou até mesmo por processos de solubilização em concentrações carbonáticas presentes na Formação Marília, porém não identificadas diretamente no sítio de pesquisa.

É importante observar que variabilidades menores do perfil é registrada pelos valores de  $q_c$ , enquanto que as medidas da velocidade da onda S tendem a registrar valores médios dos trechos atravessados pela onda, o que minimiza os efeitos das variabilidades menores do perfil. No caso do ensaio SCPTV-1, conforme mostrado nas Figuras 5.92 e 5.93, tem-se um trecho de elevada variabilidade (10 a 16 m de profundidade), numa escala que é registrada tanto por  $q_c$  quanto pela *velocidade da onda S*, e que comprometeu a realização e a interpretação de ensaios sísmicos pela técnica de “down-hole” no SCPTU, segundo o método de velocidade intervalar.

## 6. DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 6.1 Considerações gerais

A seleção de parâmetros geotécnicos e geoambientais de materiais inconsolidados, passa necessariamente pelo entendimento da forma de distribuição dos materiais que constituem as porções mais superficiais da Terra. São objeto da presente análise materiais cujo estudo é realizado com base na Mecânica dos Solos. Os maciços rochosos, estudados com base na Mecânica das Rochas, representam substratos dos materiais inconsolidados. O objetivo da investigação é obter a distribuição estratigráfica tridimensional do terreno e selecionar os parâmetros de projeto mais adequados a cada intervenção de acordo com a natureza do terreno. A investigação normalmente é conduzida a partir de ensaios pontuais, cujos tipos e quantidades são definidos a partir de normas e orientações técnicas, que muitas vezes não consideram as condições geológicas na programação e na interpretação dos ensaios.

Os resultados apresentados neste trabalho mostram que a seleção dos parâmetros de projeto só pode ser feita após adequado entendimento do contexto geológico e dos processos que atuaram na formação dos materiais inconsolidados. Julga-se apropriado planejar e executar uma campanha de investigação, considerando as seguintes etapas:

- Estudo geológico considerando gênese do perfil,
- Identificação das transições entre diferentes materiais, obtidos a partir de ensaios pontuais de perfilagem,
- Classificação dos materiais inconsolidados e das interfaces com o substrato rochoso,
- Integração entre as informações pontuais, com identificação da forma das unidades e da posição do nível de água,
- Análises de variabilidades geotécnicas ou geoambientais, em função dos tipos de projetos e condições geológicas de cada terreno,
- Estimativa dos parâmetros através de correlações ou ensaios específicos,

Cada um destes aspectos é discutido conforme os resultados dos vários ensaios nos sítios estudados.

## 6.2 Estudos geológicos e gêneses dos perfis estratigráficos

A compreensão da gênese dos materiais inconsolidados é uma das principais etapas da investigação, que depende da diversidade de situações e processos que atuam ou atuaram na Terra; sejam os de dinâmica interna, como metamorfismo e deformação das rochas; de dinâmica externa responsáveis pelo intemperismo, sedimentação e morfogênese, que ocorrem na superfície da Terra. Este entendimento passa pelos conceitos básicos de geologia, pedologia e geomorfologia que devem ser utilizados para prognóstico de algumas condições específicas da superfície da Terra, ou para interpretação da geometria das unidades de materiais inconsolidados, para que propiciem adequadas caracterizações geotécnicas ou geoambientais. Na Figura 6.1 tem-se um diagrama esquemático das possíveis etapas cíclicas de transformação a que são submetidos solos e rochas, em função dos tipos e intensidades dos processos ou variáveis independentes envolvidos.

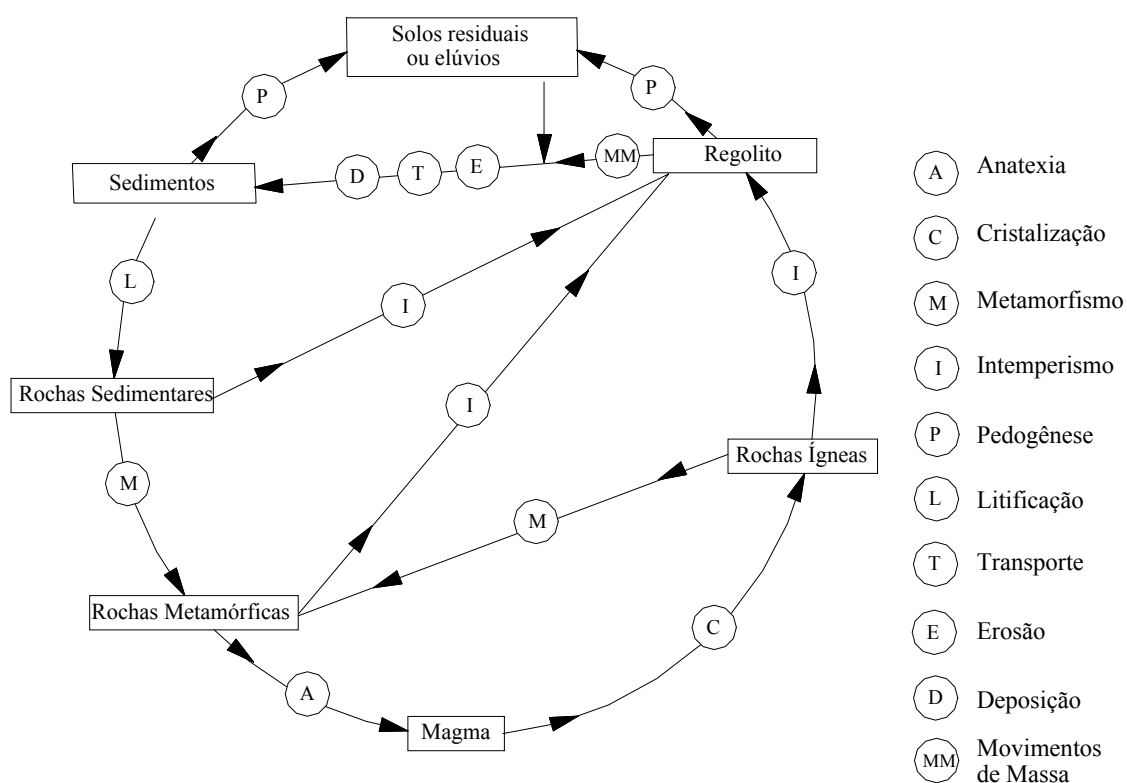


Figura 6.1 – Ciclos de formação e transformação de solos e rochas na Terra (Modificado de O'Brien & Buol, 1984).

O três tipos de perfis estudados (sedimentos quaternários de planícies litorâneas, sedimentos cenozóicos de bacias tafrogênicas e os solos tropicais) são discutidos a seguir considerando a geologia e os processos que atuaram na formação do perfil estratigráfico.

### 6.2.1 Sedimentos quaternários de planícies litorâneas

Os sedimentos quaternários, aqui estudados, são materiais inconsolidados formados por processos sedimentares, predominantemente em meio aquoso, de ambiente marinho ou misto (de transição para continental). As variações na constituição, espessura, extensão e relações de contato entre as camadas dependem dos ambientes e dos agentes de sedimentação, além da energia envolvida nos processos. Os sedimentos finos (argila e silte) concentram-se em ambientes de pouca energia como as baías fechadas, os sedimentos arenosos predominam em ambientes de maior energia, como os praias e fluviais. Em alguns ambientes de transição, como nas planícies e nos canais de marés, podem ser formadas finas intercalações de materiais arenosos e silto-argilosos, em função das amplitudes e conseqüentes correntes de marés. No entanto, as características geotécnicas destes sedimentos não estão vinculadas apenas à constituição dos sedimentos e, em diversas situações, o comportamento geotécnico está ligado ao nível de pré-adensamento dos sedimentos, principalmente dos pacotes argilosos que, no início da diagênese, deveriam apresentar elevados teores de água mas, em função da granulometria fina, teria sido lentamente expulsa com o aumento do peso pela deposição das sucessivas camadas. Desta forma, sedimentos depositados em mesmo ambiente, porém em épocas distintas, podem exibir propriedades geotécnicas distintas, tornando evidente a importância do adequado entendimento da história geológica, conforme já foi mostrado por Massad (1988) e Massad et al. (1996) em sedimentos do litoral do Estado de São Paulo. Diversos estudos ao longo de todo litoral brasileiro (Martin & Suguio, 1986; Angulo & Lessa, 1997; Andrade et al., 2003) têm mostrado que a gênese dos sedimentos quaternários do litoral esteve intimamente ligada às flutuações do nível médio dos mares (NMM), que ocorreram de forma particularmente intensa durante o período Quaternário. No Sítio Caravelas, Andrade et al. (2003) mostraram que toda deposição dos sedimentos ocorreu em ambiente de costa aberta, por influência das variações do NMM e da das correntes marinhas, responsáveis pela formação dos depósitos arenosos em cordões aproximadamente paralelos

à costa. Os estudos de Martin & Suguio (1986) e Angulo & Lessa (1997) indicam que os sedimentos depositados nos Sítios Guarujá e Paranaguá também foram formados devido às variações do NMM, porém em presença de ambientes mais calmos, protegidos por morros, golfos e planícies no interior de baías fechadas.

Na interpretação da geometria das camadas dos sítios localizados junto à planície litorânea devem ser utilizados os conceitos básicos da estratigrafia e da análise de bacias sedimentares, que requerem estudos especializados de diversas áreas da geologia.

### 6.2.2 Sedimentos cenozóicos de bacias tafrogênicas

Os sedimentos cenozóicos de bacias tafrogênicas, analisados neste trabalho, englobam materiais inconsolidados com forte pré-adensamento, pois grande parte dos depósitos é de idade paleogênica. Foram depositados em bacias tectônicas, integrantes do *rift* continental do Sudeste do Brasil, que é uma feição tectônica cenozóica de orientação ENE, desenvolvida entre as cidades de Curitiba (PR) e Barra de São João (RJ), conforme Riccomini (1989). O substrato da bacia é essencialmente constituído por rochas graníticas, migmatitos e rochas metamórficas diversas, recortadas por falhamentos gravitacionais e transcorrentes, responsáveis pela abertura das bacias sedimentares como as de São Paulo e Curitiba. O pré-adensamento destes sedimentos está, em parte, ligado a ressecção pela exposição ao sol durante a sedimentação e, em parte, ligado ao peso da coluna de sedimentos, hoje removida parcialmente pela erosão. Representam, desta forma, sedimentos de bacias terrestres tafrogênicas, parcialmente erodidos e hoje submetidos a processos de alteração e de morfogênese.

No Sítio Curitiba evidencia-se a presença de colúvios e de ação intempérica sobre os sedimentos cenozóicos. No Sítio São Paulo, os sedimentos cenozóicos estão recobertos por sedimentos quaternários recentes e aterros, sem evidências de processos de morfogênese e pedogênese, pelo menos no local estudado.

A formação destes pacotes sedimentares esta ligada ao preenchimento das bacias tectônicas, em ambiente continental, numa fase de transição de clima úmido para clima semi-árido. Estas conclusões são suportadas, para a bacia de Curitiba, pelos estudos de Bigarella & Salumuni (1969), e por evidências nos próprios sedimentos, como a presença de calcrete e de pseudo-morfos de feldspato transformados em caulim, imersos em matriz silto-argilosa. As áreas-fonte destes sedimentos englobaram principalmente as rochas



cristalinas do entorno, onde existia espesso manto de intemperismo, desenvolvido sob clima úmido e quente pretérito. Na transição para o clima semi-árido, com redução drástica da cobertura vegetal e exposição dos solos às chuvas concentradas e episódicas, ocorreram formações de leques aluviais, corridas de lama e de extensos depósitos de *playa-lake*, estes últimos representados pelos depósitos de argilas siltosas cinza-claras presentes nas Bacias de Curitiba e São Paulo. O clima árido à época da sedimentação é evidenciado por níveis centimétricos a métricos de concreções carbonáticas (calcretas) presentes principalmente na Bacia de Curitiba.

Na interpretação da estratigrafia destes sedimentos devem ser considerados os conceitos básicos da geologia sedimentar e da estratigrafia, sendo características marcantes as transições bruscas entre diferentes unidades, a geometria lenticular dos diversos estratos e a baixa seleção granulométrica dos sedimentos, características destes ambientes e dos processos de formação. Na região do Sítio Curitiba, além dos conceitos básicos da sedimentologia e estratigrafia, é necessário a aplicação dos conhecimentos de morfogênese e de pedogênese, pois os sedimentos Terciários são recobertos por colúvios e submetidos a processo de intemperismo, evidentes na área estudada.

### 6.2.3 Solos tropicais

Os solos estudados nos Sítios São Carlos, Campinas, Bauru e Londrina, apresentam características que os diferenciam sensivelmente dos solos das bacias sedimentares. Estão situados sobre rochas cristalinas basálticas e sedimentares da bacia do Paraná. São rochas que tiveram sua formação ligada a processos muito antigos, maiores que 100 milhões de anos, e que posteriormente foram submetidas a diversos ciclos de erosão, pedogênese e morfogênese que resultaram nas características que hoje se observa no perfil de solo e na morfologia da superfície do terreno dos locais estudados. A diversidade de processos, em condições climáticas muitas vezes contrastantes, resulta na complexidade geometria e composicional destes materiais.

As transformações provocadas pelo intemperismo efetivamente são mais evidentes nas rochas que apresentam minerais que se alteram mais facilmente, como feldspatos, anfibólios e piroxênios, que normalmente estão presentes em rochas metamórficas e magmáticas (Nesbitt & Young, 1984). As diferenças de composição e de estrutura (acamamentos, dobras, falhas e fraturas) controlam padrões de intemperismo nestas rochas,

introduzem elevado nível de variabilidade de difícil previsão, e não podem ser interpretadas sob a ótica da estratigrafia sedimentar, com base no conceito de camadas horizontais ou sub-horizontais.

As diferenças de bandamento, principalmente de rochas metamórficas, como gnaisses e quartzitos, fazem surgir núcleos proeminentes de rocha sã, com várias dimensões e formas, que interferem sensivelmente nas obras geotécnicas, principalmente no projeto e execução das fundações. No presente trabalho não são estudados locais com rochas metamórficas, porém elas representam os perfis geotécnicos mais complexos sobre os quais podem desenvolver-se os solos tropicais, considerando que eles foram submetidos a várias fases de deformação e metamorfismo, que produziram diferentes geometrias de corpos rochosos de estruturas complexas que, quando submetidas ao intemperismo tropical, podem resultar em diversos tipos de perfis geotécnicos com elevada variabilidade nos sentidos horizontais e verticais.

Já, nos sedimentos arenosos ou argilosos, sejam recentes ou antigos, quando submetidos ao processo de intemperismo tropical, os minerais presentes não são suscetíveis a grandes transformações, pois são produtos de pelo menos um ciclo de erosão, transporte e deposição. Desta forma, nestes materiais as transformações produzidas pelo intemperismo são geralmente menos intensas.

Os sítios aqui estudados, apesar de apresentarem características de evolução tropical e terem sido submetidos a ciclos climáticos semelhantes entre si durante o Quaternário, mostram sensíveis diferenças advindas principalmente das variações dos tipos litológicos e dos substratos rochosos, conforme detalhado a seguir.

#### *6.2.3.1 Sítio São Carlos*

O Sítio São Carlos, conforme apresentado anteriormente, mostra uma seqüência, com aproximadamente 30 m de espessura que se inicia, em profundidade, com basalto alterado e transformado em solos nas suas porções mais superiores, recoberto por sedimentos atribuídos ao Grupo Bauru, que é recoberta nas porções mais superficiais por depósito de colúvio. Na interface entre o colúvio e os sedimentos atribuídos ao Grupo Bauru ocorre um nível de seixos de quartzo com fragmentos de crostas ferríferas e espessuras de até 1 m, denominada comumente de “linha de pedras” (stoneline). Esta seqüência de materiais reflete uma história geológica que remonta há mais de 100 milhões

de anos, com diversidade de processos geológicos, envolvendo vulcanismo, erosão, sedimentação em ambientes continentais, seguidos de pedogênese e morfogênese, que atuaram ao longo de diversos ciclos, e que em maior ou menor intensidade, impuseram suas características ao perfil de solo hoje presente.

As rochas basálticas foram formadas durante o extenso e intenso vulcanismo jurássico-cretáceo e recobrem os sedimentos arenosos predominantemente eólicos da Formação Botucatu. Este vulcanismo ocorreu em diversas fases, com derrames de várias espessuras que, segundo Melfi et al. (1988), apresentam espessuras médias entre 10 e 20 m, podendo apresentar desde alguns poucos metros até cerca de 50 m. No momento da solidificação do magma estavam definidas a composição e a espessura das camadas. Durante o processo de resfriamento ocorreram fraturamentos, principalmente de contração, que são superpostos por deformações e fraturamentos ligados aos eventos tectônicos ao longo de toda história de evolução destas rochas até o presente, que controlam o avanço das frentes de intemperismo. Devido à vários derrames superpostos e separados por intervalos de centenas ou milhares de anos, podem ocorrer diferentes tipos de materiais nas interfaces dos derrames, sejam eles resultantes de processos de sedimentação, da alteração intempérica dos basaltos já consolidados, ou da formação de camadas de tufos ou cinzas vulcânicas. Este fato foi registrado por Melfi et al. (1988), que mostraram a ocorrência de estratos de arenito com até 160 m de espessura entre os derrames de basalto. Este fato tem implicações geotécnicas importantes, como controladores dos processos de alteração intempérica e responsáveis pela presença de níveis mais moles entre camadas de basaltos frescos, falseando a profundidade exata da transição solo-rocha, com implicações importantes na engenharia de fundações. A Foto 5.1, obtida próxima ao Sítio São Carlos, exemplifica essa característica.

Assentado em discordância sobre rochas vulcânicas do Grupo São Bento, foram formados no Cretáceo Superior, sedimentos pertencentes ao Grupo Bauru, em ambiente continental fluvial-lacustre e localmente eólico. Na região do Sítio Bauru estes sedimentos são extensos, porém na região do Sítio São Carlos a ocorrência é restrita, com raros afloramentos, porém identificados em sondagens realizadas nesse sítio. No Sítio São Carlos (Figuras 5.50 e 5.53) foram encontrados pacotes com acamamento bem definido, principalmente nas profundidades maiores que 14 m. Entre 6 e 14 m este acamamento não está presente nas sondagens, talvez por alterações pedogenéticas ou por representar colúvio mais antigo.

Com a finalização do processo de sedimentação do Grupo Bauru e inversão topográfica da bacia, iniciaram os processos de erosão responsáveis pela remoção parcial dos sedimentos, desconhecendo-se a espessura original total de sedimentos. Características como o baixo grau de consolidação, sugerem que a espessura original dos sedimentos do Grupo Bauru não deve ter sido muito superior a atualmente existente.

#### *6.2.3.2 Sítios Campinas e Londrina*

No Sítio Campinas, os estudos e investigações geológicas mostram a ocorrência de diabásio submetido ao intemperismo tropical, com desenvolvimento de espesso manto de intemperismo. O diabásio pode ser geralmente encarado como rocha ígnea de grande homogeneidade composicional, principalmente nos corpos com pequena espessura, onde a diferenciação magmática não é intensa. Desta forma o substrato rochoso é, neste sítio, interpretado como sendo constituído por um único tipo rochoso com fraturamentos diversos, que devem controlar as frentes de alteração. Assim, o perfil estratigráfico utilizando o conceito de camadas, principalmente em solos saprolíticos, onde a estrutura original da rocha ainda está presente. As correlações entre ensaios situados em diferentes porções do maciço ficam prejudicadas em função da grande variabilidade produzida pelo intemperismo tropical. Outro aspecto importante nestas condições é a dificuldade na definição da superfície de impenetrabilidade, tanto durante a etapa de investigação quanto durante a execução de fundações. Este fato que deve ser adequadamente tratado durante a execução da investigação, do projeto e das intervenções, devido a variabilidade elevada do perfil de solo.

No Sítio Londrina ocorrem rochas basálticas, formadas a partir de extenso e intenso vulcanismo, que posteriormente foram submetidas ao processo de intemperismo tropical. As características das rochas basálticas já foram abordadas anteriormente. Na região deste sítio é importante atentar para a região de transição entre solo e rocha. Considerando que as espessuras médias de cada derrame se situam entre 10 e 20 m, e que entre derrames podem ocorrer horizontes com diferentes composições, é provável que num perfil de intemperismo de 30 m, estas diferentes características se manifestem. Podem, desta forma, ocorrer níveis de solo em meio à rocha sã, bem como profundidades muito variáveis do impenetrável em função da posição das frentes de avanço do intemperismo. Em alguns casos é até recomendada a execução de sondagem rotativa em continuidade à sondagem de simples reconhecimento, principalmente no caso de fundações profundas ou aquelas

presumivelmente apoiadas na rocha. Outro aspecto a ser considerado neste tipo de perfil é a grande imprecisão na interpretação estratigráfica utilizando o conceito de camada, bem como na correlação entre ensaios situados em diferentes posições do maciço de solo.

### *6.2.3.3 Sítio Bauru*

No Sítio Bauru, as informações disponíveis indicam que ele está implantado sobre os sedimentos do Grupo Bauru sendo que, a Formação Marília, mais inferior estratigraficamente, desenvolveu-se em embaciamento restrito, em regimes torrenciais característicos de leques aluviais e com a formação de pavimentos detríticos, durante a instalação progressiva de clima semi-árido. A Formação Adamantina, superior estratigraficamente, é constituída por depósitos fluviais com predominância de arenitos finos e muito finos podendo apresentar cimentações e nódulos carbonáticos, lentes de siltitos arenosos e argilitos em bancos maciços com estratificação cruzada de pequeno e médio porte. A porção mais superficial destes sedimentos foi submetida a intenso intemperismo tropical, podendo ainda estar presente colúvio, apesar da inexistência de “linha de pedra” na interface.

## **6.3 Identificação das superfícies de transição**

As transições entre os diferentes pacotes de materiais inconsolidados, representam na verdade superfícies de discordâncias. Sua identificação a partir de ensaios de perfilagem pontuais também requer interpretação da história geológica da área estudada. Alternativamente, estas superfícies podem ser identificadas a partir de métodos geofísicos indiretos, como caminhamento elétrico, sísmicas de refração e de reflexão. A eficiência destes métodos depende da qualidade dos equipamentos, da habilidade dos técnicos, bem como das sensibilidades das superfícies de interesse aos métodos geofísicos utilizados.

As superfícies de transição envolvem basicamente dois tipos principais: os situados no interior dos materiais inconsolidados, e os que representam a superfície impenetrável pelos processos de sondagem de simples reconhecimento ou ensaio de penetração de cone. Essa superfície pode ser o topo rochoso ou aquela definida como a superfície rígida do sistema, em um modelo teórico do terreno. A identificação das transições no interior dos materiais inconsolidados é feita com base nos resultados das sondagens de simples

reconhecimento, pela leitura dos boletins de sondagens; ou a partir da inspeção visual das respostas dos sensores do piezocone, ou ainda é possível aplicar alguns testes estatísticos, como o teste  $D^2$ . No reconhecimento da superfície de transição entre os materiais inconsolidados e o substrato rochoso são utilizadas interpretações geológicas e dados de sondagens rotativas mais profundas.

### 6.3.1 Sedimentos quaternários de planícies litorâneas

O substrato rochoso das planícies sedimentares quaternárias costeiras, normalmente é profundo e pode se apresentar muito irregular, função dos processos erosivos que ocorreram antes da deposição e durante a dinâmica de formação das planícies costeiras. No Sítio Guarujá, sondagens de simples reconhecimento mistas (percussão e rotativa) indicam profundidades de cerca de 70 m; no Sítio Paranaguá, profundidades de 60 m são indicadas por poços de abastecimento de água profundos; e no Sítio Caravelas essa informação não está disponível. As sondagens convencionais, sejam as de simples reconhecimento (SPT) ou os ensaios de penetração do cone ou piezocone (CPT) normalmente não atingem estas profundidades (60 a 70 m ou mais), sendo paralisadas em função das características do projeto ou limitações dos equipamentos, quando se tornam necessárias as sondagens rotativas. Até a profundidade do topo rochoso ocorrem intercalações de camadas de areias compactas com camadas de argila e silte, normalmente de consistência mole a média. As investigações normalmente são paralisadas no topo de camadas de areia naturalmente em, função de critérios adotados. Durante a interpretação do perfil geotécnico é necessários estar ciente da possibilidade de ocorrência de camadas moles abaixo de camadas muito compactas. Na interface com o substrato rochoso é comum a ocorrência de zona de transição, com rochas muito alteradas ou mesmo solo saprolítico residual.

Nas superfícies de transição no interior dos sedimentos, normalmente verifica-se contraste marcante entre as camadas silto-argilosas e camadas arenosas, tanto por sondagens SPT como em ensaios CPT. No entanto, freqüentemente ocorrem intercalações centimétricas a decimétricas de materiais com diferentes composições, representativas de ambientes de sedimentação típicos ou zonas de transição. O caráter descontínuo das amostras SPT, aliado a grande subjetividade no processo, não permitem registrar diversas transições e prejudicam interpretações detalhadas do perfil. Por outro lado, os resultados

em ensaios de piezocone (CPTU) mostram elevado nível de sensibilidade na identificação de camadas com dimensões até centimétricas, com transições marcadas nos três principais sensores da ponteira ( $q_c$ ,  $f_s$  e  $u$ ), conforme mostrado na Figura 6.2. Isso permite estudos de detalhe que, desta forma, qualificam o ensaio de piezocone para as análises estratigráficas e paleoambientais, em conjunto com outros métodos tradicionais comumente utilizados nestes estudos.

Na interpretação geotécnica destas transições deve-se atentar para os efeitos de escala e espessura mínima da camada na determinação dos parâmetros mecânicos. Na Figura 5.37 observa-se que existe uma razoável correspondência entre os vários métodos utilizados na identificação das transições, porém as sondagens de simples reconhecimento são menos sensíveis e prejudicam os estudos de detalhe, que podem ser necessários especialmente para investigações geoambientais.

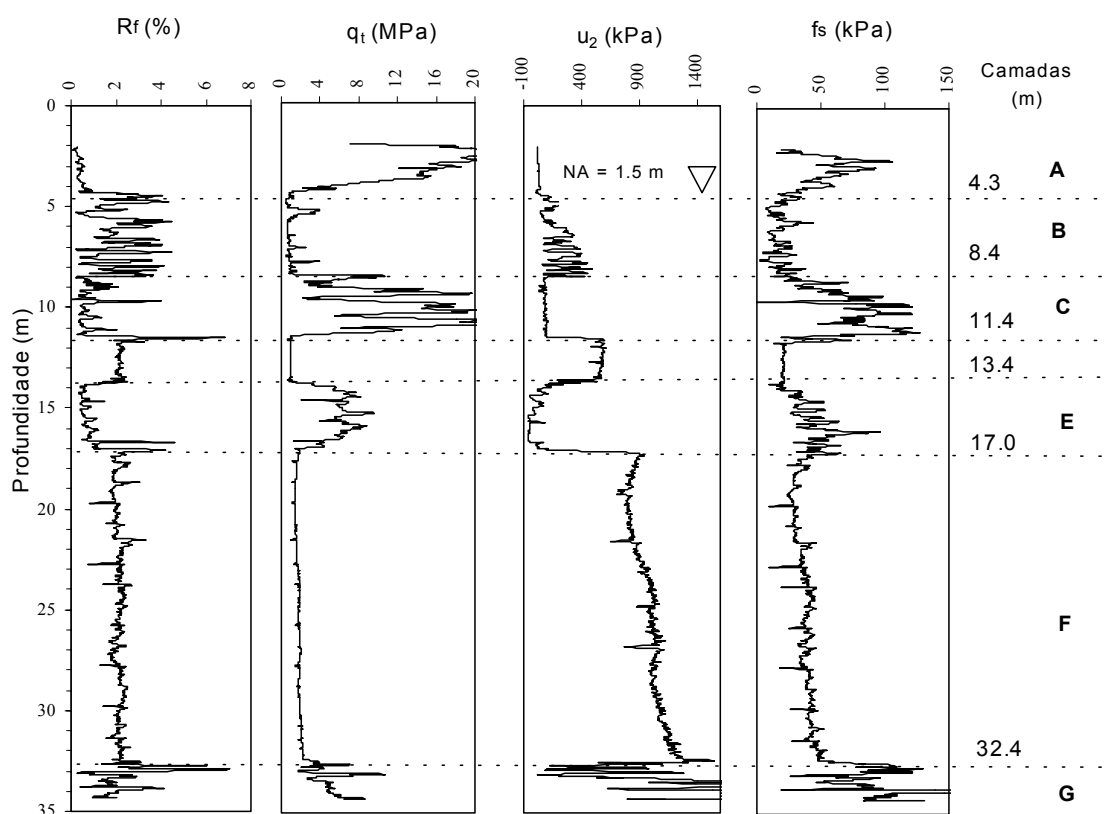


Figura 6.2 – Resultado de ensaio de piezocone, com destaque para as transições entre camadas no Sítio Caravelas (BA).

### 6.3.2 Sedimentos cenozóicos de bacias tafrogênicas

O contato entre os sedimentos e as rochas do substrato rochoso se apresenta muito irregular em função da erosão diferencial devida às diferenças de composição das rochas (gnaisses, migmatitos, granitos) que foram submetidas a diferentes graus de intemperismo e erosão antes da deposição dos sedimentos superpostos. Na Bacia de Curitiba estas profundidades variam de cerca de 100 m até alguns poucos metros, como na Bacia de São Paulo, onde as profundidades são no máximo de 120 a 150 m até alguns poucos metros. No Sítio São Paulo, sondagens de simples reconhecimento mistas indicam profundidades do substrato entre 45 e 50 m. Como grande parte dos sedimentos paleógenos são fortemente pré-adensados é comum que a superfície do impenetrável situe-se em meio aos materiais inconsolidados, como ocorre em diversas regiões da cidade de Curitiba, onde o impenetrável à sondagem SPT pode situar-se a entre 5 e 6 m de profundidade, sendo adequado o emprego de fundações superficiais. Por outro lado, em função do intemperismo e prováveis processos ligados ao fluxo subsuperficial da água, podem ocorrer solos moles, mesmo abaixo de camadas pré-adensadas e muito compactas. Estes casos ocorrem na transição para as rochas cristalinas do substrato rochoso, que podem apresentar manto de intemperismo desenvolvido e conseqüentemente mais moles. Em algumas situações, abaixo da camada de areia arcoseana com  $N_{SPT}$  acima de 40, ocorrem argilas muito moles, com  $N_{SPT}$  variando de 1 a 3, como a oeste da Bacia de Curitiba.

Estes fatos recomendam a necessidade de cautela na definição da superfície do impenetrável, de forma a evitar estes imprevistos. Nestes sedimentos pré-adensados as profundidades do impenetrável identificadas por sondagens SPT e ensaios de penetração do cone muitas vezes são contrastantes. A razão disso é que no SPT os critérios de paralisação são claros e definidos em normas, enquanto no CPT o limite dos ensaios depende do tipo de equipamento, da capacidade de cravação e do tipo de sistema de ancoragem ou reação utilizados.

Na identificação das superfícies de transição em meio aos materiais inconsolidados, observa-se que as transições são bem definidas e marcadas pelas diferenças granulométricas das diferentes camadas, claramente identificadas nas sondagens SPT e ensaios CPT. Na Figura 5.23 observa-se que esta alternância de camadas de diferentes granulões é marcada pelos vários sensores do piezocone. Na Figura 5.26, do Sítio São Paulo, verifica-se que a maioria das camadas pode ser identificada tanto no ensaio de CPT como na sondagem SPT. Neste caso, como foi feita coleta integral de amostras, as



limitações da sondagem SPT com relação a continuidade da amostragem foram minimizadas e, as diferenças são interpretadas como ligadas às diferenças de sensibilidade entre os métodos. De forma semelhante ao que ocorre nos solos sedimentares quaternários, o resultado do SPT falha em identificar feições de detalhe, nas regiões de transição entre camadas e nos locais onde ocorrem níveis delgados com diferentes composições granulométricas em meio às camadas mais espessas, conforme pode ser observado na Figura 6.3, no intervalo entre 18 e 24 m de profundidade, fica evidente a maior sensibilidade do ensaio de piezocone na identificação detalhada da estratigrafia.

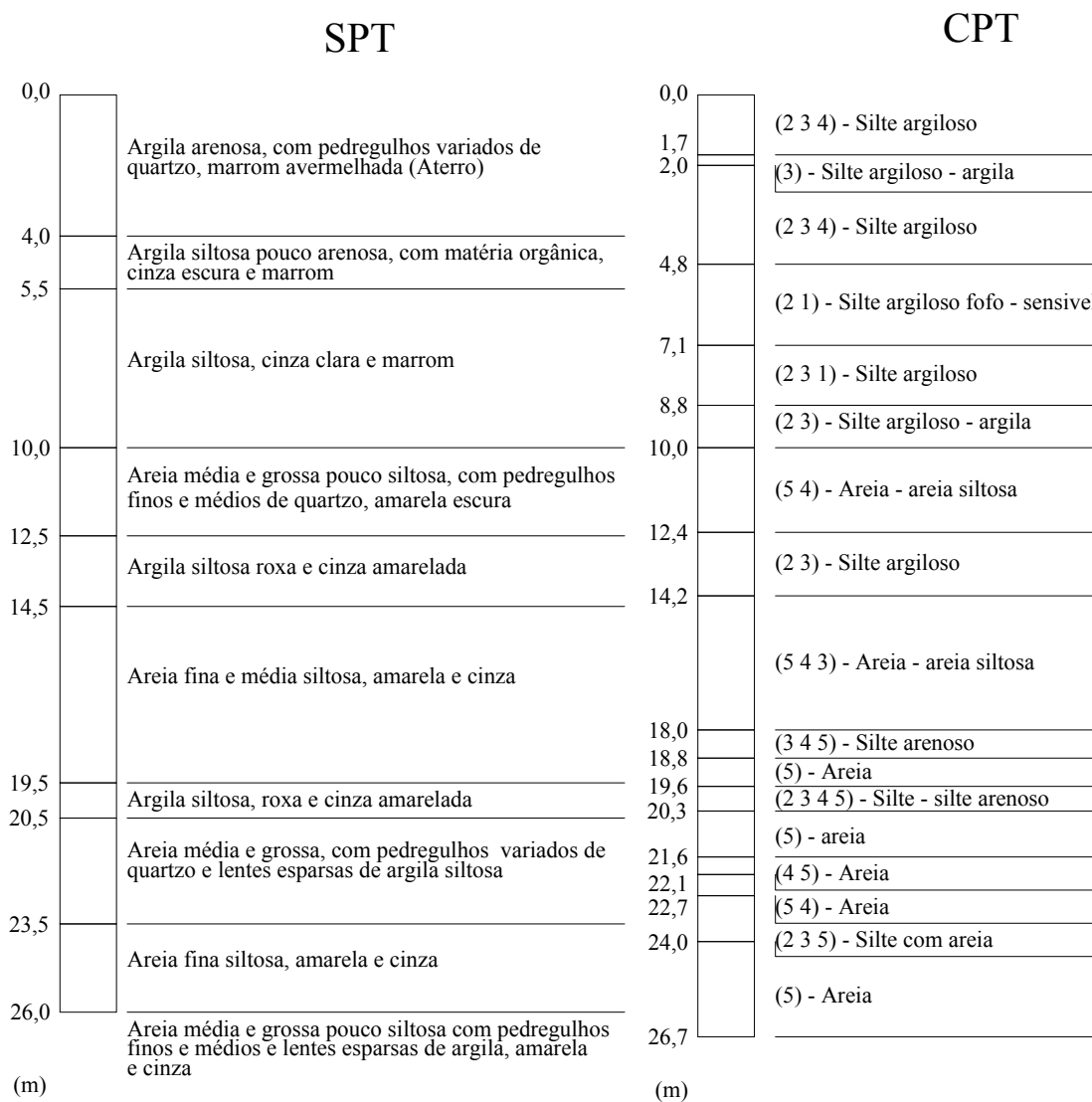


Figura 6.3 - Comparação entre classificações de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento (S-2) e em interpretações do ensaio de piezocone (R-3) com base em Robertson et al. (1986) no Sítio São Paulo

No Sítio Curitiba, onde os ensaios foram mais rasos e foram identificadas evidências efetivas de pedogênese e morfogênese na formação do perfil, a identificação das superfícies de transição entre as camadas é mais incerta, e os resultados mostrados na Figura 5.5 indicam variação na profundidade da transição entre camadas em função das variações nos métodos de identificação. Nestes casos, a combinação de métodos, com ensaio de piezocone e sondagem de simples reconhecimento, pode auxiliar na melhor definição do perfil estratigráfico.

### 6.3.3 Solos Tropicais

A identificação das superfícies de transição em materiais inconsolidados, desenvolvidos por intemperismo tropical, é mais complexa, seja por interpretação a partir da história geológica, ou por informações pontuais de sondagens. A complexidade advém da superposição de processos de erosão, sedimentação e diagênese, que obliteram estruturas e composição das rochas ígneas e metamórficas, na dependência da intensidade dos processos de intemperismo tropical, que normalmente atuam preferencialmente na vertical, controlados pela migração da água através de estruturas herdadas das rochas ou de sedimentos preexistentes.

As profundidades das superfícies de contato entre o material inconsolidado e o substrato rochoso podem ser muito variáveis em curtas distâncias, sendo, por exemplo, comuns variações de profundidade do substrato impenetrável superiores a 5 m em distâncias menores que 1 m em gnaisses. Este fato é difícil de ser prognosticado, caso não exista conhecimento geológico detalhado por investigação geofísica de superfície e sondagens criteriosamente posicionadas. A alteração intempérica tende a ser mais intensa e profunda ao longo de falhas e fraturas e em minerais mais suscetíveis ao intemperismo químico. No Sítio Campinas, onde ocorre diabásio, as características indicadas anteriormente estão presentes e condicionadas pelas fraturas, que causam diferentes graus de alteração em mesma profundidade, com variação sensível nas profundidades das sondagens até a superfície do impenetrável. Na Figura 5.65 observam-se variações nos resultados dos diferentes métodos de identificação das transições, explicados pelos diferentes graus de alteração no interior do maciço, com diferentes valores do  $N_{SPT}$  e comportamentos geotécnicos distintos, para mesma profundidade. Esta característica também é encontrada na Figura 5.66, onde sondagens muito próximas realizadas por mesma equipe, mostram resultados muito diferentes na posição das transições entre

“camadas”, ressaltando a impossibilidade de utilização do conceito tradicional de camada neste tipo de perfil.

Onde ocorrem rochas basálticas, como nos Sítios de Londrina e de São Carlos, os aspectos mostrados acima se repetem, porém com agravante da possível presença de estratos com diferentes composições, como de arenito em meio ao basalto, com possível ocorrência de materiais inconsolidados intercalados em rocha sã, complicando ainda mais a definição das superfícies de transição entre solos e substratos rochosos. A Foto 5.1 exemplifica o aspecto descrito acima, que pode exigir a execução de sondagens rotativas. Este aspecto repete-se, em casos especiais, na região do Sítio Londrina, em resultados das sondagens de simples reconhecimento, que mostram grande variação na profundidade do impenetrável, nos valores do  $N_{SPT}$  e na posição das transições entre “camadas”. Miguel et al. (2002) apresentam resultados de ensaios de caracterização e interpretação baseados em médias dos resultados dos ensaios no interior das “camadas” definidas por estes autores. Os resultados dos estudos aqui apresentados sugerem que esta abordagem é inadequada, pois não existem “camadas” bem definidas, conforme pôde ser verificado por 14 sondagens executadas no local (Branco et al., 1998). Os valores médios de ensaios podem conduzir a interpretações errôneas, que sugerem a necessidade de investigações com sondagens rotativas neste tipo de perfil. Na fundação de um edifício, o impenetrável foi atingido a cerca de 7 m de profundidade e a sondagem rotativa identificou rocha sã de 8 m até pelo menos 15 m de profundidade, possibilitando a utilização de sapatas com capacidade de carga adequada à rocha sã, com grande economia de custo e de espaço, devido a redução do tamanho das sapatas. Durante a construção de um muro de contenção, que supostamente seria fundado em rocha, pois a sondagem de simples reconhecimento sugeriu este fato. A perspicácia do projetista levou à execução de uma sondagem rotativa, que revelou níveis extremamente alterados e moles abaixo do “impenetrável” e houve mudança de projeto, com uso de estaca-raiz na fundação da contenção.

Na interpretação de superfícies de transição de materiais inconsolidados é importante procurar identificar a transição entre solos de comportamentos laterítico e não-laterítico (Nogami & Vilibor, 1985). Esta distinção têm implicações geotécnicas, pois os solos lateríticos são normalmente porosos, têm alta potencialidade ao colapso elevado, maior resistência à erosão, melhor condição de estabilidade em taludes e maior permeabilidade. A formação dos solos lateríticos mais superficiais está ligada a processos de evolução pedogenética muito avançada, com transição para os solos não-lateríticos muito irregular e às vezes gradual. Esta transição é de difícil reconhecimento e a

diferenciação é feita somente a partir de ensaios de laboratório, pelo Mini MCV e perda por imersão (Nogami & Vilibor, 1985) ou pelo método proposto por Ignatius (1991), a partir da interpretação da curva do ensaio de Proctor Normal. Em solos tropicais desenvolvidos sobre rochas sedimentares estratificadas (Sítio São Carlos e Bauru), verifica-se que os processos pedogenéticos tendem a suavizar os contatos entre as diversas camadas, dificultando a identificação das transições a partir dos valores de  $q_c$  e  $R_f$  do piezocone, conforme se observa na Figura 5.56. No entanto, quando são analisados os resultados de  $u$  (Figuras 5.53), verifica-se, nas posições abaixo do nível de água, que a poro-pressão marca de forma bem definida a alternância de vestígio de camadas da época de sedimentação. Isto pode causar modificações da resistência do solo por intemperismo tropical, com transformações mineralógicas (intemperismo químico), porém ainda insuficientes para modificação da estrutura original das camadas. Nas porções mais superficiais, onde o processo de intemperismo foi mais intenso (solos lateríticos), pode ocorrer total transformação com eliminação das camadas sedimentares e surgimento de pseudoestratificações pedogenéticas, levando ou não à produção de “bandas onduladas”. A posição de transição do solo laterítico para solo não-laterítico parece ser bem marcada, em alguns casos pela razão de atrito ( $R_f$ ) do ensaio de piezocone, como no Sítio São Carlos (Figuras 5.49 e 5.50) e Sítio Campinas (Figuras 5.67), e pela interpretação dos resultados dos ensaios sísmicos, conforme discussões seguintes.

Na identificação das superfícies de transição entre diferentes horizontes o resultado do ensaio de piezocone fornece boas respostas, especialmente abaixo do nível de água, quando é possível registrar  $u$  no sensor de poro-pressão, que pode contribuir efetivamente na identificação de interfaces entre camadas. Nesse caso, o uso do filtro de cavidade preenchido com graxa automotiva é um recurso interessante, pois a medida de  $u$  é executada sem a necessidade de pré-furos, usando recurso rápido e de baixo custo. A identificação da transição entre solos de comportamento laterítico e não-laterítico parece ser bem marcada nos resultados do ensaio de piezocone, especialmente em solos onde a composição da rocha de origem conduza à formação de minerais argilosos, enquanto que na sondagem de simples reconhecimento a separação não é possível, sendo estimada somente após ensaios de laboratório. Na identificação da superfície de transição entre solo e rocha, tanto o CPT quanto o SPT apresentam respostas muito imprecisas, sendo necessária a realização de sondagens rotativas para confirmação das características do “impenetrável”, verificação da ocorrência de blocos e caracterização de núcleos proeminentes de rocha, quando se justifica investigação de detalhe.

A sondagem de simples reconhecimento (SPT), por fornecer amostras e por avançar em maiores profundidades que o ensaio de penetração do cone (CPT), fornece melhores informações para as interpretações geológicas necessárias. Desta forma, em solos tropicais, a combinação entre CPT e SPT é muito adequada. O SPT fornece melhores informações para a interpretação geológica e o CPT, através de seus sensores e dispositivos associados (sísmico, resistividade, entre outros), minimiza os efeitos da variabilidade natural, por possibilitar a determinação de parâmetros distintos em uma mesma posição, levando a estabelecer correlações mais consistentes para estabelecimento de parâmetro de projeto mais consistentes.

#### **6.4 - Classificação dos materiais inconsolidados**

##### **6.4.1 Considerações Gerais**

As classificações de solos têm objetivo de fornecer informações sobre o comportamento nas fases preliminares de projeto e constitui uma ferramenta de diagnóstico geotécnico. Para obtenção de parâmetros mecânicos são necessários ensaios e correlações específicas que extrapolam o objetivo das classificações. Para Kotzias & Stamatopoulos (1999) as classificações podem revelar aspectos geotécnicos críticos a serem melhor avaliados posteriormente, pois frequentemente exibem superposições entre as classes. Nas classificações indiretas, como na proposta de Robertson et al. (1986), onde se avalia a resistência de ponta e a razão de atrito empregando ábacos, a ausência de amostras contribui com a incerteza, no entanto elas refletem efetivo comportamento mecânico do solo frente a penetração do piezocone, com erros de medidas aleatórias muito baixos (Jacksa et al., 1997; Fenton, 1999).

As classificações mais tradicionais, como a USCS e a HRB, se baseiam em resultados de ensaios classificatórios de laboratório, realizados em amostras deformadas, como análises de granulometria e de plasticidade, para definição das classes de solos. Estes ensaios provocam a destruição da estrutura original e foram desenvolvidos com base na experiência adquirida em solos sedimentares, onde o comportamento está ligado em grande parte à constituição granulométrica (solos grossos) e à plasticidade (solos finos). Na maioria das campanhas de investigação do subsolo, que utilizam a sondagem de simples reconhecimento, a classificação normalmente é tátil-visual, procurando agrupar os solos em uma das classificações convencionais. Esta classificação não reflete necessariamente o

comportamento e, desta forma, a previsão de comportamento através dela é incerta e imprecisa em função da interferência de fator subjetivo no processo, exigindo grande experiência e critério do mestre sondador.

As classificações baseadas em resultados de ensaios de cone ou piezocone dependem da resposta do solo à penetração da ponteira, que é registrada nos sensores do instrumento refletindo, desta forma, o comportamento do solo frente a penetração do piezocone. A estrutura das principais classificações utiliza a resistência de ponta ( $q_c$ ) e a razão de atrito ( $f_s/q_c \times 100$ ), plotadas em gráfico que, a partir de calibrações com resultados de ensaios de laboratório, permitiram a construção de ábacos de classificação de comportamento de solos como os de Robertson et al. (1986), Doulgas & Olsen (1981) entre outros. Segundo Fellenius & Eslami (2000), os ábacos com essa estrutura não são recomendáveis, pois a mesma variável  $f_s$  é plotada nos dois eixos, tornando-os tendenciosos. Estes autores resgataram, desta forma, a estrutura do ábaco original proposta por Beggemann (1965), utilizando os parâmetros  $q_c$  (ou  $q_e$ ) e  $f_s$ . Estas duas estruturas de ábacos foram extensivamente testadas em ensaios de piezocone realizados nos sítios estudados nessa pesquisa onde ocorrem diversos tipos de solo. Constatou-se que a proposta de Robertson et al. (1986) propiciou melhor distribuição e separação das classes de solo, tendo por isso sido a escolhida para utilização neste trabalho. Estes mesmos autores mostraram que todas as classificações que utilizam resultados de ensaios de cone são semelhantes no sentido de que solos arenosos apresentam  $q_c$  alto e  $f_s$  baixo e solos argilosos apresentam  $q_c$  baixo e  $f_s$  alto. Isto reflete os comportamentos de cada um destes materiais em relação ao atrito e à resistência de ponta. Deve-se destacar que, os princípios da mecânica de solos foram tradicionalmente desenvolvidos para estas situações extremas, de solos arenosos, de comportamento drenado e de solos argilosos, de comportamento não-drenado. Porém, na natureza, existem poucas situações em que os solos atendem estas condições, sendo mais freqüente a ocorrência de misturas das várias frações, onde a penetração do piezocone é parcialmente drenada e o comportamento do solo dependerá da maneira que ele será solicitado. Por este motivo, as classes de solo definidas através de situações ideais, devem apresentar superposição nas situações naturais, produzindo desta forma incertezas na classificação. Ciente deste aspecto, Zhang & Tumay (1999) propuseram classificação probabilística dos resultados dos ensaios de CPT, com base na lógica fuzzy, que torna clara esta incerteza, sendo portanto muito útil na interpretação dos resultados de ensaios CPT.

#### 6.4.2 Sedimentos quaternários de planícies litorâneas

As características destes sedimentos estão ligadas diretamente ao ambiente de sedimentação e ocorre sensível correspondência entre as classificações granulométricas a partir de amostragens e aquelas obtidas a partir dos ensaios de piezocone, corroborando aspecto já amplamente divulgado na literatura, e muito semelhante a experiência em solos sedimentares de climas temperados da Europa e EUA. A Figura 6.4 mostra a distribuição, no ábaco de classificação de Robertson et al. (1986), dos solos sedimentares litorâneos do Sítio Guarujá, indica que o ábaco registra diferentes posições para as camadas que apresentam diferentes composições, separando de forma coerente os sedimentos de constituição arenosa dos de constituição argilo-siltosa.

A separação entre as classes torna-se evidente quando estão representados sedimentos característicos de ambientes com certa homogeneidade de energia de deposição, durante tempo suficiente para produzir camada identificável em ensaios de perfilagem. Os sedimentos arenosos, de praias e frentes de praias, tendem a apresentar esta homogeneidade e a resposta do ensaio de piezocone é esclarecedora. Os sedimentos mais finos normalmente apresentam uma composição argilo-siltosa, com fração de areia fina persistente, que não exibem necessariamente camadas individualizadas em meio aos solos finos. Isto é característico de ambientes de deposição aquático, em baías fechadas, onde a energia do meio é variável e resulta nesta mistura de frações, com distribuição bem caracterizada nos ábacos de classificação, como exemplificado na Figura 6.4 utilizando a proposta de Robertson et al. (1986). Estas situações devem ser diferenciadas daquelas onde ocorre uma fina intercalação entre sedimentos silto-argilosos e areia. Essas finas intercalações ocorrem em ambientes como o de planície de maré, onde os ciclos de deposição areia-argila estão vinculados aos ciclos da marés enchentes e vazantes ou em planícies de inundação fluvial ligados às fases de enchentes e vazantes de rios. Estes ambientes são influenciados pelas mudanças do nível do mar, onde os ciclos de avanços e regressões têm intensidades crescentes, até predominar a característica de deposição de novo ambiente.

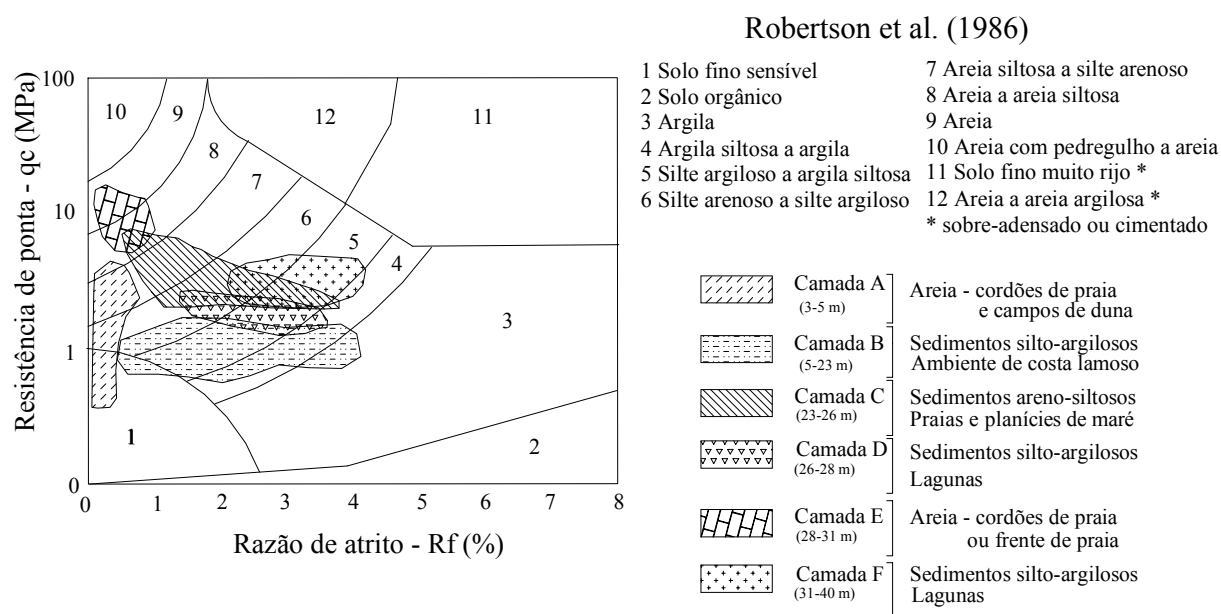


Figura 6.4 Classificação dos sedimentos litorâneos quaternários do Sítio Guarujá, com base nos resultados de ensaios de piezocone, segundo a proposta de Robertson et al. (1986).

Esta situação pode ser observada no resultado do ensaio de RCPTU-4 no Sítio Paranaguá, Figura 5.31, na profundidade entre 23 e 26 m, nos registros de  $R_f$  e de  $u$ . Conforme destacado na Figura 6.5, abaixo de 26 m de profundidade ocorrem sedimentos francamente arenosos, entre 26 e 23 m ocorre alternância de sedimentos arenosos e argilo-siltosos, e entre 23 e 13 m ocorrem sedimentos argilo-siltosos. Esta situação é identificada a partir dos resultados dos ensaios de piezocone, interpretados com base na história geológica, porém normalmente não podem ser detectadas a partir dos resultados das sondagens de simples reconhecimento.

Desta forma, os resultados de ensaios de piezocone interpretados neste trabalho mostram que a metodologia tradicional pode ser aplicada para classificar solos sedimentares quaternários, mas fornecem informações muito coerentes, desde que acompanhados de interpretação da história geológica e de conhecimento prévio dos ambientes de sedimentação responsáveis pela deposição.



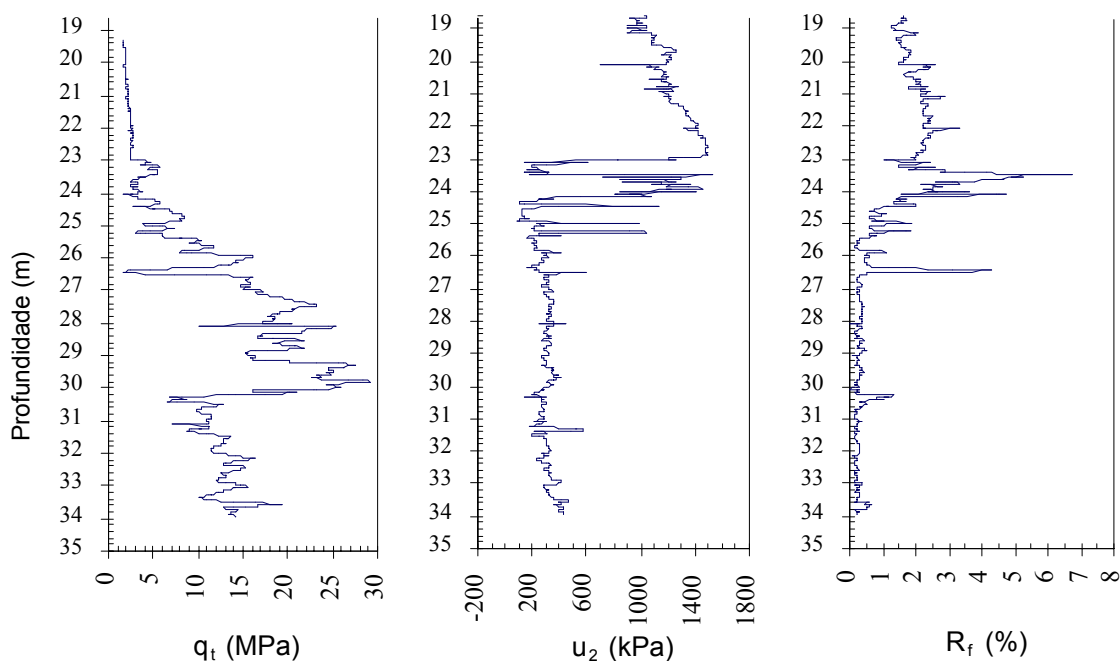


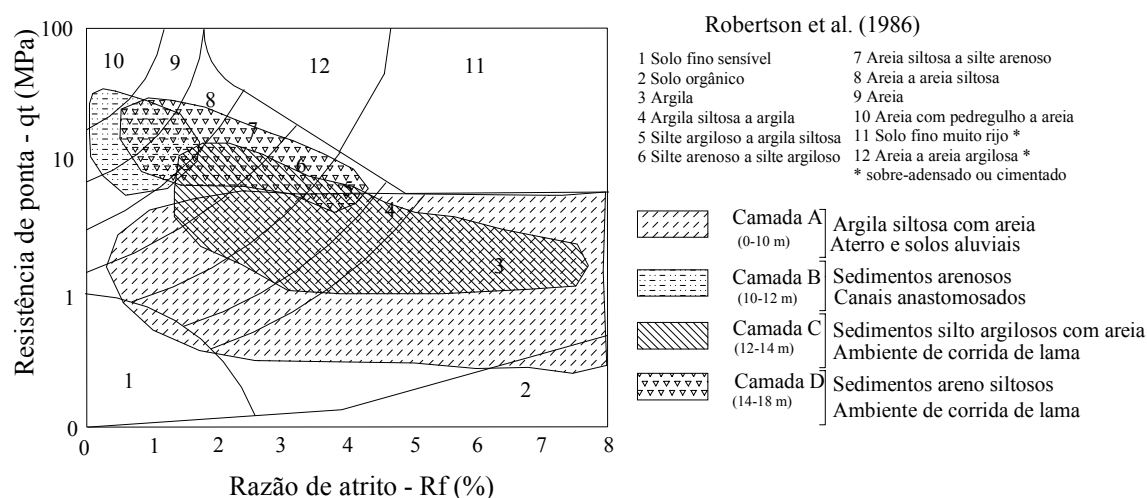
Figura 6.5 – Resultado do ensaio de piezocone RCPTU-4 no Sítio Paranaguá, com destaque para o intervalo entre 23 e 26 m de profundidade, onde os valores de  $F_r$ ,  $u$  e  $q_c$ , indicam alternâncias de camadas

#### 6.4.3 Sedimentos cenozóicos de bacias tafrogênicas

Os sedimentos cenozóicos de bacias tafrogênicas representam materiais inconsolidados, com forte pré-adensamento, atualmente submetidos a processo de erosão. Os dois locais investigados representam porções distintas da bacia, resultado de diferentes subambientes de sedimentação. No Sítio Curitiba predominam sedimentos argilo-siltosos com areia, representando as porções intermediárias ou distais de leques aluviais, com baixa seleção e freqüente exposição ao sol, que resultou em ressecção. No Sítio São Paulo, verifica-se uma intercalação mais freqüente de camadas com distintas composições, porém também com baixa seleção. Os níveis arenosos têm baixa seleção e percentagem de silte elevada. Os níveis argiloso-siltosos contém pequena percentagem de areia fina, também com baixa seleção granulométrica. A maior alternância de camadas do Sítio São Paulo pode estar ligada a uma tectônica sin-deposicional mais intensa ou mesmo a uma maior proximidade da área fonte, quando comparadas às do Sítio Curitiba. Estas características se

refletem nas várias classificações e devem ser consideradas na interpretação dos resultados dos ensaios.

Na Figura 6.6 é apresentado ábaco que mostra a distribuição dos resultados dos ensaios de piezocone realizados em sedimentos cenozóicos do Sítio São Paulo, separando-os aproximadamente por classes texturais e com indicações dos prováveis ambientes de formação. Em função da baixa seleção dos sedimentos produzida pelo tipo de ambiente de deposição, não existe separação clara das classes, excetuando-se as camadas mais arenosas



do Sítio São Paulo.

Figura 6.6 Classificação dos sedimentos cenozóicos do Sítio São Paulo, com base nos resultados de ensaios de piezocone, segundo a proposta de Robertson et al. (1986).

Na Figura 5.6 observa-se que o emprego da classificação de Robertson et al. (1986) não reflete as percentagens de areia fina, e não diferencia a argila siltosa e o silte argiloso. Nesta mesma figura, quando são comparadas diferentes classificações verificam-se diferenças importantes. Entre 10 e 11 m de profundidade ensaios de laboratório indicam a ocorrência de uma areia argilosa com silte e a classificação táctil-visual a partir da sondagem de simples reconhecimento indica um silte argiloso com areia fina. Já, o resultado do ensaio de piezocone não indica esta característica. Isto deve estar ligado à diferença de precisão dos ensaios, coletas de amostras descontínuas, ou mesmo à presença de imersa nas argilas-siltosas, onde o comportamento, e conseqüente registros no ensaio de piezocone, podem estar sendo controlados pela fração fina do solo. Estas diferenças entre resultados de classificações de solo refletem diferenças de precisão entre os ensaios e contribuem com as incertezas nas classificações e estimativas de parâmetros dos solos. Neste sentido a classificação probabilística, com base na aplicação da lógica fuzzy aos

resultados do ensaio de piezocone, de Zhang & Tumay (1999), parece refletir de uma forma mais clara estas incertezas, e na figura analisada mostra claramente que existe predominância de comportamento de argila, porém com probabilidades consideráveis de ocorrência da fração silte e areia. Esta classificação é um recurso interessante para orientar estudos complementares, como ensaios de laboratório ou caracterização mais detalhada do perfil. Nas Figuras 5.21, 5.22 e 5.23, observa-se uma melhor separação das camadas e, principalmente naquelas arenosas, as diversas classificações mostram-se coerentes. Nas camadas argilosas permanecem incertezas elevadas, refletidas de forma clara na classificação probabilística.

Com base nos dados apresentados e analisados considera-se que os resultados dos ensaios de piezocone fornecem uma classificação aproximada dos solos provenientes dos sedimentos cenozóicos, sendo que os princípios básicos que controlam o comportamento dos sedimentos frente aos sensores do piezocone são mantidos e as classificações são coerentes, porém mostram incertezas, com superposição de classes semelhantes às demais classificações.

#### 6.4.4 Solos tropicais

Os solos tropicais aqui estudados abrangem basicamente dois tipos. O primeiro é constituído por sedimentos com vários graus de diagênese, estrutura em camadas, cujas constituições foram definidas nos ambientes de sedimentação, sendo posteriormente submetidas ao processo de intemperismo. O segundo é composto por solos formados sobre rochas cristalinas (diabásio e basalto aqui estudados, além de granitos e gnaiss, não abordados neste estudo) com estrutura maciça ou em camadas, fraturados, dobrados e posteriormente submetidos ao intemperismo tropical. Em função da história geológica distinta, desenvolvem perfis com diferentes características. Os solos tropicais apresentam grande variabilidade devido aos diferentes graus de alteração e inviabiliza o uso do conceito de camada utilizado em sedimentos. Este fato é verdadeiro, principalmente em solos provenientes da alteração de rochas cristalinas, porém pode ocorrer em qualquer tipo de solo tropical, dificultando a comparação entre resultados de diferentes tipos de ensaios. Pode também ocorrer em solos pedogeneticamente maduros, pois sua formação está ligada

à migração vertical de água e ao grau de evolução pedogenética, que podem produzir resultados diferentes, mesmo em locais próximos. A morfologia dos terrenos pode orientar estas análises, pois a evolução da pedogênese depende da forma do terreno, formando corpos com forma e composição variáveis em função das posições nas vertentes.

O processo de intemperismo tropical produz dois tipos de transformações principais, que podem alterar a composição dos materiais inconsolidados. A primeira é um processo mais superficial, com a iluviação de minerais argilosos e concentração de óxidos e hidróxidos que cimentam e agregam as partículas. Nas condições naturais estes solos apresentam estrutura porosa, alta permeabilidade e potencial de colapso elevado, com textura aparente de areia. Em laboratório os resultados dos ensaios de classificação variam em função da intensidade da desagregação das partículas. Nestas situações solos argilosos podem mostrar comportamento de areia. Este fato pode ser identificado nas Figuras 5.67, do Sítio Campinas e Figuras 5.79 e 5.80, do Sítio Londrina até profundidades de 6 a 8 m, onde solos classificados em laboratório como argila, são indicados no resultado dos ensaios CPT como arenoso-siltosos. Isto é explicado pelo aumento da resistência de ponta devido à cimentação (Lune et al., 1997) o que produz razão de atrito baixa e comportamento equivalente a solos arenosos e siltosos. Este aspecto também ocorre nos demais sítios onde se têm solos tropicais estudados, porém é marcante nos solos desenvolvidos a partir de diabásio e basalto. Segundo a abordagem aqui seguida a característica descrita acima pode ser utilizada como tendência do potencial de colapso e da profundidade máxima em que este fenômeno pode se manifestar, pois nesses sítios investigados esta profundidade coincide com a transição de solo laterítico para solo não-laterítico, identificada pelos ensaios de classificação MCT. Nos solos do Sítio São Carlos esta feição não é tão evidente devido à composição dos materiais, e no Sítio Bauru a transição de solos lateríticos para não-lateríticos fica evidente com base apenas nos resultados dos ensaios de piezocone, porém as diferenças de graus de cimentação são bem maiores. Nas Figuras 5.87 e 5.88, do Sítio Bauru é interessante observar que o resultado do ensaio de piezocone mostra, que a partir de 12 m de profundidade são identificados estratos de origem sedimentar, ligados à época de deposição dos sedimentos. No trecho entre 0 e 12 m de profundidade estas camadas não existem ou não são identificadas no ensaio. Duas hipóteses podem explicar a ausência de acamamento, isto é, poderiam ser solos pedogeneticamente muito maduros ou depósitos coluviais. Estes últimos seriam típicos de praticamente todo interior do Estado de São Paulo, conforme mostrado por Mello (1995). Considerando que os processos de intemperismo tropical tendem a

desenvolver interfaces graduais, e que a interface identificada acima é brusca, considera-se aqui que estes materiais inconsolidados são em parte produtos de processos de colúviação, com contribuição expressiva da pedogênese, processos estes que podem ser simultâneos.

A segunda transformação, comumente detectada nos solos tropicais, é a concentração de argila em horizonte mais profundo, que constitui a unidade pedológica denominada de horizonte B. Com base neste aspecto procurou-se avaliar algumas das particularidades mostradas pelas classificações utilizadas. Nas figuras 5.49 e 5.50, do Sítio São Carlos, particularmente no intervalo de 8 a 12 m de profundidade, foi identificado contraste entre os resultados das classificações. Conforme ensaios de laboratório e sondagens de simples reconhecimento os solos são identificados como areia, com fração fina (silte + argila) de até 39%. As classificações com base no resultado de ensaios de piezocone mostram comportamento típico de argila e, considerando que o princípio básico de classificação pelo piezocone não se modifica, esta característica deve estar ligada a história geológica do perfil. A hipótese de que neste local ocorra solo com maior concentração da argila, não foi confirmada pelos resultados dos ensaios de laboratório e não foram realizados estudos pedológicos específicos. É possível que os minerais de argila estejam capeando as partículas ou agregados de areia. Desta forma, poderiam controlar o comportamento e justificar a resposta do piezocone nesse solo, conforme retratado nos sistemas de classificação com base nos resultados do ensaio de piezocone. Outro aspecto que se manifesta de forma clara nas classificações a partir dos resultados de ensaios de piezocone dos solos tropicais estudados, principalmente entre 8 e 15 m de profundidade, dos vários sítios, é a concentração de pontos na porção direita dos ábacos, indicando razões de atrito elevadas, frequentemente acima de 10%, o que normalmente não ocorre em sedimentos quaternários ou terciários. A complexidade destes perfis pode também estar vinculada aos diversos ciclos de erosão, sedimentação e pedogênese, que quando interpretado com base nos três pediplanos identificados por Bigarella et al. (1965), mostra que devem ter ocorrido superposição de processos que resultaram na complexidade dos perfis dos solos tropicais das regiões aqui estudadas.

Na Figura 6.4 é mostrada a classificação dos solos com base nos resultados dos ensaios de piezocone realizados em solos provenientes da alteração dos diabásios do Sítio Campinas. As transformações produzidas pelo intemperismo tropical sobre os produtos de alteração de basaltos e diabásios se manifestam nos sistemas de classificação com base em resultados de ensaios de piezocone, mostrando posições distintas em função do estágio de evolução e posição no perfil.

As fontes de incerteza no resultado e na interpretação dos ensaios podem ter diversas contribuições. Nos solos tropicais, a variabilidade dos materiais inconsolidados pode somar-se às incertezas e erros dos ensaios dificultando a identificação do perfil, incluindo suas superfícies de transição e as classificações dos solos. Considerando a classificação textural dos solos nas sondagens de simples reconhecimento do Sítio São Carlos, a Figura 6.5 mostra sondagens contíguas realizadas por diferentes empresas. As transições e unidades principais coincidem, porém o nível de detalhamento é distinto e deve estar relacionado à fidelidade dos ensaios e da descrição das amostras.

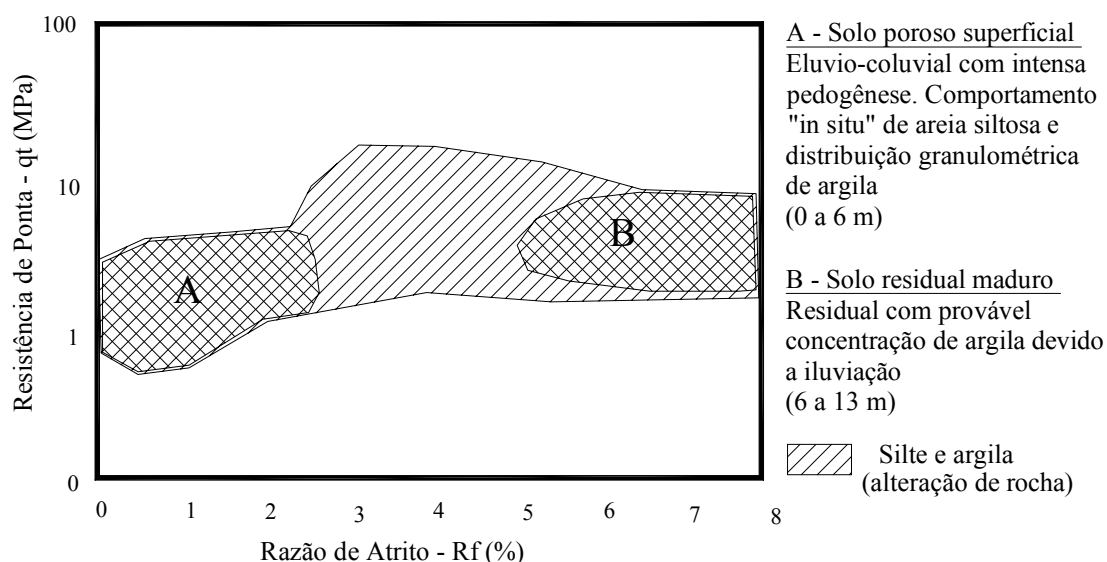


Figura 6.4 Classificação dos solos tropicais do Sítio Campinas (SP), estudados nesta pesquisa, com base nos resultados de ensaios de piezocone, plotados em ábaco com estrutura similar a de Robertson et al. (1986).

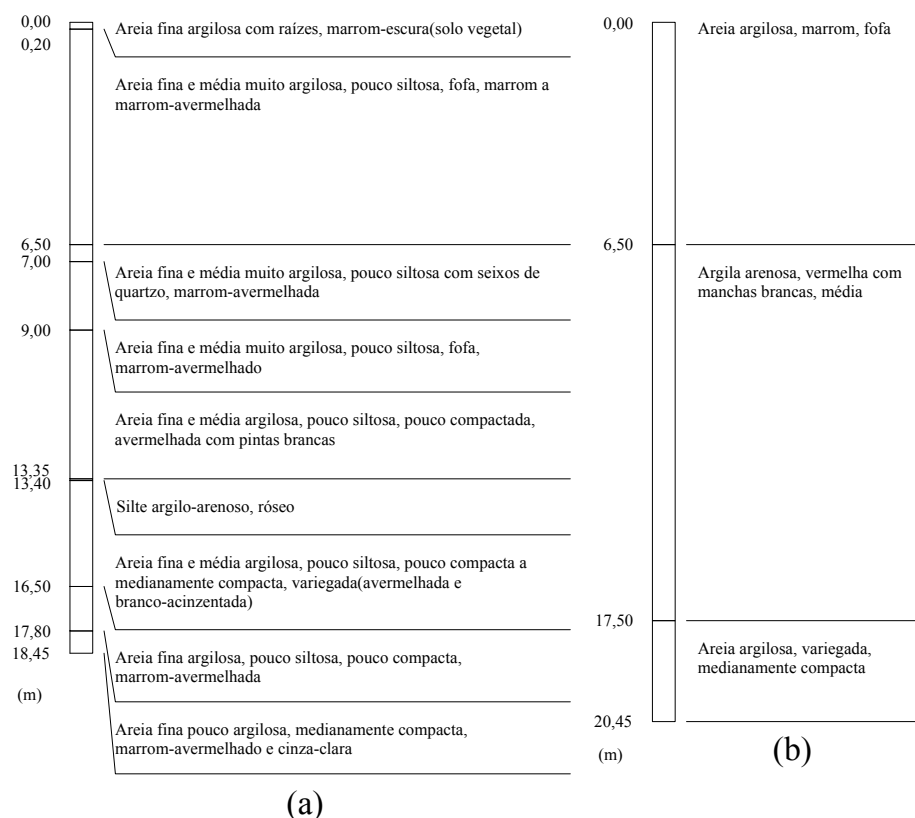


Figura 6.5 – Perfis obtidos a partir de resultados de sondagens a percussão distintos (a) SPTT-01 e (b) SPT-03, com distância entre sondagens de aproximadamente 3 m, no Sítio São Carlos (SP).

Nas descrições das sondagens de simples reconhecimento no Sítio Campinas (SP), são mostradas na Figura 6.6, onde se observam duas sondagens contíguas, realizadas pela mesma empresa, onde as posições das transições e classificações diferem sensivelmente, devendo estar vinculadas às variabilidades naturais dos solos função dos diferentes graus de intemperismo. Estas duas fontes de incerteza podem somar-se e dificultar a interpretação e integração dos resultados dos ensaios. As avaliações feitas a partir dos ensaios de piezocone reduzem sensivelmente a incerteza devido à maior padronização e menor interferência do operador no resultado do ensaio.

Com base nos resultados de piezocone apresentados e discutidos para os sítios onde ocorrem solos tropicais é possível agrupar os solos desenvolvidos e classificá-los num ábaco de  $q_c$  versus  $R_f$ , conforme mostrado na Figura 6.7. Esta classificação é indicativa e pode ser empregada como uma ferramenta de orientação que deve ser calibrada para emprego em outros locais onde ocorram solos tropicais

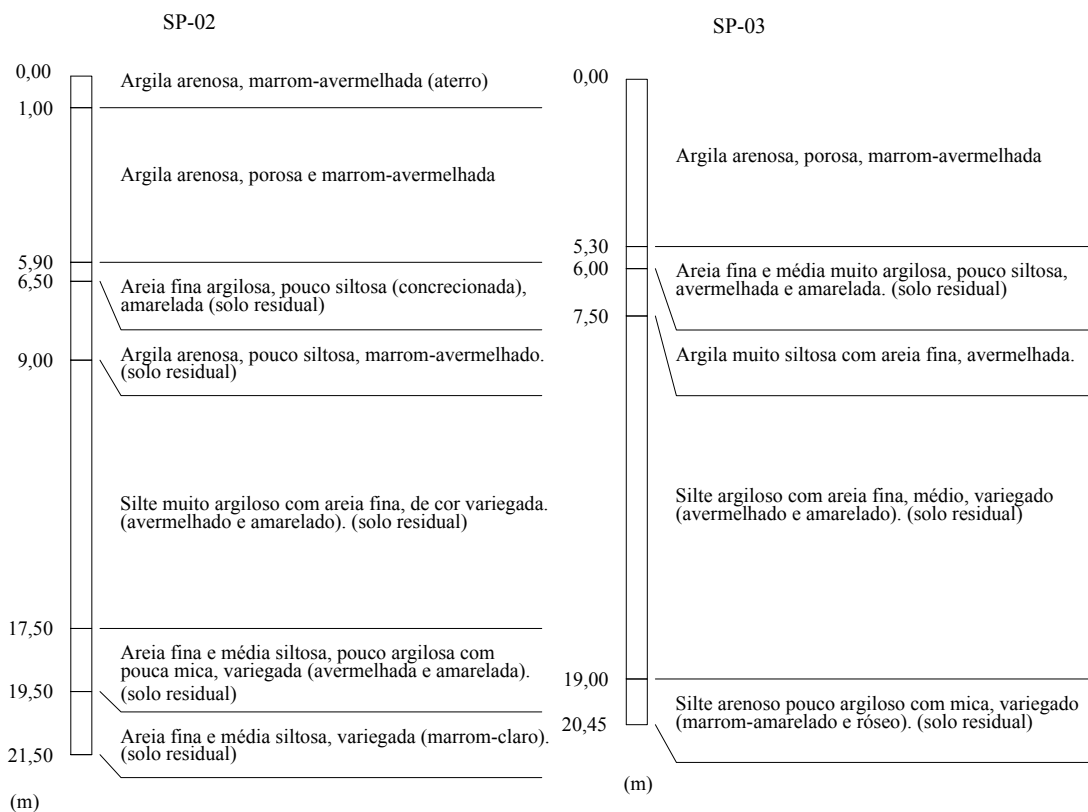


Figura 6.6 – Comparação entre a classificação táctil-visual, a partir de sondagens de simples reconhecimento, distantes uma da outra cerca de 7 m (SP-2 e SP-3), no Sítio Campinas

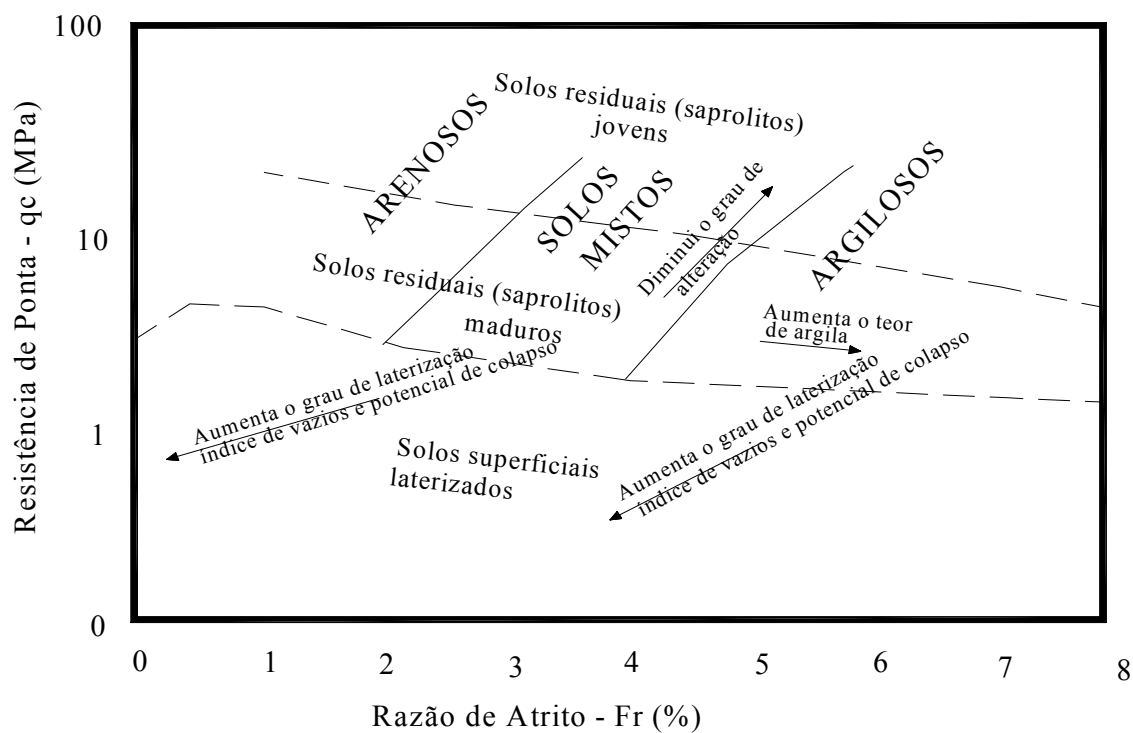


Figura 6.7 – Proposta de estrutura para orientar a classificação de solos tropicais a partir dos resultados de ensaios de piezocone realizados nos sítios investigados.



### **6.5 – Integração das informações**

A integração entre as informações provenientes das interpretações geológicas, identificação das superfícies de transição e classificação dos materiais permite a confecção de um modelo de distribuição espacial dos materiais que pode ser apresentado na forma bidimensional (mapa e seção) ou em modelos tridimensionais, principalmente quando as análises e apresentações por meios digitais. Após adequadamente entendido o modelo geológico da área investigada, as análises passam a focar a variabilidade dos diversos materiais e a compartimentação geotécnica ou geoambiental mais apropriada para o projeto em questão, objetivando a seleção de parâmetros de projeto.

A maioria das informações é obtida através de ensaios ou sondagens que representam informações pontuais. É nesta etapa de integração que o adequado entendimento da história geológica pode contribuir para um melhor conhecimento do maciço de solo. Quando estão disponíveis informações de levantamentos geofísicos de superfície, podem ser obtidas prováveis geometrias das unidades, facilitando, desta forma, a interpretação dos dados pontuais. Isto pode ser constatado na interpretação das medidas de resistividade realizadas no Sítio Paranaguá, conforme mostrado na Figura 5. Em projetos em que a área ocupada é restrita, a tendência do projetista é considerar as condições de geologia homogêneas, de modo que a integração é feita pela simples ligação entre sondagens, utilizando o conceito de camadas horizontais. Quando os projetos envolvem áreas maiores, como em rodovias, em dutos ou mesmo em grandes empreendimentos industriais, a possibilidade de ocorrência de heterogeneidades geológicas cresce substancialmente e o adequado entendimento da geometria das diversas unidades passa a ser mais complexa. Na fase de planejamento dos empreendimentos este adequado entendimento permite a seleção de posições mais favoráveis, que representem menores riscos ou custos de implantação. No entanto, é importante considerar que, mesmo em áreas restritas, as variações controladas pelos processos geológicos podem ser consideráveis.

Nos terrenos de origem sedimentar as variações estão ligadas às mudanças nos processos sedimentares e nas constituições e distribuições dos sedimentos. No Sítio Paranaguá (PR), os resultados de quatro ensaios de piezocone de resistividade, estrategicamente posicionados na área, permitiu a construção de uma seção mostrando a distribuição dos sedimentos. A Figura 6.8 mostra uma seção onde se observa a distribuição

dos sedimentos na forma de camadas, cuja deposição foi condicionada pelas flutuações do nível médio dos mares, ocorridas durante o período Quaternário. Existe uma persistência lateral considerável das camadas de areia e de argila-siltosa contudo, são também freqüentes lentes arenosas em meio ao material argilo-siltoso impondo elevado grau de heterogeneidade ao maciço. A compartimentação em camadas permitiu o adequado entendimento da geometria dos depósitos, subsidiando de forma objetiva a análise da contaminação do aquífero por água salgada. Apesar da relativa simplicidade do modelo, foi identificada, em imagem de satélite, a presença de um falhamento de escala regional, que além de controlar o fluxo da água subterrânea, adiciona um componente de incerteza na avaliação da geometria dos estratos.

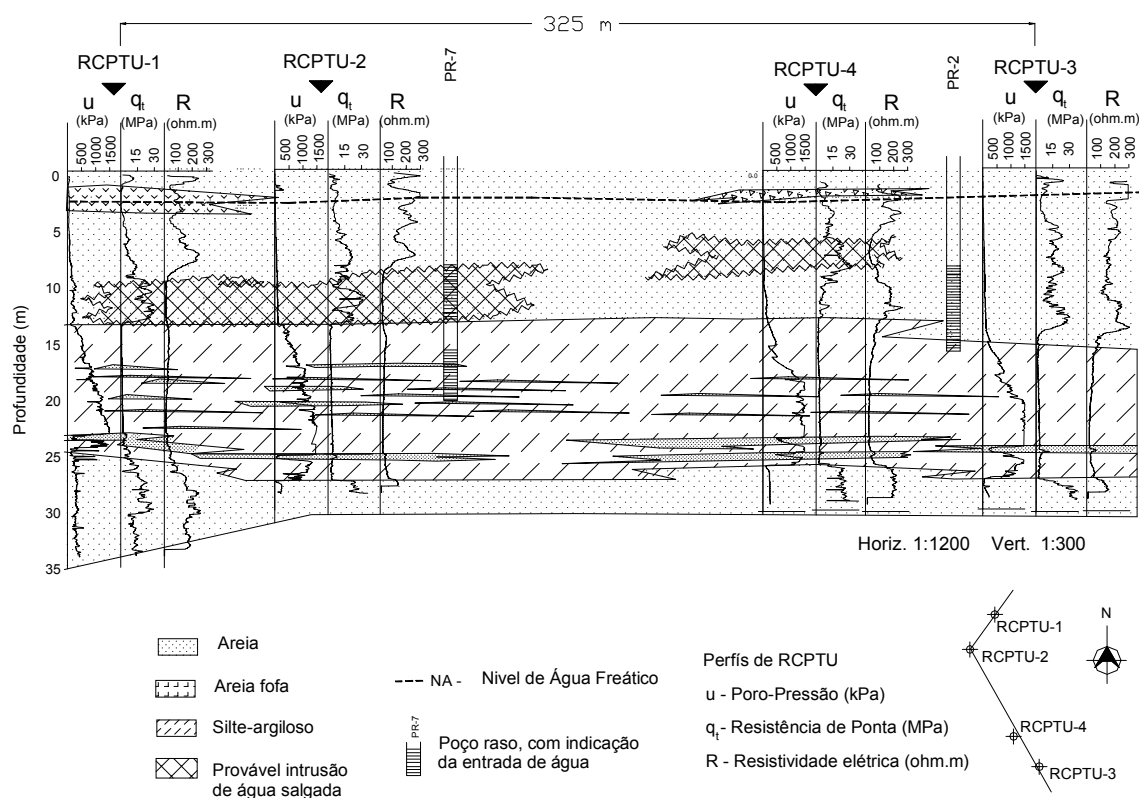


Figura 6.8 Interpretação de perfil estratigráfico, com base nos ensaios de piezocone de resistividade e indicação dos prováveis locais onde ocorre contaminação por água salgada no aquífero superficial. Sítio Paranaguá

Os resultados dos ensaios realizados no Sítio Curitiba (PR), instalado sobre sedimentos cenozóicos, mostrou que a compreensão da história geológica e dos processos de morfogênese interfere na definição da geometria local dos diversos materiais. A

interpretação adequada dos ensaios pontuais só foi possível com o entendimento da geologia e geomorfologia do entorno do Sítio São Carlos (SP), conforme mostrado nas Figuras 5.46 e 5.47, onde estão indicadas a interpretação da distribuição dos solos em planta e em seção.

Nos sedimentos cenozóicos do Sítio São Paulo (SP), o resultado de cinco ensaios de piezocone cobrindo uma distância de cerca de 80 m e perfeitamente alinhados, permitem avaliar as variações na distribuição dos sedimentos em escala de detalhe. O perfil daquele local (Figura 6.9) mostra acamamento marcante, com alternância de materiais com diferentes composições.

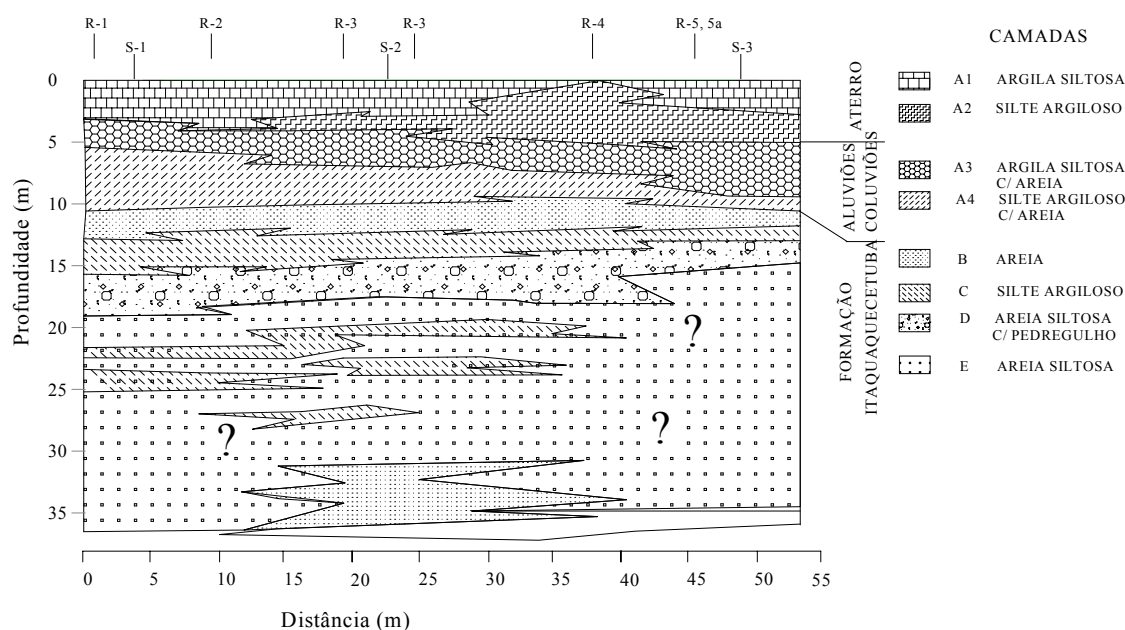


Figura 6.9 Seção estratigráfica integrando todos os pontos de investigação indicados na Figura 5.14 e interpretada com base nos resultados das sondagens, ensaios de piezocone e interpretação geológica do Sítio São Paulo (SP).

A homogeneidade nos valores registrados pelo piezocone, como o  $q_c$ , ao longo de uma mesma camada no Sítio São Paulo (SP), é marcante conforme mostrado na Figura 5.24. Mesmo neste contexto, o piezocone foi sensível às variações de espessura e profundidade das camadas, registrando feições desenvolvidas durante a sedimentação. Nestes sedimentos o piezocone parece ser uma ferramenta muito útil para identificar pequenas camadas e lentes, e a necessidade de registrá-las ou não na interpretação do perfil geotécnico é função do tipo de projeto em questão. Investigações geoambientais, onde o interesse é avaliar a migração de contaminantes no subsolo podem requerer grande detalhamento das subcamadas, enquanto que no dimensionamento de fundações essas subcamadas podem muitas vezes ser desprezadas.

Na integração das informações, em locais onde a contribuição de processos pedogenéticos é efetiva na formação do perfil, a identificação da geometria dos diversos materiais passa a ser extremamente complexa. Nos perfis desenvolvidos sobre rochas cristalinas, como os diabásios e basaltos dos Sítios Campinas e Londrina, a geometria dos diferentes tipos de materiais é controlada pelas frentes de intemperismo que atuaram na transformação dos minerais, principalmente feldspatos e piroxênios, em minerais de argilas. Estas frentes são controladas predominantemente pelo padrão de fraturamento da rocha original, podendo apresentar geometrias diversas. No entorno do Sítio São Carlos evidencia-se que a transição entre solo e rocha pode ser complexa, conforme mostrado na Foto 5.1, onde ocorre a intercalação de solo em rocha sã, ambas na posição sub-horizontal. Isto provavelmente está ligado à estrutura original dos basaltos, onde supõe-se que podem ocorrer derrames com diferentes composições ou mesmo provável pedogênese, função do intervalo de tempo entre derrames, ressaltadas pelo processo de intemperismo atual. Nos diabásios do Sítio Campinas, conforme mostrado na Foto 5.3, no interior do maciço de solo são freqüentes blocos rochosos pouco alterados distribuídos aleatoriamente, que representam núcleos de porções mais frescas do maciço rochoso definidas por fraturas e pouco intemperizadas. A presença desses blocos é previsível tanto nos basaltos como diabásios, e representa uma complicação adicional na investigação, projeto e execução de obras civis. Nas fases de investigação, podem falsear a profundidade do impenetrável e dificultar a definição da superfície do maciço considerada indeformável. Nas fases de projeto dificultam a aplicação de correlações entre resultados de ensaios e parâmetros mecânicos dos solos, mesmo aqueles muito próximos e realizados na mesma cota. Nas fases de execução de obras podem tornar imprevisíveis os trabalhos de escavação, dificultar a cravação ou danificar estacas, muitas vezes exigindo soluções mais complexas e de custos mais elevados.

Nos perfis de solos tropicais a utilização do conceito tradicional de camadas deve ser evitada ou, no mínimo, utilizada com cuidado sabendo das limitações desta simplificação, pois pode induzir a interpretações errôneas. No entanto, processos de pedogênese muito avançados produzem os solos lateríticos e porosos que se concentram nas porções mais superficiais do terreno, em pseudocamadas. A origem destes materiais muitas vezes é incerta, podendo representar solos eluviais ou coluviais, onde sendo que a distribuição em planta e as espessuras estão muitas vezes condicionadas à morfologia do terreno, devendo este aspecto ser abordado na investigação desse tipo de solo. Nos perfis onde são somadas as contribuições de processos sedimentares e pedogenéticos, como os do

Sítio Bauru, a complexidade na interpretação estratigráfica pode ser ainda maior, conforme demonstrado no perfil apresentado na Figura 5.86.

### **6.6 Análises estatísticas das variabilidades**

As análises estatísticas das variabilidades tem objetivo de quantificação das incertezas nos parâmetros de projetos geotécnicos e geoambientais e nas definições dos coeficientes de segurança baseados em probabilidade.

Na etapa de investigação o adequado entendimento da variabilidade natural é fundamental para compartimentar o maciço e para selecionar parâmetros que permitam correlações. Os ensaios de piezocone fornecem muitos dados que permitem análises geoestatísticas consistentes. A característica unidirecional dos resultados é complementada pela interpretação da história geológica de formação do perfil. Os erros menores que 5 %, segundo Jaksa et al. (1997), aliados a baixa interferência humana, o registro simultâneo de vários parâmetros, a elevada reprodutibilidade e a perfilagem contínua, devido a alta frequência de aquisição, qualificam o piezocone como uma ferramenta apropriada para analisar a variabilidade natural de solos.

Os resultados dos ensaios de piezocone permitem analisar variabilidades pela dispersão dos pontos em gráfico  $q_c$  versus  $R_f$ . As variabilidades também podem ser analisadas pela inspeção visual dos gráficos de  $q_c$ ,  $f_s$ ,  $R_f$  e  $u$  versus profundidade. Na Figura 6.10 são apresentados resultados de ensaios de piezocone, destacando a menor variabilidade na camada arenosa entre 10 e 12 m e a maior variabilidade no intervalo de 18 a 26 m de profundidade. A inspeção detalhada dos valores de  $q_c$  e  $R_f$  mostra que a heterogeneidade, neste último intervalo, é função da presença de camadas com pequenas espessuras (1 a 2 m). Nestas situações a interpretação dos resultados dos ensaios de piezocone permite o detalhamento das sub-camadas, que muitas vezes são indistintas em sondagens de simples reconhecimento, devido a baixa resolução deste método de investigação.

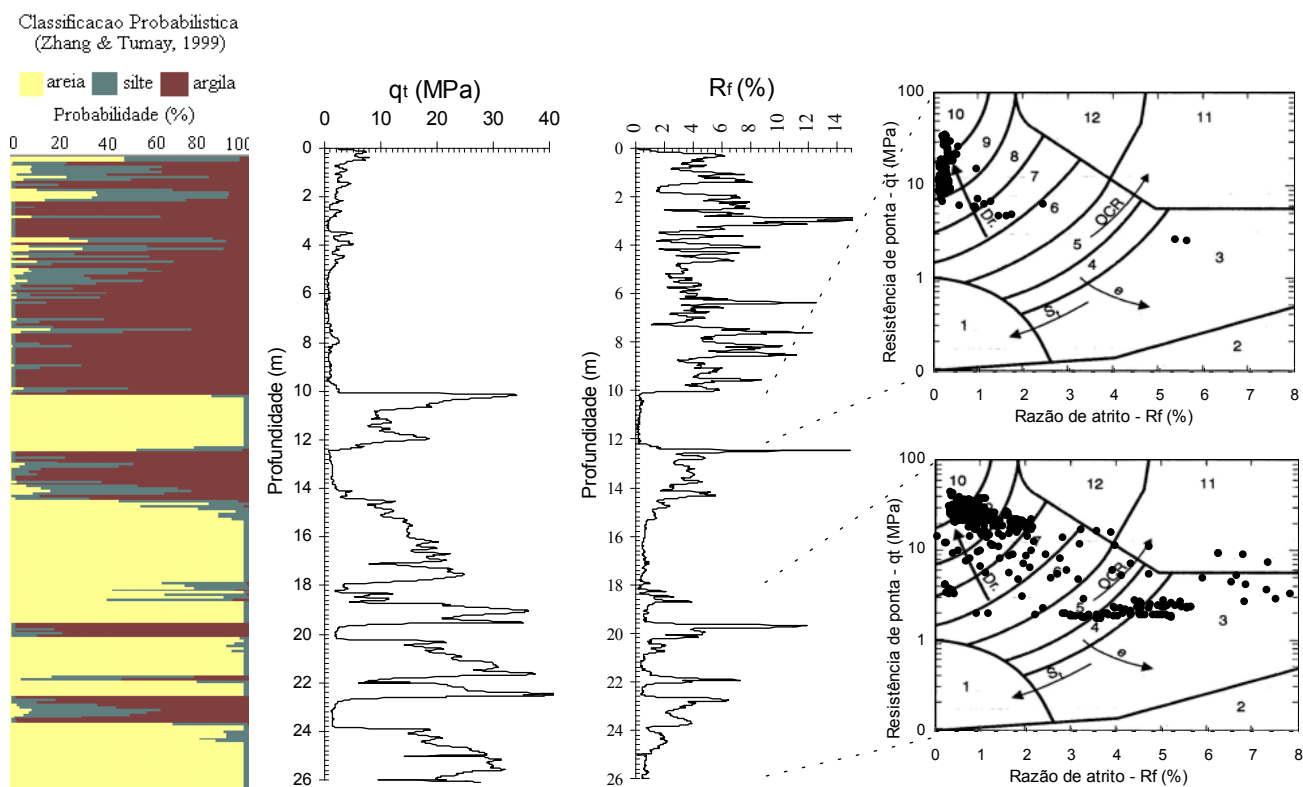


Figura 6.10 – Classificação dos resultados de ensaios de piezocone, com destaque para os intervalos de 10 a 12 e 18 a 26 m de profundidade, mostrando a dispersão dos pontos no gráfico  $q_c$  versus  $R_f$  e a classificação segundo Zhang & Tumay (1999), ensaio R-3 do Sítio São Paulo (SP).

A proposta de Zhang & Tumay (1999), onde os resultados de  $q_c$  e  $f_s$  são tratados com base na lógica *fuzzy* e os resultados são fornecidos na forma de probabilidades de ocorrência das frações areia, silte e argila, refletem também as incertezas na classificação dos solos. Nesta abordagem a presença da fração *silte* indica regiões de maior incerteza na classificação, de transições entre camadas ou de solos com comportamentos particulares, que podem requerer análises específicas. Observa-se, na Figura 6.10, que a classificação de Zhang & Tumay (1999) indica probabilidade de 100% para classificação do solo como areia no intervalo entre 10 e 12 m de profundidade, evidenciando baixa variabilidade desta camada. No intervalo de 18 a 26 m de profundidade a classificação indica a presença de camadas delgadas de solos argilosos em meio a solos arenosos, destacando a presença das intercalações e indicando maior variabilidade na classificação dos tipos de solo.

A compartimentação do perfil de solo a partir dos ensaios de piezocone permite uma clara separação entre solos que apresentam comportamentos distintos frente à penetração do piezocone, refletindo diferentes propriedades mecânicas, de deformação e de permeabilidade. Diversos parâmetros de projeto são obtidos a partir de correlações com os

valores de  $q_c$  e  $R_f$ , desta forma as análises estatísticas de variabilidade foram desenvolvidas com base nos registros de  $q_c$ .

Os perfis de cada ensaio de piezocone foram subdivididos com base em medidas de  $q_c$  e posteriormente foram calculados média, desvio padrão, coeficiente de variação e escala de flutuação, para cada intervalo. A interpretação das informações geológicas, apesar das restrições no uso do conceito de “camada” para solos tropicais, permitiu a integração entre os resultados de ensaios de piezocone de um mesmo sítio, além disso, orientou as análises de variação de  $q_c$  nos pontos investigados e para cada uma das camadas. Esta etapa de integração entre dados pontuais é fundamental para analisar a variabilidade natural do maciço de solo, pois os parâmetros mecânicos dos solos representam dados aleatórios, e conforme Issacks & Srivastava (1989), eles só são determinísticos nos locais onde são obtidos.

Os estudos realizados nos vários sítios investigados mostram que a variação espacial das propriedades depende do contexto geológico (história geológica e ambientes de formação), conforme o Capítulo 6.5. O adequado entendimento destas variações é de fundamental importância na aplicação e interpretação da variabilidade. Desta forma, as análises estatísticas básicas acompanhadas da compreensão dos ambientes geológicos são suficientes para a maioria das análises geotécnicas em campo. Estatísticas sofisticadas perdem sentido, quando são consideradas fortes variações devidas aos agentes formadores dos solos.

O entendimento das correlações entre os diferentes ensaios ou entre ensaios e parâmetros de projeto, depende da identificação de camadas ou regiões que apresentem pequena variabilidade. Neste sentido, as propostas de Hegazy et al. (1991) e Phoon & Quek (2003), para identificação de camadas estatisticamente homogêneas são recomendadas, pois nas situações onde a variabilidade natural é muito elevada, quaisquer correlações ficam comprometidas.

Nos solos de origem sedimentar, principalmente onde as camadas são bem definidas e as características granulométricas dos sedimentos são definidas pela energia do ambiente de sedimentação, existe uma clara diferenciação na classificação dos ensaios de piezocone, e esta subdivisão em camadas é fundamental para tratar da variabilidade. Isto pode ser observado na interpretação dos resultados dos ensaios nos Sítios Paranaguá (Figura 5.34) e Caravelas (Figura 5.43). Nos solos tropicais a diferenciação de camadas, a partir da classificação dos resultados dos ensaios de piezocone, é menos evidente. A pedogênese tropical provoca transformações nas estruturas dos solos resultando em comportamento

independente da granulometria do solo, mas relacionado à estrutura, conforme nos resultados do Sítio São Carlos (Figura 5.49 e 5.50). Os diferentes tipos de estrutura, representados principalmente pelos solos porosos mais superficiais e pelos níveis com enriquecimento em argilominerais, mais em profundidade, foram identificados a partir da interpretação dos resultados de ensaios de piezocone em sítios com solos tropicais. Nestes solos, os estudos de geomorfologia e as interpretações da história geológica são fundamentais para o entendimento da variabilidade natural.

### **6.7 - Estimativa de parâmetros geotécnicos**

Após a identificação da geometria e caracterização dos materiais inconsolidados, considerando a gênese de cada tipo de perfil, segue-se a etapa para definição de parâmetros para projeto ou intervenção na área geoambiental. A estimativa dos parâmetros normalmente é feita segundo duas abordagens (Lunne et al., 1997): a direta, onde os resultados dos ensaios para perfilagem estratigráfica (CPT e SPT) são correlacionados diretamente com os parâmetros de projeto, como resistência de ponta e atrito lateral, no caso de projeto de fundações por estacas; a segunda correlaciona os resultados de ensaios de campo com parâmetros mecânicos do solo, como ângulo de atrito interno, coeficiente de permeabilidade, OCR, entre outros, para posterior aplicação de modelos. Os parâmetros mecânicos do solo podem ainda ser determinados através de ensaios específicos em campo, como o ensaio pressiométrico e/ou o ensaio de palheta (VST), ou pela coleta de amostras indeformadas e realização de ensaios especiais em laboratório. Praticamente em todas estas situações se têm duas características principais: os ensaios, sondagens ou amostragens são realizados em posições distintas do maciço de solo; e os parâmetros de projeto são obtidos pela aplicação de correlações calibradas através de resultados de ensaios específicos, de campo ou laboratório, que representam o comportamento do solo apenas para o local ensaiado.

Desta forma, a aplicação e uso das correlações devem ser precedidos dos entendimentos da geometria e da variabilidade dos materiais, bem como do conhecimento das bases de dados e princípios, que foram utilizados na definição das correlações. Uma correlação geralmente é estabelecida utilizando uma fórmula linear ou polinomial com coeficiente de correlação conhecido, porém nem sempre apresentado, que é definida em função de uma base de dados normalmente restrita, onde são englobados tipos de solos



com gêneses diferentes, o que introduz elevados níveis de incerteza na definição dos parâmetros de projeto.

Os resultados apresentados mostram que combinando a compreensão da gênese dos perfis de solo e a utilização dos resultados dos ensaios de piezocone, o nível de incerteza pode ser reduzido ou melhor conhecido. No entanto, a redução da incerteza é limitada pela variabilidade natural dos solos, que também pode ser avaliada com base nos resultados do ensaio de piezocone. Na Figura 6.11 mostra-se a variação dos valores médios de  $q_c$  em função do número de ensaios de piezocone para as camadas definidas na interpretação geológica, nos solos tropicais do Sítio Campinas, formados pelo intemperismo tropical de diabásios. Observa-se que não existe separação clara de camadas com base nos valores de  $q_c$ , no entanto, as variações dos valores de  $q_c$  no maciço de solo apresentam variabilidade baixa, refletida nos valores baixos do desvio padrão. Na Figura 6.12 é mostrada a variação dos valores médios de  $q_c$  em função do número de ensaios de piezocone para as camadas definidas na interpretação geológica, nos solos sedimentares do Sítio São Paulo. Nesta figura observa-se que os valores médios de  $q_c$  permitem diferenciar claramente dois conjuntos de camadas, as mais arenosas, com valores de  $q_c$  elevados, e as mais argilosas, com valores de  $q_c$  mais baixos. No entanto, apesar de ser possível subdividir o maciço de solo em camadas, o desvio padrão dos valores de  $q_c$  é alto, mostrando alta variabilidade, provavelmente em função do baixo grau de seleção destes sedimentos devido ao ambiente de formação e da gênese, discutidos anteriormente.

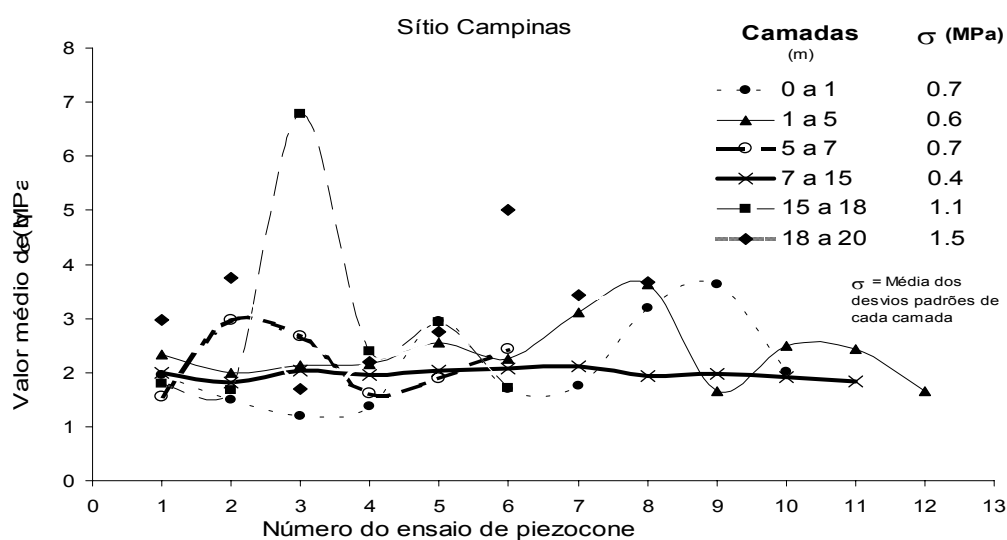


Figura 6.11 Representação da variação dos valores médios de  $q_c$  em função do número de ensaios de piezocone realizado, para cada uma das camadas previamente definidas no Sítio Campinas.

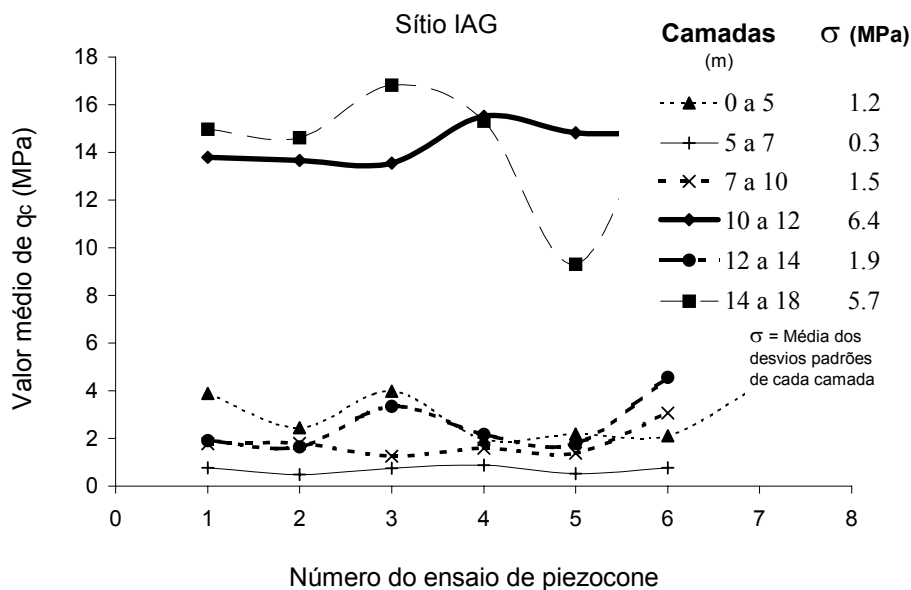


Figura 6.12 Representação da variação do valor médio de  $q_c$ , dos ensaios de piezocone, nas camadas definidas pela interpretação geológica, para todos os ensaios de piezocone no Sítio São Paulo.

Na aplicação das diversas correlações surgem discrepâncias relacionadas aos diferentes tipos genéticos de perfis. Tradicionalmente as correlações são aplicadas utilizando o conceito de camada horizontal em solos sedimentares, que são as condições para as quais os princípios da Mecânica dos Solos foram desenvolvidos (Lambe & Whitman, 1986). Quando os ensaios são realizados na mesma camada onde foram coletadas as amostras, com baixa heterogeneidade e situados a curtas distâncias, eles podem ser considerados como representativos desta camada. No entanto, em solos tropicais a aplicação de correlações entre ensaios, amostras ou parâmetros de projeto, mesmo em ensaios situados muito próximos, fica prejudicada. Os resultados de ensaios de piezocone realizados no Sítio Bauru, considerado por diversos autores como um local homogêneo (Giacheti, 2001, Lobo et al., 1998) onde as correlações são consideradas válidas, mostram que existem regiões com grande variação nos valores de  $q_c$ , o que dificulta o entendimento da estratigrafia, devido a presença de várias fases de cimentação carbonática (Fernandes, 1998), que somada aos processos de sedimentação e intemperismo, conduziram a grandes variações nos resultados dos ensaios, mesmo em distâncias menores que 2 m, conforme mostrado na Figura 5.92.

A Figura 6.13 mostra um procedimento que permite conhecer o grau de incerteza na aplicação de uma correlação ou modelo de transformação (Phoon & Kulhawy, 1999). A partir do registro de  $q_c$ , com histograma de distribuição conhecido, e correlações (com base em  $q_c$ ) com histograma de distribuição da correlação conhecido, podem ser definidos

critérios mais precisos para seleção dos parâmetros, como por exemplo, valor do desvio padrão acima e abaixo da média, e desta forma se conhecer o nível de incerteza na determinação do parâmetro dentro de critérios probabilísticos previamente selecionados.

Nos diversos sítios de pesquisa investigados foram testadas as relações entre  $q_c/N_{SPT}$  e  $G_0/q_c$ . Estes parâmetros são provenientes dos ensaios SPT, ensaios de piezocone e ensaios sísmicos (cross-hole e SCPT), que caracteristicamente solicitam diferentes volumes do maciço de solo e ressaltam as influências da variabilidade.

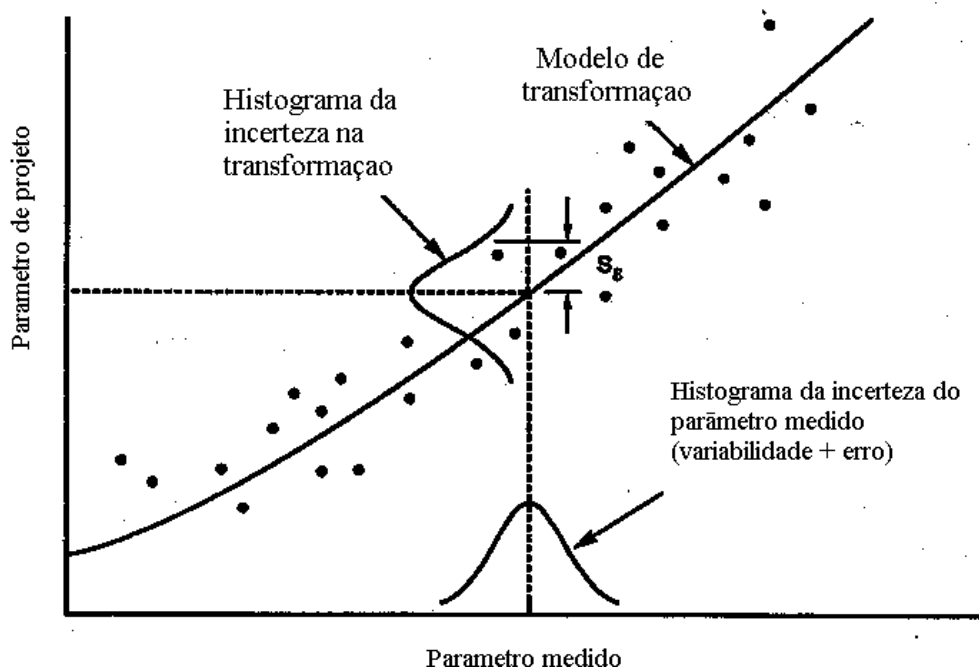


Figura 6.13 – Modelo para seleção probabilística de parâmetros de projeto com base em correlações (Phoon & Kulhawy, 1999).

Diversas correlações propostas com base nos resultados do piezocone (Aas et al., 1986; Jamiolkowski et al., 1988; Akca, 2003) falham em não definir qual o critério de seleção do parâmetro, considerando que em função da frequência de registro elevada, isto passa a interferir no resultado da correlação. No dimensionamento de estacas os critérios de seleção de  $q_c$  são basicamente a eliminação de picos a partir de limites inferiores e superiores à média, na faixa de profundidade onde ocorrem as solicitações (Lunne et al., 1997). As correlações definidas a partir do  $N_{SPT}$ , normalmente não apresentam esta dificuldade, pois se tem apenas um valor de resistência a cada metro de ensaio, enquanto

no CPT tem-se de 40 a 100 leituras por metro de ensaio, em função da frequência de aquisição. Na Tabela 6.1 são comparados diversos ensaios de campo e suas prováveis escalas de solitação do maciço de solo, estimados de forma empírica. Estes são valores indicativos, pois o volume solicitado por cada ensaio depende também de características do solo, principalmente da sua rigidez (Moss, 2003).

Tabela 6.1 – Estimativa do volume da solitação do maciço dos diferentes ensaios de campo

<b>Tipo de Ensaio/Coleta</b>	<b>Característica</b>	<b>Escala de variabilidade solicitada (estimada)</b>
CPTU	Medida de $q_c$ , $f_s$ e $u$ através da penetração de ponteira padrão e sensores, em intervalos de 1 a 5 cm Penetração quasi-estática contínua Deformação e ruptura com bulbo de pressão Fluído viscoso	0,025 a 0,5 m
SPT	Determinação de $N$ , que corresponde a medição do número de golpes para cravar 0,30 m do amostrador padrão Alívio pela abertura do furo Deformação por penetração por vibração e por lavagem	0,3 a 1,0 m
PMT	Parâmetros a partir da aplicação de pressão em membrana cilíndrica de borracha, por extensão de 0,5 m ao longo do furo, em cada ensaio Deformação depende do tipo de ensaio	0,5 a 1,5 m
Amostrador com tubo de parede fina (0,10 x 0,60 m)	Amostra suscetível à variabilidade vertical podendo ser representativa de uma camada, quando coletada com critério Corpos de prova para ensaios em laboratório podem ter características distintas	0,05 a 0,1 m (controlada pela dimensão do corpo de prova no ensaio específico).
Amostrador em bloco (0,3 x 0,3 x 0,3 m)	Amostra representativa de uma região do maciço amostrado, porém com efeitos de descompressão.	0,05 a 0,1 m (controlada pela dimensão do corpo de prova no ensaio específico)
Ensaio sísmico down-hole	Parâmetros dinâmicos $G_0$ a micro-deformação Representa valores médios dos trechos percorridos pela onda	1 a 20 m (controlada pela distância entre fonte e geofones) e pela forma de interpretação dos resultados

Os resultados da variação de critério de seleção de  $q_c$  para estabelecer a correlação  $q_c/N_{SPT}$  foram discutidos na descrição dos respectivos sítios. Na Figura 6.14 é apresentado um resumo da relação  $q_c/N_{SPT}$ , a partir de resultados de ensaios de piezocone e de sondagens de simples reconhecimento, para diferentes tipos de perfis de solo. Compara-se a aplicação de diferentes critérios, que abrangem a média em 1 m, a média no trecho equivalente a 0,3 m e a média por camada.

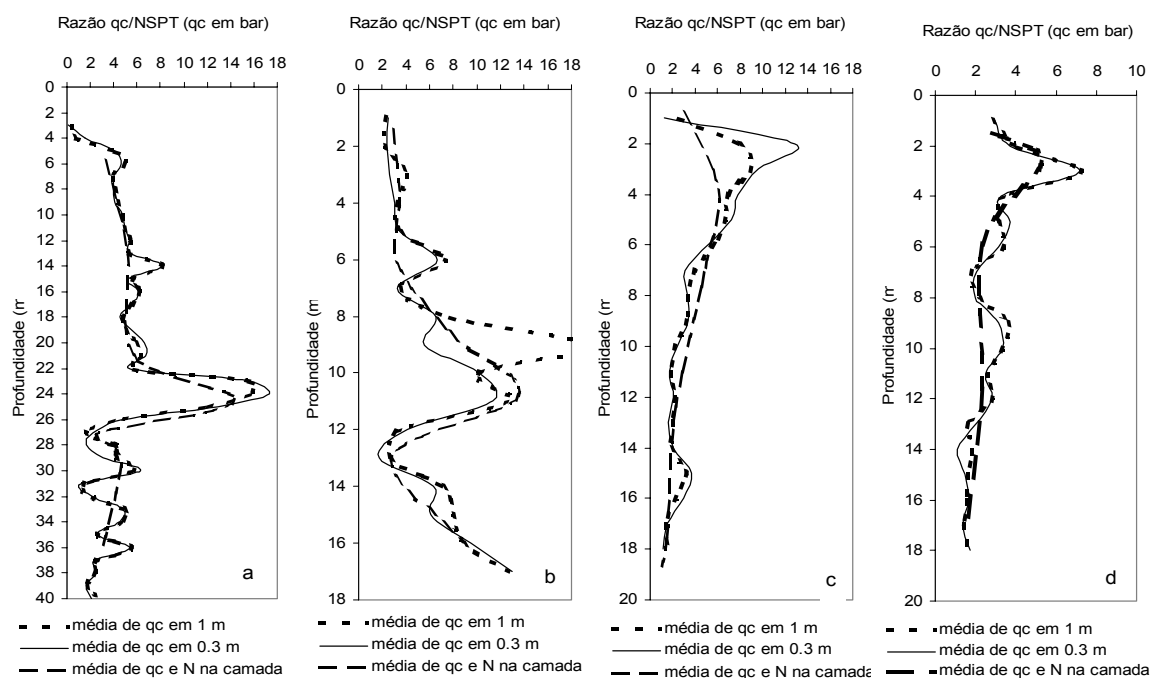


Figura 6.14 Relação  $q_c/NSPT$ , com variação do critério de seleção de  $q_c$ , para ensaios executados em solos sedimentares (Guarujá - a, São Paulo -b), e em solos tropicais (Campinas - c, Londrina -d).

As variações nos resultados dos diferentes critérios utilizados estão ligadas ao maior ou menor contraste entre camadas, marcadas por transições bem definidas, propriedades contrastantes e diferentes espessuras das camadas investigadas. Quanto menor for a espessura da camada e maior contraste das características de solo, maiores serão as variações nas correlações em função da mudança de critério de seleção dos parâmetros, conforme pode ser observado quando da interpretação dos resultados nos sedimentos cenozóicos do Sítio São Paulo (Figura 6.14.a). Quando as camadas são de pequena dimensão, ou quando o ensaio de SPT é feito na transição entre camadas, não se tem um valor de  $N_{SPT}$  característico daquela camada e a correlação não é representativa de nenhuma das camadas.

A pedogênese tropical tende a suavizar os contrastes entre as camadas, onde ela atua mais intensamente. No entanto, este aspecto pode ser fortemente comprometido pelas variações laterais nos solos tropicais, onde as variações de graus de alteração podem produzir diferenças sensíveis, que devem ser consideradas na interpretação como casualidade ou aleatoriedade potencial, função da gênese, e responsáveis por muitas das variações nas estimativas de parâmetros através de correlações.

A compartimentação do maciço em camadas nos sedimentos, ou em zonas homogêneas nos solos tropicais, tende a propiciar correlações mais coerentes, pois retiram as interferências das transições entre unidades, refletindo medidas de parâmetros mais características na camada ou zona investigada.

A correlação  $G_0/q_c$  foi aplicada a resultados de ensaio nos Sítios Campinas, Bauru e São Carlos. Foram analisadas as relações  $G_0/q_c$  determinadas a partir de ensaios sísmicos de “cross-hole” e de piezocone próximos, bem como a partir dos resultados dos ensaios de piezocone sísmico. Foram também modificados os critérios de seleção de  $q_c$  de forma a verificar a influência da variabilidade nessa relação.

Nos resultados para o Sítio São Carlos, mostrados nas Figuras 5.61 e 5.62, observa-se que a variação no critério de seleção de  $q_c$  não modifica sensivelmente o valor da relação  $G_0/q_c$ . Os valores da relação  $G_0/q_c$  são crescentes até a profundidade de 8 m, variando de 80 a 200, com média de 185. Nos resultados da relação  $G_0/q_c$ , mostrados na Figura 6.15, observa-se que entre 8 e 15 m de profundidade ocorre redução da relação  $G_0/q_c$  com valores entre 50 e 100, média de 88. No intervalo de 15 a 21 m de profundidade os valores da relação são sistematicamente abaixo de 50, com média de 39. Os resultados da relação  $G_0/q_c$ , mostram que os solos lateríticos tendem a apresentar resultados mais elevados dessa correlação, enquanto que nos solos não lateríticos essa correlação tende a apresentar valores mais baixos. Isto deve refletir os efeitos do processo de laterização, que produz cimentação das partículas e eleva a rigidez dos solos lateríticos.

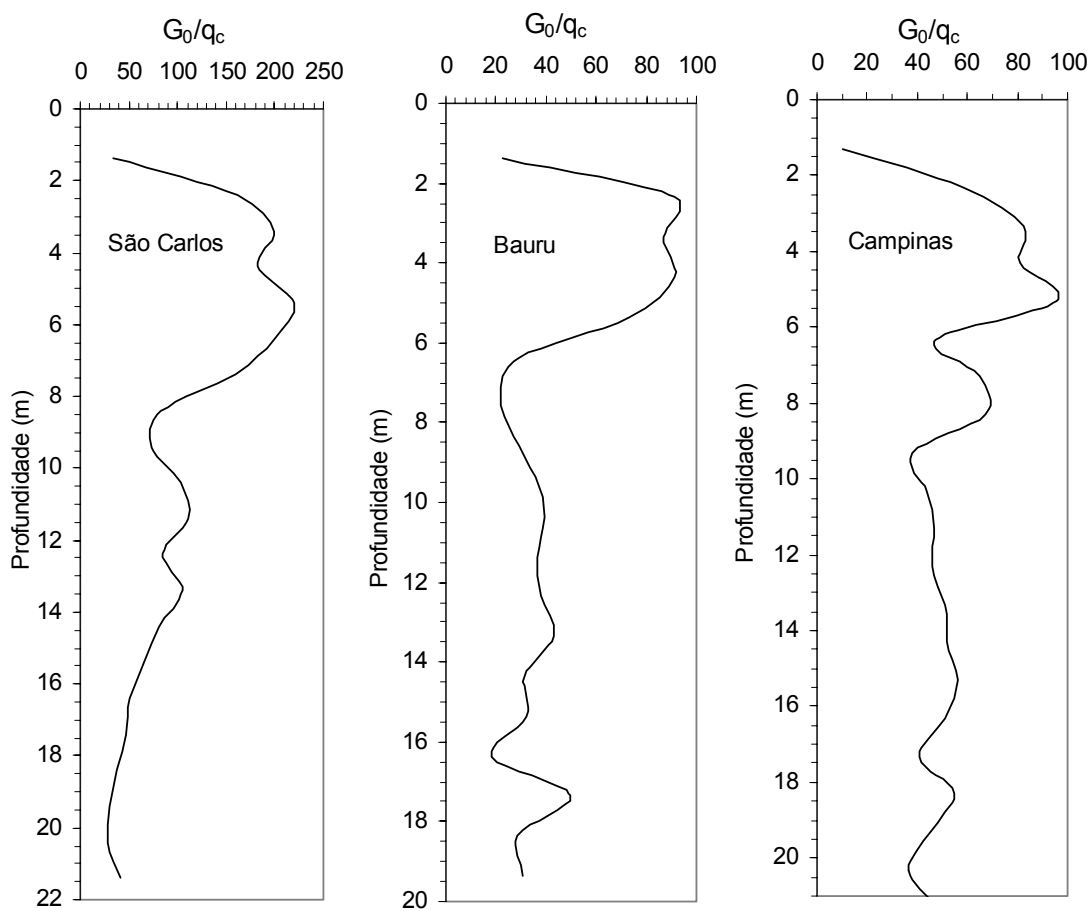


Figura 6.15 Relação  $G_0/q_c$  a partir de ensaios de piezocone sísmico, calculados pelo método intervalar.

Os resultados da relação  $G_0/q_c$  para o Sítio Campinas são apresentados nas Figuras 5.74 e 5.75. Os resultados mostram pequenas variações na comparação entre o ensaio de “cross-hole” e o de piezocone sísmico. A relação  $G_0/q_c$  determinada é variável, sendo que até 10 m de profundidade os valores situam-se entre 50 e 110, com média de 67 e, a partir desta profundidade tendem a diminuir e a manter maior regularidade, variando entre 30 e 50, com média de 47. A relação  $G_0/q_c$ , obtida a partir do resultado de ensaio de piezocone sísmico, neste sítio, é mostrada na Figura 6.15.

Os resultados da relação  $G_0/q_c$  para o Sítio Bauru são apresentados nas Figuras 5.95 e 5.96, e refletem uma porção do maciço onde a variabilidade é alta e prejudica o adequado entendimento das variações da relação em função da posição dos ensaios. Na Figura 6.15 é mostrado o perfil da relação  $G_0/q_c$ , com base em ensaio de piezocone sísmico e, mostra relação  $G_0/q_c$  variável de 60 a 100, com média de 85 até 6 m de profundidade, enquanto

que no intervalo de 6 a 20 m de profundidade os valores situam-se entre 20 e 40, com média de 33.

Os resultados apresentados (Figura 6.15) são interpretados como característicos de solos formados por pedogênese tropical. As porções mais superficiais do terreno, onde os valores da relação  $G_0/q_c$  são mais elevados, correspondem aos intervalos de solos porosos, com cimentação por hidróxidos de ferro e tipicamente colapsíveis. Nos resultados do Sítio São Carlos (Figura 6.15) a relação  $G_0/q_c$  tende a diminuir com o aumento da profundidade. Uma interpretação possível é que a intensidade da pedogênese tropical diminui com a profundidade, resultando em menores valores da relação  $G_0/q_c$ . No caso do perfil de solo de São Carlos, as porções abaixo de 13 a 15 m de profundidade, mostram a presença de rochas sedimentares alteradas atribuíveis ao Grupo Bauru.

Os resultados aqui obtidos são resumidos na Tabela 6.2 e concordam com as proposições de Giacheti & Carvalho (1994), Schnaid et al. (1998) e Giacheti et al. (1999), onde os valores da relação  $G_0/q_c$  são maiores para os solos lateríticos superficiais. Ressalte-se, no entanto, que a delimitação precisa dos solos tropicais só pode ser obtida pela interpretação integrada de ensaios e mapeamentos, considerando também critérios geomorfológicos e geológicos.

Tabela 6.2 – Valores médios da relação  $G_0/q_c$ , com base em resultados de ensaios de piezocone sísmico, para os Sítios Campinas, São Carlos e Bauru

<b>Local</b>	<b>Profundidade (m)</b>	<b>Relação <math>G_0/q_c</math> (média)</b>
Sítio Campinas	0 a 10	67
	10 a 20	47
Sítio São Carlos	0 a 8	185
	8 a 15	88
	15 a 21	39
Sítio Bauru	0 a 6	85
	6 a 20	33



## 6.8 – Ensaios de piezocone sísmico (SCPTu)

Ensaios de piezocone sísmico foram realizados para determinação de módulos de cisalhamento máximo ( $G_0$ ) nos sítios de pesquisa do interior do Estado de São Paulo. Os resultados dos ensaios e as interpretações estão apresentados nos Capítulos 5.4.2, 5.4.3 e 5.4.5, respectivamente dos Sítios São Carlos, Campinas e Bauru. Como o equipamento para realização destes ensaios foi desenvolvido e utilizado pela primeira vez, foram comparados os valores de  $V_s$  determinados nos 3 sítios experimentais utilizando o ensaio SCPTU com os determinados através de ensaios sísmicos de “cross-hole”. Em cada um dos sítios foram executados dois ensaios de piezocone sísmico distantes um do outro no máximo 3 m, com objetivo de avaliar reprodutibilidade e possíveis influências da variabilidade natural do solo. No resultado dos ensaios realizados tem-se valores de  $q_c$ ,  $R_f$  e as determinações das velocidades das onda S em intervalos de 1 m.

No Sítio Bauru foram identificadas grandes variações nos valores de  $q_c$  e  $R_f$ , seja nos ensaios de piezocone sísmico como nos demais ensaios de piezocone e sondagens de simples reconhecimento realizados. Estas variações interferiram nas medidas de velocidade da onda S, especialmente no trecho entre 10 e 16 m de profundidade (Figura 5.92), com variações nos padrões de fraturamento e cimentação carbonática (Fernandes, 1998). Além disto, a baixa resistência, relativamente pontual, identificada pelos registros de  $q_c$ , as variações na velocidade da onda S e os resultados anômalos de ensaios pressiométricos anômalos (Figura 5.90) evidenciam a elevada variabilidade de parâmetros mecânicos do solo neste local. A comparação entre os resultados dos ensaios de piezocone sísmico e de “cross-hole”, mostrados na Figura 6.16, indica razoável concordância de valores.

Nos ensaios sísmicos executados no Sítio Campinas os resultados são coerentes, porém a presença de picos e depressões distintas nos valores de  $q_c$  e  $R_f$  (Figura 5.70, pag. 231) evidenciam prováveis regiões com diferentes graus de intemperismo e que podem explicar as variações que ocorrem nos registros de velocidade da onda S entre os dois ensaios realizados. No entanto, os valores de velocidades médias no perfil são muito semelhantes com os resultados do ensaio de “cross-hole” (Figura 6.16).

Com base nos resultados dos ensaios SCPT realizados pode-se destacar que o aspecto de fundamental importância na obtenção de parâmetros é a diferença de escala de sollicitação do maciço registrada em cada sensor. Os valores de  $q_c$  e  $R_f$  mostram frequência de aquisição elevada que, associada ao pequeno diâmetro da ponteira cônica, destaca as

pequenas variabilidades do perfil de solo. Por outro lado, o registro da onda cisalhante ( $V_s$ ), feito em intervalos de 1 m, com onda gerada na superfície, resulta em valores médios da velocidade de propagação em cada trecho de ensaio. Desta forma, as micro-variabilidades não são identificadas e os valores da velocidade da onda tendem a ser médios. No entanto, feições mais marcantes, como as identificadas nos resultados do Sítio Bauru, podem contribuir ou interferir na definição da velocidade da onda. Porém, os resultados sofrem influência do método de obtenção da velocidade (Kin et al., 2004), pois a migração da onda sofre refrações e reflexões (Lei de Snell) que não foram contempladas nesta pesquisa e poderiam, no caso do sítio Bauru, apresentar valores de  $V_s$  menos variáveis para este local. Além disto, o  $G_\theta$  é um parâmetro de baixa amplitude de deformação, onde a cimentação carbonática contribui para aumento da rigidez e é toda destruída durante a cravação do cone e registro de  $q_c$ , conforme já identificado por Schnaid et al. (1998) e Giacheti et al. (1999).

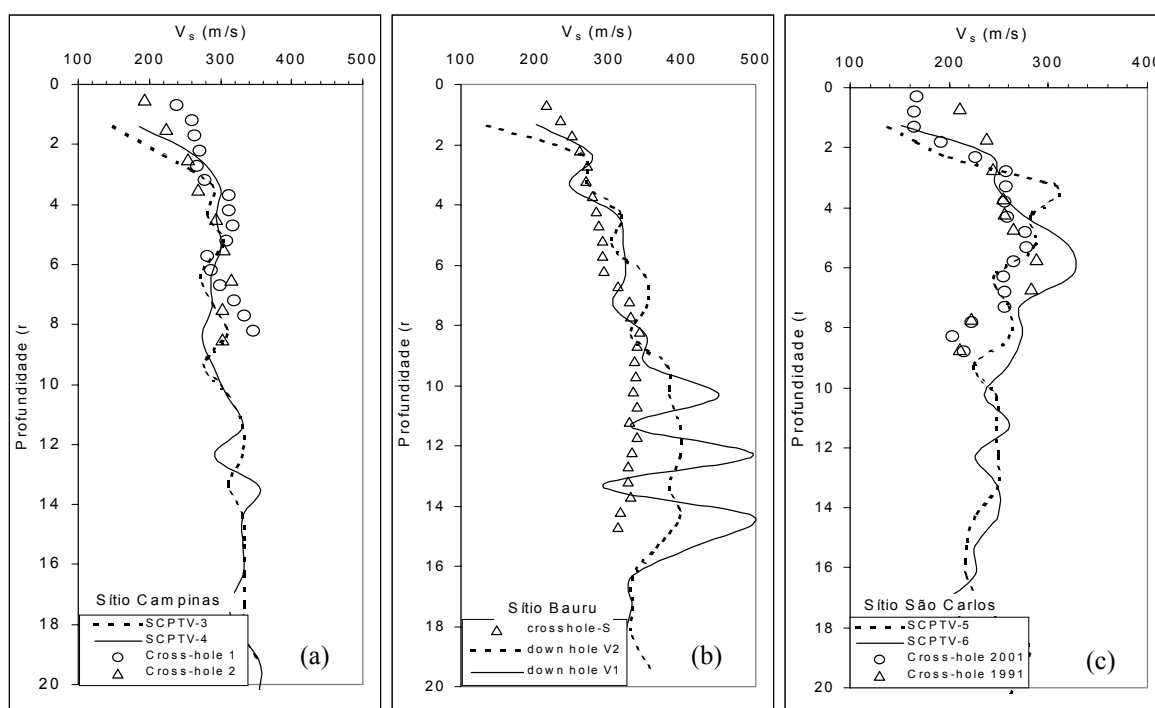


Figura 6.16 – Comparação entre medição da velocidade da onda S a partir de ensaios de piezocone sísmico e ensaios sísmicos de “cross-hole” para os sítios Campinas (a), Bauru (b) e São Carlos (c)

No Sítio São Carlos, os resultados dos dois ensaios de piezocone sísmico também foram realizados muito próximos um do outro e mostraram pequenas diferenças atribuídas à variabilidade natural do solo (Figura 5.56, pag 211). As maiores variações identificadas

no perfil, e ressaltadas nos valores de  $R_f$  ocorrem abaixo dos 15 m de profundidade, como evidência de possível presença do Grupo Bauru. A comparação com os resultados dos ensaios sísmicos de “cross-hole” (Figura 6.16) mostra resultados semelhantes e as pequenas variações são atribuídas a variabilidade do maciço de solo, principalmente porque os ensaios foram realizados em diferentes posições do terreno.

### **6.9 – Ensaios de piezocone de resistividade (RCPTu)**

As medidas de resistividade realizadas com o piezocone de resistividade são fortemente influenciadas pela natureza geológica de cada sítio. Em solos sedimentares quaternários no Sítio Paranaguá, a interpretação dos resultados dos ensaios mostrou comportamento condizente com experiências internacionais em solos de origem sedimentar (Campanella & Weemes, 1990; Strutynsky et al., 1991 e Strutynsky et al., 1999), onde os valores de resistividade nas camadas de areia e de argila saturadas, normalmente são distintos e são válidos os princípios do método empregado, onde a corrente elétrica percorre preferencialmente o fluido intersticial. Assim, variações na corrente elétrica indicam variações na composição do fluido (Campanella & Weemes, 1990). Desta forma, camadas semelhantes constituídas por sedimentos arenosos, a partir da interpretação de valores de  $q_c$  e  $R_f$  dos ensaios de piezocone, mostraram resultados distintos de resistividade. Isto foi interpretado como indicativo da maior concentração de cloretos na água, corroborando evidências de análises químicas na água de alguns dos poços, de acordo com as medidas de resistividade obtidas a partir dos ensaios caminhamento elétrico em superfície. Na Figura 6.17 tem-se a interpretação dos resultados dos ensaios de piezocone de resistividade, com indicação da estratigrafia e da provável distribuição da intrusão de água salina.

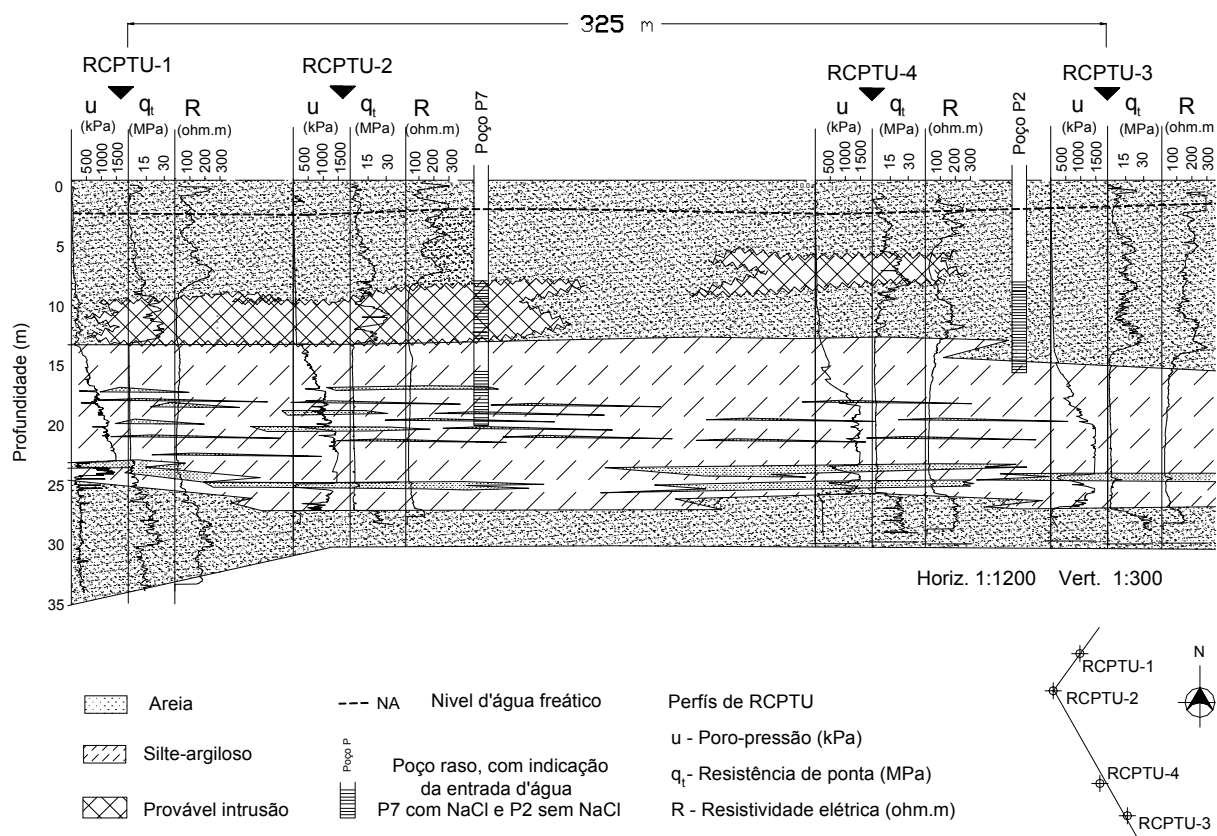


Figura 6.17 Interpretação de perfil estratigráfico, com base nos ensaios de piezocone de resistividade e indicação dos prováveis locais onde ocorre contaminação por água salgada no aquífero superficial.

Nos sedimentos cenozóicos do Sítio São Paulo, as medidas de resistividade (Figura 5.26) também são consistentes, marcando as transições entre as camadas de sedimentos arenosos e argilosos. Ocorrem correlações diretas entre as posições das interfaces identificadas pelos valores de  $q_c$  e  $R_f$ , indicando que a interpretação conjunta dos registros de todos os sensores do piezocone, incluindo as medidas de resistividade, podem auxiliar muito a interpretação do perfil estratigráfico. No entanto, neste sítio as medidas de resistividade não permitiram identificar a posição do nível de água, provavelmente devido à presença de aterros muito heterogêneos em superfície, com prováveis diferentes teores de umidade e eventuais contaminações, que podem ter interferido nas medidas de resistividade, provocando elevada variabilidade nos 3 m superficiais do terreno. Infelizmente, nesse trabalho não foram executados estudos de detalhe que confirmassem esta hipótese. Este aspecto contrasta com a experiência de solos sedimentares norte-americanos e europeus (Campanella & Weemes, 1990 e Strutynsky et al., 1991), onde a identificação do nível de água é realizada a partir da interpretação direta dos registros de

resistividade nos ensaios RCPTU, que também foi verificado nos ensaios realizados em solos sedimentares brasileiros no Sítio Paranaguá (Figura 6.17).

Nos solos tropicais do sítio São Carlos onde o nível de água é profundo (>10 m), concentrações de hidróxidos de ferro e alumínio elevadas e com presença elevadas percentagens de granulometria argila em meio ao solo arenoso, podem ter interferido nas medidas de resistividade produzindo resultados muito variáveis e sem correlação direta com os valores de  $q_c$  e  $R_f$ , mostrado na Figura 5.58. Não foram identificadas correspondências das medidas de resistividade com a distribuição estratigráfica do local, nem foi possível identificar a posição do nível de água com base nos valores de resistividade. Desta forma, os princípios básicos que regem a interpretação de ensaios RCPTU, não são diretamente aplicáveis nestes materiais, talvez em função do nível de água profundo ou das características do solo produzidas pela pedogênese tropical.

#### **6.10 – Ensaios de piezocone utilizando filtro de cavidade preenchido com graxa**

Os registros de poro-pressão juntamente com as outras informações fornecidas pelos demais sensores do piezocone são úteis na identificação do perfil estratigráfico e na estimativa de parâmetros geotécnicos e geoambientais. Estes registros podem ser obtidos nas regiões saturadas do maciço de solo e os ensaios convencionais de piezocone são normalmente realizados utilizando um filtro com elemento poroso saturado com água ou glicerina. A qualidade do registro de poro-pressão depende da adequada saturação inicial e manutenção desta saturação durante a penetração do piezocone no solo. A ocorrência freqüente de perfis de solo onde o nível de água é profundo, especialmente nos solos tropicais, limita a utilização do ensaio de piezocone nesses solos, pois exige a execução de pré-furos até o nível de água, tornando a execução do ensaio mais demorada e cara.

Um procedimento alternativo de registro da poro-pressão utilizando um filtro de cavidade preenchido com graxa foi proposto e testado por Larson (1995) e Elmgreen (1995), e foi empregado em diversos ensaios de piezocone realizados nesta pesquisa.

Nos sedimentos cenozóicos do sítio São Paulo foram realizados ensaios de piezocone contíguos comparando os registros de poro-pressão utilizando o elemento poroso saturado com glicerina e o filtro de cavidade preenchido com graxa. Os resultados, apresentados na Figura 6.18, mostram que nestes sedimentos os registros de poro-pressão

com glicerina forneceram resultados falhos, provavelmente por obturações ou danos ao elemento poroso ou falhas de saturação, que impediram uma adequada resposta do sensor.

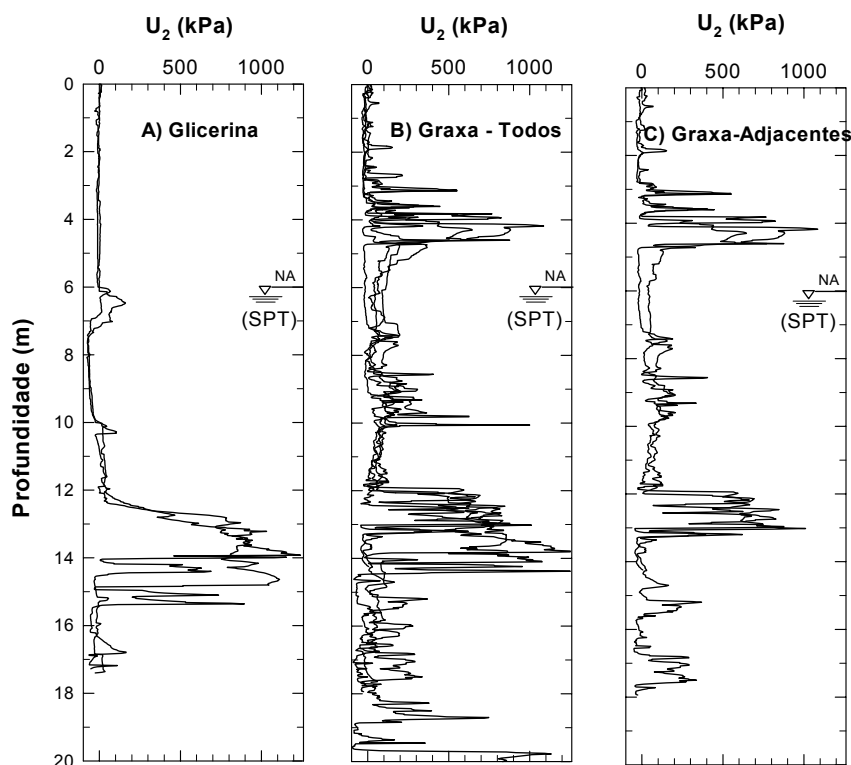


Figura 6.18 Registro de poro-pressão obtidos a partir dos ensaios de piezocone. (A) Ensaio realizado com glicerina, (B) com graxa e (C) com graxa próximos entre si. Sítio São Paulo.

Os registros de  $u$  utilizando graxa parecem mais coerentes, com picos bem marcados e correspondência marcante entre as interfaces identificadas pelos valores de  $R_f$ ,  $u$  e resistividade (Figura 5.23). Ensaio contíguo mostraram excelente reprodutibilidade do registro da poro-pressão, mostrando que o filtro de cavidade preenchido com graxa pode ser utilizado nos ensaios de piezocone como auxiliar na identificação do perfil estratigráfico, especialmente em locais onde ocorrem perfis de solo parcialmente saturados e profundos. Nos ensaios de dissipação do excesso da poro-pressão a utilização deste recurso é mais limitada, pois mostram formatos de curva e tempos de dissipação distintos dos obtidos nos ensaios convencionais com glicerina. Esta diferença de comportamento é evidenciada pelos resultados de ensaios de piezocone contíguos, realizados no Sítio Curitiba e mostrados na Figura 5.12.

Nos solos tropicais que ocorrem nos sítios São Carlos e Campinas, onde o nível de água situa-se a 10 e 13 m de profundidade, foram realizados ensaios de piezocone utilizando o recurso da graxa, sem a execução de pré-furos. As Figuras 5.53 do Sítio São Carlos e Figura 5.72 do Sítio Campinas, mostram que o registro de poro-pressão identifica

claramente camadas com diferentes comportamentos quanto às condições de drenagem, evidenciadas pela condição de penetração drenada ou não-drenada do piezocone, que auxiliam sobremaneira a classificação dos solos e a identificação do perfil estratigráfico. Alguns dos resultados obtidos no Sítio São Carlos, onde o registro de poro-pressão indica alternância de camadas que não são identificadas pelos valores de  $q_c$  e  $R_f$ , mostra eficácia do registro de poro-pressão na identificação estratigráfica, mesmo com o uso do filtro de cavidade preenchido com graxa.

O recurso do filtro de cavidade preenchido com graxa tem sido extensivamente utilizado em países europeus, principalmente na Itália. Conforme mostram Larson (1995), Elmgreen (1995) e Lund (2001) e alguns dos resultados aqui apresentados, locais agressivos aos elementos porosos e em áreas onde o nível de água é profundo, são favoráveis à utilização desse recurso alternativo. Os efeitos ligados a histerese da resposta da graxa limitam, pela falta de estudos mais detalhados, a utilização destes registros na estimativa de parâmetros geotécnicos. Resultados de diversos ensaios de piezocone e não publicados, mostram que em solos muito moles, principalmente onde os registros de poro-pressão mostram valores próximos à pressão hidrostática, o recurso da graxa não responde adequadamente, conforme pode ser observado na Figura 6.19, que é típica de diversos outros ensaios como esse realizado em solos muito moles.

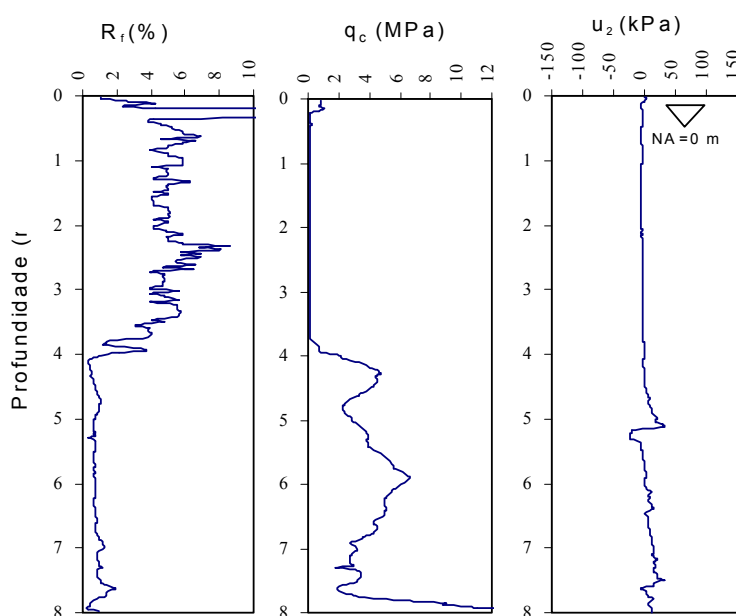


Figura 6.19 Resultado de ensaios de piezocone utilizando o recurso do filtro de cavidade preenchido com graxa para medir  $u$ , com destaque para a resposta falha em solos muito moles.

### **6.11 Importância da história geológica**

A história geológica do solo é considerada como de fundamental importância na interpretação dos ensaios de piezocone (Giacheti, 2001). No entanto, a simples identificação das rochas que deram origem ao perfil e a separação convencional em solo sedimentar e solo tropical não é suficiente para a perfeita compreensão e interpretação dos perfis. Os resultados apresentados nesse trabalho mostram que é necessário entender os processos que atuaram em toda história geológica de uma determinada região para que se possa fazer uso adequado dos resultados de ensaios de piezocone. A gênese dos perfis de solo está ligada a dois grandes fatores: o primeiro é a rocha que forneceu os materiais constituintes, que no caso dos solos sedimentares está ligado às características do ambiente de sedimentação e, nos solos residuais, está ligado à estrutura e constituição das rochas do substrato. O segundo fator está ligado aos processos que atuaram sobre estes materiais produzindo as características identificáveis no perfil. Presume-se que o aumento na variedade e quantidade de processos (ou de variáveis independentes) torna o perfil estratigráfico mais complexo. Desta forma, o adequado conhecimento da história geológica deve abranger necessariamente o entendimento da seqüência de processos geológicos que atuaram em determinado local.

Nos solos sedimentares, onde ocorre ampla predominância de processos deposicionais na formação, é importante identificar os ambientes, agentes e ciclos de formação, pois estes fatores interferem na distribuição estratigráfica e nas características geotécnicas e geoambientais. Nos sedimentos de planícies litorâneas quaternárias abordados nesta pesquisa foi identificada uma relação direta entre a seqüência de estratos e as flutuações do nível médio dos mares durante o Quaternário, confirmando estudos de Suguio et al. (1985) e Lessa & Angulo (1995), entre outros. As implicações no comportamento geotécnico, identificadas por Massad et al. (1996) também foram reconhecidas nos sedimentos do Sítio Guarujá, onde os valores de  $q_c$  e da pressão de pré-adensamento estão ligadas às flutuações do nível do mar e a presença de dunas sobre os sedimentos marinhos, em função da redução do NMM e exposição dos sedimentos.

Os sedimentos cenozóicos do Sítio São Paulo foram formados por preenchimento de calhas tectônicas, com muita heterogeneidade dos sedimentos argilosos, função dos processos de formação serem predominantemente as corridas de lama, onde não ocorre seleção granulométrica eficiente dos sedimentos. A alternância freqüente de camadas mais argilosas e camadas mais arenosas reflete variações nos ambientes, com prováveis



influências das mudanças climáticas e do tectonismo, sendo previsível bruscas variações laterais e verticais neste tipo de sedimento. Nos sedimentos do Sítio Curitiba, foi detectada importante contribuição dos processos de morfogênese e pedogênese na formação do perfil, posteriores ao preenchimento da bacia. Nestas situações, o estudo da morfologia dos terrenos no entorno do sítio foi fundamental para a adequada compreensão da distribuição horizontal e vertical das unidades de solo.

A complexidade dos solos tropicais resulta da somatória de processos que resultaram na formação do perfil. O histórico de processos está intimamente ligado a história climática que controlou o tipo e a intensidade dos processos na formação dos perfis. O modelo proposto por Morrison (1995), mostrado na Figura 3.44, associado à identificação de pediplanos e pedimentos mapeados em extensas áreas do território brasileiro, evidenciam que a formação dos solos do interior do Brasil, inclusive os aqui estudados, esteve ligada a alternância de fases com predomínio de pedogênese e aprofundamento do perfil de solo, em clima úmido e quente e fases com predomínio de morfogênese, com erosão e formação de colúvios, em climas áridos e mais frios. Os estudos paleoclimáticos nas regiões interiores do Brasil são escassos e não apresentam informações abrangentes que subsidiem as interpretações detalhadas dos perfis do solo do interior do Brasil. As evidências, principalmente com base em estudos nos sedimentos litorâneos, indicam que o período quaternário apresentou diversos ciclos climáticos, e por consequência diversas fases de colúviação e de pedogênese. Carmo & Vasconcelos (2004) sugerem com base em estudos geocronológicos, que durante o Mioceno médio a superior (10 Ma) ocorreu profundo intemperismo químico, que foi responsável pelos espessos mantos de intemperismo comuns em todo o interior do Brasil, com velocidades da frente de intemperismo da ordem de 4 a 8 m/Ma, e que devem ter atuado, com diferentes intensidades ao longo dos últimos 10 Ma.

Os resultados dos ensaios realizados nos sítios Bauru e São Carlos mostram que os perfis estratigráficos são complexos e foram formados predominantemente a partir de rochas sedimentares do Grupo Bauru, submetidas aos processos de intemperismo químico e morfogênese. No sítio São Carlos os resultados mostram a presença de um colúvio até cerca de 6 m de profundidade, seguidos de sedimentos com intenso intemperismo até 13 a 14 m de profundidade. Nestas situações o processo de intemperismo deve atuar no sentido de suavizar os contatos entre camadas, seja por processos de amolecimento do sedimento ou ilúviação de minerais de argila em profundidade.

## 7.0 CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE

### **7.1 Conclusões**

As conclusões aqui apresentadas resultam de ensaios de piezocone executados sobre sedimentos quaternários das planícies litorâneas, sedimentos cenozóicos das bacias tafrogênicas de São Paulo e Curitiba, bem como solos produzidos pelo intemperismo sobre diabásios, basaltos e sedimentos da Bacia Paleozóica do Paraná, com base em informações disponíveis nos sítios investigados.

Os resultados da pesquisa mostram que as condições geológicas influenciam de forma marcante a interpretação dos resultados dos ensaios de piezocone. A complexidade na identificação do perfil estratigráfico e na interpretação do ensaio de piezocone está intimamente relacionada à natureza dos processos geológicos que contribuem para a formação do perfil. Quanto mais numerosas as variáveis independentes que atuam no processo, a complexidade e a variabilidade são em geral maiores. A contribuição principal do entendimento das condições geológicas ocorre na etapa de integração das várias sondagens e ensaios para interpretação da distribuição espacial das unidades. Nos solos sedimentares (ou sedimentos), produzidos unicamente por processos sedimentares, a interpretação da geometria das unidades depende da interpretação dos ambientes de sedimentação. Os resultados dos ensaios de piezocone são eficientes na identificação das superfícies de transição, na classificação dos sedimentos e na estimativa de parâmetros a partir de correlações. Nos solos formados pela da pedogênese tropical, como os formados a partir de basaltos e diabásios, os ensaios de piezocone são eficientes na identificação dos níveis mais superficiais de solos lateríticos, porosos e de comportamento colapsível. A identificação da estratigrafia para posterior aplicação de correlações para estimativa de parâmetros de projeto é dificultada pela elevada variabilidade atribuível aos diferentes graus de alteração, controlados principalmente pelas fraturas da rocha original, sendo

comum a presença de blocos rochosos pouco alterados em meio ao solo bem desenvolvido. Nestas situações a utilização do conceito de “camada”, tradicionalmente utilizada em geotecnia, deve ser evitada ou empregada com cautela.

Os solos tropicais estudados são originários de substratos rochosos diversos que resultam em diferentes perfis estratigráficos. Os perfis que tiveram origem no intemperismo de rochas cristalinas, como basalto e diabásio, dos sítios Londrina e Campinas, são considerados perfis típicos de intemperismo tropical. A gênese envolve transformações mineralógicas de feldspatos e piroxênios em minerais de argila. As frentes de intemperismo são controladas, em grande parte, pelas fraturas e condicionam as variabilidades do perfil de solo e da transição entre solo e rocha. Além destas transformações mineralógicas, que são processos de intemperismo químico, ocorrem dois outros ligados a estágios muito avançados de intemperismo tropical. O primeiro é a iluviação dos minerais de argila pela infiltração da água no solo, que resulta na formação de agregados cimentados por hidróxidos de ferro e alumínio, muito porosos e responsáveis pela formação dos solos colapsíveis. O segundo é a concentração de minerais de argila nas porções mais profundas do perfil, também resultante da iluviação. Ambos foram identificados nos sítios estudados e têm implicações importantes na interpretação dos ensaios de piezocone, conforme abordado no capítulo 6.2.

As classificações dos materiais inconsolidados, normalmente apresentam incertezas elevadas na identificação, agrupamento em classes e estimativa de parâmetros. As classificações convencionais baseiam-se nas características granulométricas e de plasticidade em amostras deformadas, apresentam limitações, principalmente nos solos tropicais, onde a cimentação influencia ao comportamento geotécnico. As classificações com base na interpretação de resultados de ensaios de piezocone distinguem diferenças de comportamento à penetração do cone e, desta forma, são mais adequadas para estimativa de parâmetros geotécnicos relativos ao comportamento do solo. Além disto, os resultados dos ensaios de piezocone, pelas elevadas reprodutibilidades e frequências de registro, podem ser tratados estatisticamente para análises de variabilidade, facilitando a identificação de regiões problemáticas e orientando as etapas de detalhamento. O tratamento dos resultados dos ensaios de piezocone pela lógica fuzzy, com apresentação de perfil de classificação probabilística de ocorrência de tipos de solo, mostrou-se uma ferramenta auxiliar importante na análise do perfil. As cartas de classificação a partir de  $q_c$  e  $R_f$  são também importantes na classificação dos solos sedimentares litorâneos e das

bacias tafrogênicas, sendo válida a utilização da experiência internacional já disponível para solos sedimentares. Para os solos tropicais as cartas de classificação convencionais não são eficazes, no entanto, elas podem orientar a identificação de zonas diferenciadas, com indicação das porções mais laterizadas, conforme proposta de carta de classificação de solos tropicais com base em resultados de ensaios de piezocone, apresentada neste trabalho.

Os fatores de formação do perfil influenciam na geometria dos materiais e nas características da transição solo e rocha. Nos solos sedimentares litorâneos as camadas são bem definidas, com espessura e distribuição controladas pela morfologia da costa e pelas flutuações do nível médio do mar durante o quaternário. Os sedimentos das bacias interiores paleogênicas foram formados por leques aluviais, fluviais, lacustres e corridas de lama em ambiente terrestre semi-árido; as camadas são bem definidas, as transições entre camadas são ressaltadas nos resultados dos ensaios de piezocone, porém os sedimentos apresentam baixa seleção granulométrica devido a baixa capacidade de seleção do ambiente. Nos solos tropicais os processos de pedogênese e morfogênese alternaram-se durante o quaternário e contribuíram com as características dos perfis de solo. Nessas condições torna-se fundamental o conhecimento da constituição e estrutura do substrato rochoso e dos processos que atuaram na formação do perfil. A atuação dos processos tropicais tende a ser no rumo descendente, acompanhando a infiltração da água no solo, normalmente controlada por fraturas ou estruturas da rocha e, desta forma, as interpolações para interpretação de seções geotécnicas devem ser realizadas com cautela, evitando interpretações errôneas. Considera-se que o entendimento da história geológica dos vários tipos de terreno pressupõe a existência de estudos prévios como mapeamentos geológicos, pedológicos e geotécnicos; dados de sondagens, ensaios e monitoramentos de obras, para que possa ser criado um conhecimento básico que subsidie e oriente estudos futuros. Esses dados são ainda escassos no Brasil e o entendimento da história geológica e do comportamento geotécnico dos vários tipos de solos, fica sensivelmente prejudicado. Durante as campanhas de investigação é importante que as novas informações coletadas sejam confrontadas com o modelo geológico previsto.

A interpretação dos resultados do ensaio de piezocone sísmico, auxiliaram na diferenciação entre solos de comportamento laterítico e não-laterítico. A interpretação dos valores de  $q_c$  e  $R_f$ , e da relação  $G_0/q_c$ , a partir de resultados de ensaios de piezocone sísmico, é eficaz nesta diferenciação, especialmente em solos francamente argilosos, onde

os processos de pedogênese e iluviação de argila e formação de solos porosos, estruturados pela cimentação de hidróxidos. No entanto, a variabilidade elevada desses solos dificulta esta delimitação. A determinação da velocidade da onda sísmica é influenciada pelo método de tratamento das medições. O método da trajetória da onda é fisicamente mais correto, no entanto a sua aplicação esta ligada a um adequado conhecimento da geometria das camadas do subsolo, sendo mais recomendada aos solos sedimentares, e com limitações quando aplicadas aos solos tropicais. Neste sentido, o tratamento dos resultados de ensaios de piezocone sísmico tende a reduzir a variabilidade, pois permite a obtenção de diferentes parâmetros em diferentes escalas de sollicitação do maciço e em uma mesma posição.

As correlações entre parâmetros ou variáveis são extensivamente utilizadas para estimativa de parâmetros de projeto e são influenciadas pelas condições dos diferentes locais. A relação  $q_c/N_{SPT}$  é obtida a partir de ensaios realizados em diferentes posições do maciço e é influenciada pela variabilidade natural dos solos. Os valores de  $q_c$  e  $N_{SPT}$  são obtidos por ensaios que tem diferentes escalas de sollicitação do maciço e com frequência de registros distintas. Desta forma, a relação pode apresentar diferentes resultados em função do critério de seleção de  $q_c$  e de  $N_{SPT}$  utilizado. Os resultados apresentados mostram que a classificação do perfil em camadas (solos sedimentares) ou zonas homogêneas (solos tropicais), normalmente fornece resultados de correlação mais coerentes. Nos solos onde a estratificação é bem definida e ocorre alternância de camadas com propriedades muito distintas, os valores de  $N_{SPT}$  obtidos nas regiões de interface entre camadas não são representativos de nenhuma das camadas. Já, a relação  $G_0/q_c$ , obtida a partir dos resultados do ensaio de piezocone sísmico, minimiza os efeitos da variabilidade natural, pois os resultados são obtidos em uma mesma posição do maciço, porém com escalas de sollicitação distintas. A aplicação dos resultados dos ensaios realizados em câmaras de calibração às situações naturais apresenta restrições, pois os solos na natureza tem particularidades de constituição sensivelmente diferentes daqueles reconstituídos em laboratório para os ensaios em câmara de calibração. Nos solos tropicais a cimentação natural dos lateríticos e as estruturas reliquiares dos saprolíticos não podem ser reconstituídas em laboratório. Os processos de coleta de amostras, principalmente para os solos arenosos, são falhos no sentido de preservar as características do solo indeformado para os ensaios de laboratório, com implicações diretas nas correlações.

A interpretação dos registros de resistividade do ensaio de piezocone é influenciada diretamente pela história geológica do perfil. O sensor de resistividade normalmente fornece informações úteis na identificação do perfil estratigráfico, na definição da posição do nível de água e na detecção de fluídos intersticiais com contraste de resistividade. No ensaio de piezocone de resistividade o registro contínuo e simultâneo de  $q_c$ ,  $f_s$ ,  $u$  e *resistividade* é eficaz na avaliação de plumas de contaminação por cloreto em aquíferos sedimentares rasos, especialmente nos solos sedimentares. No entanto, em solos tropicais, onde são freqüentes remobilizações de argila e de hidróxidos de ferro e de alumínio, o registro da resistividade é falho para os estudos geoambientais, pois as determinações de resistividade são fortemente afetadas pela presença de óxidos de ferro e pela condição parcialmente saturada, comum nesses solos.

A variação das características geológicas influencia na interpretação dos valores de poro-pressão utilizando o filtro de cavidade preenchido com graxa. O registro de poro-pressão nos ensaios de piezocone é um importante recurso auxiliar na identificação do perfil estratigráfico e na estimativa de comportamento mecânico, diferenciando solos com penetração drenada dos solos com penetração não-drenada. A utilização do filtro de cavidade preenchido com graxa é efetiva e pode ser utilizada para ajudar em estudos estratigráficos em vários tipos de solo. Nos solos sedimentares muito moles o uso da graxa não se aplica pois, nestas condições a resposta do sensor é prejudicada. Nos solos sedimentares com resistências mais elevadas o uso do filtro de cavidade preenchido com graxa fornece respostas com qualidade e, nos ambientes agressivos ou muito abrasivos, é um recurso mais interessante do que o convencional. Nos solos tropicais, onde a condição parcialmente saturada pode atingir profundidades elevadas, o recurso do filtro de cavidade preenchido com graxa é vantajoso, pois evita a execução de pré-furos e possibilita o registro de  $u$  nas porções abaixo do nível d'água, informação esta importante na estimativa de certos parâmetros geotécnicos.

A utilização dos resultados dos ensaios de piezocone para os estudos geotécnicos e geoambientais ainda é incipiente no Brasil. A experiência internacional pode ser aplicada de forma consistente, principalmente em solos de origem sedimentar. Em solos de origem tropical, a experiência internacional deve ser aplicada com cautela. No capítulo de revisão da literatura foram compilados os conhecimentos internacionais básicos com destaque para interpretação e estimativa de parâmetros a partir dos resultados do ensaio de piezocone.

## **7.2 Recomendações**

Os solos tropicais são produtos de processos que atuam sobre rochas cristalinas ou sedimentares, modificando suas estruturas e constituições, resultando em perfis complexos. Os principais processos de transformação estão ligados a pedogênese e morfogênese, com expressão na morfologia dos terrenos. Desta forma, a investigação de solos tropicais deve necessariamente combinar técnicas de sondagem em campo com técnicas de mapeamentos geológico e geomorfológico, integrados pelo entendimento da história geológica de cada local.

O conhecimento da história geológica dos terrenos dependem de estudos específicos que interpretem e mantenham arquivos de dados de ensaios e mapeamentos previamente executados, além de conhecimento geológico-geotécnico profundo que permita antecipar características e condições geotécnicas e geoambientais previsíveis para cada condição de geologia. Neste sentido os trabalhos de cartografia geotécnica de detalhe, em escalas 1:10.000 e 1:25.000, que forneçam perfis estratigráficos característicos de cada região, devem ser estimulados e utilizados nas etapas prévias às investigações de detalhe em campo, como tem sido feito em alguns países.

Os ensaios de piezocone, por não produzirem amostras e por terem profundidade limitada de avanço, devem ser combinados com outras técnicas como amostragens integrais ou sondagens de simples reconhecimento criteriosas, além de sondagens rotativas para perfeita identificação das interfaces solo e rocha, quando esta informação for necessária no projeto. A posição, quantidade e tipo de ensaios utilizados na investigação devem ser criteriosamente definidas com base no entendimento da gênese e em função da localização e tipo de estrutura a ser implantada, considerando a disponibilidade de equipamentos e custos de ensaios na região a ser investigada.

Os solos sedimentares têm suas características ligadas aos ambientes e ciclos de sedimentação, normalmente com pouca expressão na morfologia superficial dos terrenos. No entanto, o conhecimento da distribuição em mapa e das características dos ambientes de formação permite antecipar as prováveis unidades geotécnicas a serem encontradas em sub-superfície, facilitando a interpretação dos ensaios de campo e laboratório.

A utilização das cartas de classificação para interpretação dos resultados dos ensaios de piezocone deve ser feita com cautela, pois as transformações produzidas pela pedogênese tropical modificam características dos solos e resultam em distribuição distinta das obtidas nos solos sedimentares. Recomenda-se a utilização da carta de solos tropicais proposta neste trabalho, porém com cautela, como indicativo, fazendo-se sempre aferições locais.

A utilização do recurso do filtro de cavidade preenchido com graxa é recomendada, principalmente nos locais com nível de água profundo. Devem ser adotados procedimentos que garantam o adequado preenchimento das cavidades do piezocone de forma a garantir registros satisfatórios de  $u$ .

A tecnologia do piezocone apresenta vantagens sobre diversos outros métodos de investigação, pois permite o acoplamento de sensores adicionais para registro de propriedades específicas. Com isto as influências da variabilidade natural são minimizadas e obtém-se um maior número de parâmetro a partir de um mesmo ensaio. Os registros de resistividade fornecem informações sobre alguns tipos de contaminante, que associado às informações estratigráficas do piezocone conduzem a campanhas de investigação eficazes. A combinação entre piezocone de resistividade e levantamentos geo-elétricos em superfície é recomendada, pois os resultados são complementares fornecendo resultados de medidas de resistividade no maciço em diferentes escalas. Os registros de ondas cisalhantes (S), nos ensaios de piezocone sísmico, contribuem efetivamente para identificação dos solos lateríticos e, além de fornecerem um parâmetro de deformação a baixa amplitude, contribuem para um melhor entendimento da variabilidade do maciço de solo.

### **7.3 Sugestões para continuidade**

O uso da tecnologia do piezocone é recente e pouco difundida no Brasil, estando normalmente restrita a projetos de grande porte em solos moles. Os resultados desta pesquisa mostram que essa ferramenta pode ser utilizada de forma mais abrangente, pois fornece informações mais precisas e permite um adequado tratamento da variabilidade do maciço de solo. A utilização corriqueira da tecnologia depende de desenvolvimentos na



produção de equipamentos nacionais e de pesquisas que desenvolvam técnicas de interpretação dos resultados dos ensaios de piezocone para as condições de solos brasileiros, que seriam áreas com potencial para continuidade das pesquisas.

A qualidade da interpretação do resultado das sondagens e ensaios geotécnicos dependem do adequado entendimento do contexto e história geológica. Trabalhos de integração das informações geológicas e geotécnicas, em equipes multidisciplinares, devem ser estimulados.

## 8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AAS, G; LACASSE,S.; LUNNE, T.; HOEG,K (1986) **Use of Insitu tests for Foundation Design on Clay**. ASCE Special Conference, 1986, p.1-30.
- ABNT (1990) MB-3406 - *Solo* – **Ensaio de Penetração de Cone In Situ CPT, Método de ensaio**, CB-O2, 10 p.
- ABNT (1980) NB-6484 – **Execução de sondagem de simples reconhecimento de solos, 1980**.
- AGS (1994) **Electronic Transfer of Geotechnical Data from Ground Investigations**. Association of Geotechnical Specialists, London, 1994.
- AJAYI, L.A & BALOGUN, L. A. (1988) **Penetration Testing in tropical lateritic and residual soils – Nigerian experience**. Penetration Testing, ISOPT 1 – 1988 – Roterdan, Vol.1, pp. 315-328
- AKCA, N. (2003) **Correlation of SPT-CPT data from the United Arab Emirates**. Engineering Geology, 67, p.219-231.
- AMOROSI, A & MARCHI, N. (1999) **High-resolution sequence stratigraphy from piezocone tests: na example from the Late Quaternary deposits of the southeaster Po Plain**. Sedimentary Geology, V. 128, pp. 67-81
- ANDRADE, A C.S.; DOMINGUEZ,J.M.L.; MARTIN,L.; BITTENCOURT, AC.S.P. (2003) **Quaternary evolution of the Caravelas strandplain – Southern Bahia State – Brazil**. Anais Acad. Bras. Ciencias. N.75, V.3, pp. 357-382.
- ANGULO,R.J. & LESSA, G.C. (1997) **The brasilian sea-level curves: a critical review with enpkasis on the curves from the Paranaguá and Cananéia regions**. Mar. Geol. 140: 141-166.

- ARCHIE, G. E. (1942) **The Electrical Resistivity Log as an aid in determining some reservoir characteristics**. AIME, V. 146.
- ASTM D 1125 (1982) **Standard test Method for Electrical Conductivity and Resistivity of Water**, Section 11.01, Water, pp. 149-156
- ASTM D4428 (1984) **"Standard Test Methods for Crosshole Seismic Testing"**, *American Society for Testing Materials*, pp. 885-898.
- BALDI, G., BELLOTTI, R., GHIONNA, V. JAMIOLKOWSKI, M., PASQUALINI, E. (1986) **Drained Penetration of sand**. Proc. IV Int. Geot. Seminar, Singapore (2<sup>nd</sup> part).
- BALDI, G; BELLOTTI, R.; GHIONNA, V; JAMIOLKOWSKI, M. and PASQUALINI, E (1982) **Design parameters for sand from CPT**. Proc. ISOPT 2 – Amsterdam, V. 11, pp. 425-432
- BALIGH, M. M. (1985) – **Strain Path Method** – Journal of Geotechnical Engineering, Vol 111, No. 9, p.1108-1137.
- BALIGH, M. M. (1986a) – **Undrained deep penetration, II: pore pressures** – Geotechnique 36, No. 4, 487-501.
- BALIGH, M. M. (1986b) – **Undrained deep penetration, I: shear stresses** – Geotechnique 36, No. 4, 471-486.
- BALIGH, M. M; LEVADOUX, J.N. (1980) **Pore pressure dissipation after cone penetration**. Research Report R80 -11, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- BANDINI, P. & SALGADO, R. (1998) – **Methods of pile design based on CPT and SPT results** – Geotechnical Site Characterization, Robertson & Mayne – Balkema, Rotterdam, p.967-976.
- BEGGEMANN, H. K. S. (1953) **“Improved method of determining resistance to adhesion by sounding through a loose sleeve placed behind the cone”**, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zurich, vol. 1, pp. 213-217.
- BEGGEMANN, H. K. S. (1965) **“The friction jacket as an aid in determining the soil profile”**, Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, vol. 1, pp. 17-20.
- BELINCANTA, A (1985) **Energia Dinâmica no SPT, Resultados de uma Investigação Teórico-Experimental**. Dissertação ( Mestrado ). Escola Politécnica da USP. São Paulo, 1985

- BELLOTTI, R.; BIZZI, G.; GHIONNA, V.(1982) **Design, construction and use of a calibration chamber.** Proc. ESOPT-II, pp.439-446, Amsterdam.
- BIGARELLA, J.J. (1975) **The Barreiras Group in Northeastern Brazil.** An.Acad.Bras.Cien., V.47, p.365-393.
- BIGARELLA, J.J. & SALAMUNI, R. (1962) Caracteres texturais dos sedimentos da Bacia de Curitiba, Boletim da UFPR Geologia, Curitiba, n.7, p.1-164.
- BIGARELLA, J.J.; MOUSINHO, M.R. & SILVA, J.K. (1965) **Pediplanos, pedimentos e seus depósitos correlatos no Brasil.** Boletim Paranaense de Geografia, n. 16/17, pp. 117-152, Curitiba
- BIGARELLA, J.J.; BECKER, R.D. & SANTOS, G.F. (1994) **Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais e Subtropicais – Vol 1 – Fundamentos Geológicos-geográficos, Alteração Química e Física das Rochas, Relevo Cárstico e Dômico.** 425 pp – editora da UFSC – Florianópolis-SC
- BOLINELLI JÚNIOR, H.L. (2004) **Piezocone de resistividade: primeiros resultados de investigação geoambiental em solos tropicais.** Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Unesp, Bauru – SP, 147p.
- BRANCO, C.J.M.C.; MIGUEL,M.G.; PINESE,P.P.; TEIXEIRA,R.S.(1998) **Implantação do Campo Experimental de Engenharia Geotécnica no Câmpus da UEL.** Anais XI CBMSEG, V.2.
- BRAND, E. W. (1985) **Geotechnical Engineering in Tropical residual Soils.** Tropicals 85 – V. 3, pp. 23-91 – Brasília, 1985
- BURNS, S. E.; MAYNE, P.W. (2002) **Analytical cavity expansion-critical state model for piezocone dissipation in fine-grained soils,** *Soils and Foundations* , v.42, n.2, 131-137.
- BURNS, S. E.; MAYNE, P. W. (1998a) – **Monotonic and dilatatory pore-pressure decay during piezocone tests in clay** – Can. Geotech. J. 35: 1063-1073.
- BURNS, S.E. & MAYNE, PW (1998b) **Penetrometers for soil permeability and chemical detection.** Georgia Institute Technology, 144 p. National Science Foundation and US Army Research Office.
- BURNS, S.E.; MAYNE, P.W. (2002) **Interpretation of Seismic Piezocone Results for the Estimation of Hydraulic Conductivity in Clays.** Technical Note - Geotechnical Testing Journal, V.25, n.3, pp. 334-341

- BUTCHER, A P. & POWELL, J.J.M.(1996) **Practical considerations for field geophysical techniques used to assess ground stiffness**. Advances in site investigation practice. Thomas Telford, London, 1996, p.701-714.
- CAMPANELLA, R. G. & ROBERTSON, P. K. (1988) – **Current status of the piezocone test** – First International Symposium on Penetration Testing, p.1-24.
- CAMPANELLA, R. G. & WEEMEES, I. (1990) – **Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies** – Can. Geotech. J.27, 557-567.
- CAMPANELLA, R. G., DAVIES, M. P., KRISTIANSEN, H. & DANIEL, C. (1998): **Site characterization of soil deposits using recent advances in piezocone technology**. Proc of 1<sup>st</sup> Intern. Conf. Site Characterization – ISC’ 98, Atlanta, p. 995 – 1000.
- CAMPANELLA, R. G.; ROBERTSON, P. K.; GILLESPIE, D. (1986) **Seismic Cone Penetration Test**. ASCE, Geotechnical Eng. Div. Journal, Special Publ N.86, p.116-129.
- CAMPANELLA, R.G. & WICKREMESINGHE, D (1988) **Applications of statistical methods in site characterization**, Special Session, ISOPT 1.
- CAMPANELLA, R.G., DAVIES, M.P., KRISTIANSEN, H., DANIEL, C. (1998) **Site characterization of soil deposits using recent advances in piezocone technology**. Geotechnical Site Characterization. ISC’98, V. 2, pp. 1001-1006.
- CAMPANELLA, R.G.; ROBERTSON, P.K. AND GILLESPIE, D (1983) **Cone penetration testing in deltaic soils**. Canadian Geotechnical Journal, 20(1) pp. 23-35.
- CARMO, I.O & VASCONCELOS, P. (2004) **Geochronological evidence for pervasive Miocene weathering, Minas Gerais, Brazil**. Earth Surface Process and Landforms, V. 29 , n.11 pp 1303 – 1320.
- CARTER, M. & BENTLEY, S.P. (1991) **Correlation of Soil Properties**. 130 p. Pentech Press, London
- CARVALHO, D; ALBUQUERQUE, P.J.R. & GIACHETI, LH (2000) **Campo experimental para estudos de mecânica de solos e fundações em Campinas-SP**. Anais do SEFE IV, São Paulo, V.3, p. 90-100.
- CAVALCANTE, E.H., GIACHETI, L.H. 7 BEZERRA, R.L. (2005) **Parâmetros geotécnicos e previsão de capacidade de carga de estacas apiloadas em solo tropical arenoso obtidos com o pressiômetro Menard**, Solos e Rochas, V.28, N. 1, p. 91-116.
- CESTARI, F. (1990) **Prove Geotecniche in sito**. 401 p. Ed Geo-Graph – Segrate, Italy

- CHANG, M. F.; TEH, C. I. & CAO, L. F. (2001) – **Application of Cavity Expansion Theory to the Interpretation of Piezocone Test in Clay** – CSE Research Bulletin No. 14, p.
- CHANG, M.F. (1990) **In-situ testing of residual soils in Singapura**. Proc. II Int. Conf. Geomechanics in Tropical Soils, V. 1, pp. 97-108, Singapore, 1988
- CHAPMAN, G. & DONALD, K. (1981) **Interpretation of static penetration tests in sand**. Proc. 10<sup>th</sup> ICSMFE, stockholm, 2:455-458.
- CHEN, B.S.Y. & MAYNE, P.W. (1994) **Profiling the overconsolidation ratio of Clays by Piezocone Tests**. Report 94-1, Georgia Tech, Atlanta.
- CHEN, B.S.Y. & MAYNE, P.W. (1996) **Statistical relationship between piezocone measurements and stress history of clays**. Can Geotech. J., V. 33, pp. 488-498.
- CHENG-HOU, Z.; GREEUW, G.; JEKEL, J.; ROSEMBRANDT, W. (1990) **A New Classification chart for soft soils using the piezocone test**. Environmental Geology, V. 29, pp. 3147
- CHRISTY, C. D.; CHRISTY, T. M. & WITTING, V. (1994) – **A Percussion Probing Tool for the Direct Sensing of Soil Conductivity** – Geoprobe Systems, p.1-14
- COOKE, R.U. & DOORNKAMP, J.C. (1990) **Geomorphology in Environmental Management**. Claredon Press, Oxford, 410 p.
- CUNHA, R.P.; PEREIRA, J.H.F.; SOARES, J.M.; MOTA, N.M.B.; POULOS, H.G. (2001) **Backanalyses of Field loading tests on Deep Foundations in a Tropical Clay**. XV ICSMGE, Istanbul, V. 2, pp.869-872.
- DANIEL, C. R.; GIACHETI, H. L.; HOWIE, J. A. & CAMPANELLA, R. G. (1999) **Resistivity Piezocone (RCPTU) Data Interpretation and Potential Applications**. Proc. of the XI Pan. Conf. on Soil Mech. and Geotech. Eng., Foz do Iguaçu, V. 1, pp. 361-368.
- DAVIES, M. P. & CAMPANELLA, R. G. (1995) – **Piezocone Technology: Downhole Geophysics for the Geoenvironmental Characterization of soil**. Proc. SAGEEP 95 Orlando
- DE BEER, E. E. (1963) – **The scale effects in the transposition of the results of deep-sounding tests on the ultimate bearing capacity of piles and caisson foundations**. Geotechnique, 13(1): 39-75.
- DE GRAAF, H.C. VAN AND ZUIDBERG, H.M (1985) **Field investigations**. The Netherlands Commemorative Volume XI ICSMFE, 1985, 29-52

- DE MIO, G.; MONDELLI, G.; GIACHETI, H.L.(2004) **Ensaio de piezocone com filtro de cavidade na investigação de solos tropicais**. 5 NSAT, São Carlos, 2004. p. 31-38.
- DE RUITER, (1971) **Electric Penetrometer for site investigations**. Journal Soil Mechanics and Foundation Division – ASCE, SM 2 – 97, pp.457-472.
- DEARMAN, W.R., SERGEEV,, E.M., SHIBAKOVA, V.S. (1989) **Engineering Geology of the Earth**. Nauka Publishers, Moscow, 1989, 247 p.
- DILLEMBURG, S.R.; ESTEVES, S.L.; TOMAZELLI, L.J. (2004) **A Critical evaluation of erosion in Rio Grande do Sul, Southern Brasil**. Anais Acad. Bras. Ciencias, N. 74, V.3, pp. 611-623.
- DOUGLAS, B.J. & OLSEN, R.S. (1981) **Soil Classification using electric cone penetrometer**. Cone Penetration Testing and Experience. Proc. ASCE, St Louis, 209-227.
- EINSTEIN, H. H.; BAECHER, G. B. (1982) – **Probabilistic and Statistical Methods in Engineering Geology** – Rock Mechanics, p.47-61.
- ELMGREEN, K. (1995) **Slot-type pore pressure CPT-u filters. Behaviour of different filling media**. CPT'95 LinKöping, V. 2, pp. 9-12.
- ESLAMI, A.; FELLENIUS, B. H. (1997) – **Pile capacity by direct CPT and CPTu methods applied to 102 case histories** – Can. Geotech. J. 34: 886-904.
- FAPESP Processo n. 03/05024-3 (2003) **Implantação e desenvolvimento do ensaio de piezocone sísmico para investigação de solos tropicais**- Relatório Final de Pesquisa, Bauru/SP.
- FELLENIUS, B. H. & ESLAMI, A. (2000): **Soil Profile Interpreted from CPTU data**. Year 2000 Geotechnics – Geotechnical Engineering Conference, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand. 18 p.
- FENTON, G.A (1999) **Randon filed modeling of CPT data**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 125(6):486-498.
- FERNADES, L.A.(1998) **Estratigrafia e evolução geológica da parte oriental da bacia Bauru (Ks, Brasil)**. Tese de Doutorado, USP – IG, São Paulo.
- FERREIRA, C. V., ALBIERO, J. H., LOBO, A. S. & CARVALHO, D. (1998) **Correlações entre o Atrito Lateral Medido em Provas de Carga, em Estacas Apiloadas, Instrumentadas e Resultados de Ensaio SPT-T e CPT**, *Solos e Rochas*, v.21, n. 1, pp. 3-18.

- FERREIRA, H.N. (1985) **Characterization, Identification and Classification of Tropical Lateritic and saprolitic Soils for Geotechnical Purposes.** Tropicals 85, V. 3, pp 139-170. Brasilia, 1985.
- FINKE, K. A.; MAYNE, P. W.; KLOPP, R. A.(2001) – **Piezocone Penetration Testing in Atlantic Piedmont Residuum** – Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, V.127, p.48-54.
- GHINELLI, A. & VANNUCCHI, G. (1988) – **Statistical analysis of cone penetration testing: An application** – Penetration Testing, ISOPT-1, De Ruiter (ed.) / Balkema, Rotterdam, p.757-769.
- GIACHETI, H. L. (2001): **Os ensaios de campo na investigação do subsolo: Estudos e considerações quanto à aplicação em solos tropicais**, Tese de Livre Docência, FEB-Unesp, Bauru/SP.
- GIACHETI, H. L.; FERREIRA, C. V.; CARVALHO, D.(1999) – **In-Situ Testing Methods for Characterization of Brazilian Tropical Soils.** XI Pan Conf Soil Mechanics and Found. Eng. , p.307-314.
- GIACHETI, H.L. & CARVALHO, D. (1994) **Estimativa do módulo de cisalhamento de dois solos tropicais típicos a partir de ensaios de penetração.** X CBMSEF, Foz do Iguaçu/PR, V.2:467-474.
- GIACHETI, H.L. & ESQUIVEL, E.R. (2001) **Correlações entre o atrito lateral medido em provas de carga, em estacas apiloadas, instrumentadas e resultados de ensaios SPT-T e CPT**, Discussão, Solos e Rochas, v. 24, n. 2, pp 171-174.
- GIACHETI, H.L. (1991) **Estudo experimental de parâmetros dinâmicos de alguns solos tropicais do Estado de São Paulo**, tese de Doutorado, EESC-USP, São Carlos/SP, 232 p.
- GIACHETI, H.L. (2005) **Relatório de auxílio a pesquisa, FAPESP**, Processo no 03/05024-3, 137 p. Bauru, SP, Brasil.
- GIDIGASU, M.D. (1990) **Geomechanics in Tropical Soils: General Report.** Proc. II Int. Conf. Geomechanics in Tropical Soils, V. 1, pp. 495-505, Singapore, 1988
- GILL, D.R. & LEHANNE, B.M. (2000) **Extending the strain path method analogy for modelling penetrometer installation.** Int. J. Numer.Anal. Meth.Geomech., 2000, V. 24, pp. 477-489
- GILLESPIE, D, G, (1990) **Evaluating shear wave velocity and pore-pressure data from the seismic cone penetration test**, PhD Thesis, 201 p. University of British Columbia, Canadá



- GODOY, N.S. (1999) **Correlações entre o Atrito Lateral medido em provas de carga, em estacas apiloadas, instrumentadas e resultados de ensaios SPT-T e CPT**, Discussão, Solos e Rochas, v. 22, n. 2, pp 137-139.
- GUI, M. W. & BOLTON, M. D. (1998) – **Geometry and scale effects in CPT and pile design** – Geotechnical Site Characterization, Robertson & Mayne (eds), p.1063-1068.
- GUPTA, R. C. & DAVIDSON, J. L. (1986) – **Piezoprobe Determined Coefficient of Consolidation** – Soils And Foundations, v.26, n. 3, p.12-22.
- HANDY, R.L. (1978) **Realism in Site Investigation: Past, Present, Future and Then Some**. Symposim on Site exploration in soft ground using In-situ Techniques, Alexandria, 1-25. FHWA-TS-80-202.
- HEGAZY, Y.A (1998) **Delineating Geostratigraphy by Cluster Analysis of Piezocone Data**. PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, 464 p.
- HEGAZY, Y.A; MAYNE,P.W. & ROUHANI, S. (1991) **Geostatistical Assessment of Spatial Variability in Piezocone tests**. Simp. Uncertainty in Geologic Environment. p.254-268.
- HOULSBY, G. T. & TEH, C. I. (1988) – **Analysis of the piezocone in clay** – Penetration Testing, ISOPT-1, De Ruyter (ed.) / Balkema, Rotterdam, p.777-783.
- IGNATIUS, S.G. (1991) **Solos tropicais: proposta de índice classificatório**, Solos e Rochas, São paulo, 14(2), p. 89-93.
- ISAAKS, E.H. & SRIVASTAVA, R.M.(1989) **An Introduction to Applied Geostatistics**. 561 p Oxford University Press
- JACOBS, P. (1996) **Cone Penetration Testing – Simplified Description of the use and Design Methods for CPTs in Ground Engineering**. Fugro Ltd, United Kingdom, 37 p.
- JACOBS, P.A & BUTCHER, A P.(1996) **The development of the seismic cone penetration test and its use in geotechnical engineering**. Advances in site investigation practice. Thomas Telford, London, 1996, p.397-405.
- JAKSA, M.B.; BROOKER, P.I.; KAGGWA, W.S. (1997) **Inaccuracies associated with estimating Random measurements errors**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering, V.123, N.5 p. 393-401.
- JAKSA, M.B.; KAGGWA, W.S. & BROOKER, P.I. (2002) **Inaccuracies associated with estimating random measurement errors**. Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, V.123 N. 5, pp393-401

- JAKY, J. (1944) **The coefficient of earth pressure at rest**. Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers. October:355-358
- JAMIOLKOWSK, M.; GHIONNA, V. N.; LANCELLOTTA, R.; & PASQUALINI, E. (1988) – **New correlations of penetration tests for design practice** –Penetration Testing 1988, ISOPT-1, De Ruiter / Balkema, Rotterdam, p.263-296.
- JAMIOLKOWSKI, M.; LANCELLOTTA, R.; TORDELLA, L.; & BATTAGLIO, M. (1982) – **Undrained strenght from CPT** –Proceedings of the Second European on Penetration Testing/ Amsterdam, p. 599-606.
- JEFFERIES, M. G. & DAVIES, M. P. (1993). “**Use of CPTU to estimate equivalent SPT  $N_{60}$** ”, Geotechnical Testing Journal, vol. 16, n°. 4, pp. 458-468.
- KABIR, M.G & LUTNEGGER, A.J.(1990) – **In situ estimation of the coefficient of consolidation in clays** - Can. Geotech. J. 27: 58-67.
- KARAKOUZIAN, M; AVAR, B.B.; HUDYMA, N.; MOSS, J.A (2003) **Field measurements of shear strenght of an underconsolidated marine clay**. Engineering Geology, V.67 , pp. 233-242.
- KEAVENY, J.M. & MITCHELL, J.K. (1986) **Strength of fine-grained soils using the piezocone**. Proc. Use of In-situ tests in geotechnical Engineering (In situ,86) ASCE, Geotechnical Special Publication N. 6, New York, PP.668-685.
- KIN, DS; BANG, ES and KIM,WC (2004) **Evaluation of various downhole data reduction methods for obtaining reliable VS profiles**. Geotechnical Testing Journal, v. 27, n. 6, pp.585-597.
- KONRAD, J.M. & LAW, K.T. (1987) **Undrained shear strength from piezocone tests**. Canadian Geotechnical Journal, 24: 392-405.
- KOTZIAS, P. C. & STAMATOPOULOS, A. C. (1999) – **Statistical to Fuzzy Approach Toward CPT Soil Classification** – Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, p.577-579.
- KULHAWY, F.H. & PHOON, K.K. (1996) **Engineering judgement in the evolution from deterministic to reliability-based foundation design**. In: Symp.Uncertainty in the geologic environment – From Theory to Practice, p. 29-48, New York.
- KULHAWY, F.H.; JACKSON, C.S.; MAYNE, P. W. (1989) **First order estimation of  $K_0$  in sands and clays**.

- LACASSE, S. & NADIM, F. (1996) **Uncertainties in Characterising Soil Properties**. Uncertainty in Geologic Environment, pp.49-75
- LADD, C.C. & DA RE, G. (1999) **Discussion on Duncan (1999)** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. V. 126, N. 5.
- LAMBE, T.W. & WHITMAN, R. V. (1966) **Soil Mechanics**. John Wiley and Sons, New York, 553 p.
- LARSON, R. (1995) **Use of a slot as filter in piezocne tests**. Proced. CPT'95, LinKöping, V. 2, pp 35-40.
- LEDRU, M-P, BRAGA, P.I.S., SOUBIÈS, F. FOURNIER, M, MARTIN, L. SUGUIO, K. TURCQ, B. (1996) **The last 50,000 years in the Neotropics (Southern Brazil): evolution of veetation and climate**. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 123: 239-257.
- LESSA, G & ANGULO, R.J (1995) **A proposed model for the stratigraphy and evolution of the Paranaguá coastal plain – Paraná, Brazil**. V Cong. ABEQUA, XI Simp. Sedimentologia Costeira. pp 92-98, Niterói, RJ.
- LUMB, P. (1974) **Application of statistics in soil mechanics**. pp. 44-112 in Soil Mechanics: New Horizons, London.
- LUNNE, T.; CHRISTOFFERSEN, H.P.; TJELTA, T.I. (1996) **Engineering use of Piezocone data in North sea clays**. pp.907-912
- LUNNE, T.; ROBERTSON, P.K. & POWELL,J.J.M. (1997) **Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice**, 312 p. E. & FN SPON Editors
- MACHADO, S.L.(1998) **Aplicação de Conceitos de Elastoplasticidade a Solos não Saturados**, Tese de Doutorado - EESC-USP, São Carlos – SP, 1998.
- MARINHO, F.A.M. (2001) **Conceptos de medicion de succion en suelos y materiales porosos**. Revista Geotecnia, N.7, pp. 3-7, Bolivia
- MARTIN, L. & SUGUIO, K. (1986) **Coastal Quaternary Deposits of the states of Paraná and santa Catarina**. In: International Symposium on Sea Level changes and quaternary shorelines. São Paulo, 1986 Special Publication, V. 1, 124 p.
- MASSAD F. 1988. **História geológica e propriedades dos solos das baixadas**. Simp Dep Quatern Baix Litor. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1: 3.1-3.33.

- MASSAD, F; SUGUIO, K.; PEREZ, F.S. (1996) **Propriedades geotécnicas de sedimentos argilosos como evidência de variações do nível relativo do mar em Santos**. 8 CBGE, pp. 163-177. Rio de Janeiro.
- MATTHEWS, M.C.; HOPE, V.S.; CLAYTON, C.R.L. (1996) **The use of surface waves in the determination of ground stiffness profiles**. Proc. Int. Civ. Eng. Geotechn Engng, V. 119, p.84-95
- MAYNE, P. W.; BURNS, S. E. (2000) – **Na approach to evaluation of field CPTU dissipation data in overconsolidated fine-grained soils: Discussion** – Can. Geotech. J. 37: 1395-1397.
- MAYNE, P.W & RIX, G.J. (1993) **G<sub>max</sub> – q<sub>c</sub> relationships for clays**. Geotechnical Testing Journal, V.16, N.1 pp. 54-60
- MAYNE, P.W. & KULHAWY, M. (1982) **K<sub>0</sub> – OCR Relationships in Soil**. Journal of Geotechnical Engineering Division – ASCE. Vol. 108, N. GT6, pp.851-872.
- MAYNE, P.W. (2002) **Flow Properties from Piezocone Dissipation Tests**. Georgia Tech Institute, USA. Internal Publication.
- MAYNE, P.W. & DUMAS, C. (1998) **Enhanced in Situ Geotechnical Testing for Bridge Foundation Analysis** – Transportation Research Record 1569.
- MELFI, A. J.; PICCIRILLO, E.M.; NARDY, A. J.R. (1988) **Geological and Magmatic aspects of the Paraná Basin – An introduction**. IN: The Mesozoic Flood Volcanism of the Paraná Basin, pp. 1-13. Ed. Piccirillo, E.M. and Melfi, <sup>a</sup>J. USP-IAG – São Paulo
- MELLO, C.L.; METELO, C.M.S; SUGUIO, K; KOHLER, H.C. (1999) **Quaternary sedimentation, neotectonics and the evolution of the Doce River Middle valley Lake system (Southeastern Brazil)**. Revista Instituto Geológico, IG São paulo, 20(1/2), 29-36.
- MIGUEL, M.G.; BELINCANTA, <sup>a</sup>; BRANCO, C.J.M.C.; PINESE, P.P.; TEIXEIRA, R.S. (2002) **Caracterização Geotécnica do sub-solo da cidade de Londrina-PR**. 10<sup>o</sup> CBGEA, Ouro Preto. Publicação Digital.
- MLYNAREK, Z. & TSCHUSCHKE, W. (2001) – **The CPTU classification chart for the post-flotation sediments based on statistical criteria** – Proc. XV ICSMGE, Istanbul, 2001 , V.1 pp. 459-462.
- MONACCI, M.D. (1995) Estudo de colapsividade de um solo do Campo Experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola-Unicamp. Dissertação de Mestrado, Feagri-Unicamp, 142 p.

- MONACCI, M.D.; CARVALHO, D. E ALBUQUERQUE, P.J.R (1997) **Análise da colapsividade de um solo residual de diabásio da região de Campinas.** 3 Simp. Solos Não Saturados, V.1 p 113-119, Rio de Janeiro
- MONDELLI, G. (2001) **Ensaio de Piezocone em solos tropicais: calibração e interpretação.** Relatório de Pesquisa – Fapesp.- FEB – Unesp, Bauru.
- MORGENSTERN, N. R. (1974) – **Managing risk in geotechnical engineering. Conference on Risk Assessment, V. p.102-126.**
- MORRISON, R.B. (1978) Quaternary soil stratigraphy: concepts, methods and problems, pp.77-108. Quaternary soils, Geoabstracts, England.
- MORRISON, R.B. (1995) **Quaternary Erosion-Deposition-Stability (EDS) cycles.**
- MOSS, R.E.S.(2003) **CPT-Based probabilistic Assessment of seismic soil liquefaction Initiation.** PhD Thesis – University of California – Berkeley, 133 p.
- MOTA, N.M.B. (2003) **Ensaio avançado de campo na argila porosa não-saturada de Brasília: interpretação e aplicações em projetos de fundações.** Tese Doutorado – UnB – Brasília.
- MULABIDIC, M (1998) **Comparison of piezocone, Marchetti dilatometer and vane test results for the Danube-Sava Canal.**
- NESBIT & YOUNG (1984) Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, V. 48: 1523-1534, USA.
- NICHOLLS, R A; PYCROFT, A. S.; PALMER, M. J. & FRAME, J. A. (1996) **From Paper to silicon chip – The growing art of computerised data management.** Advances in site investigation practice, Thomas Telford – London, 1996, p. 186-197
- NOBRE, M. M.; SYKES, J. F. (1992) – **Application of Bayesian Kriging to subsurface characterization** – *Can. Geotech. J.* 29, 589-598
- NOGAMI, J.S. & VILLIBOR, D.F. (1981) **Uma nova classificação de solos pra finalidades rodoviárias.** Anais Simp. Bras. Solos Tropicais em Engenharia. V.1 pp.30-41 – COPPE\_UFRJ
- NOGAMI, J.S. & VILLIBOR, D.F. (1983) **Os solos tropicais Lateríticos e Saprolíticos e a Pavimentação.** Anais 18 RAP – Porto Alegre, V. 2, p.463-484

- NOGAMI, J.S. & VILLIBOR, D.F. (1985) **Pavimentação de Baixo custo com solos lateríticos. 213 p** – São Paulo
- O'BRIEN, F.I. & BUOL, S.W. (1984) **Physical transformation in a vertical soil-saprolite sequence.** Soil Sci. Soc. Am. J. 48:354-357.
- OLSEN, R.S. & MALONE, P.G. (1988) Soil classification and site characterization using the cone penetration test. Proc. ISOPT 1, Orlando (USA).
- ORTIGÃO, J.A.R.; CUNHA, R.P. and ALVES, L.S. (1996) **In situ tests in Brasília porous clay.** Canadian Geotechnical Journal V.33 pp.189-198
- PARKIN, A.K. & LUNNE T. (1982) **Boundary effects in the laboratory calibration of cone penetrometer for sand.** Norwegian Geotechnical Institute, Publication 138: 1-7.
- PARKIN, A.K. (1988) – **The calibration of cone penetrometers** – Penetration Testing, ISOPT-1, De Ruyter (ed) Balkema, Rotterdam, p.221-243.
- PARSONS, R.L. & FROST, J.D. (2002) – **GISS-ASSES: A spatial analysis tool for site investigation planning and evaluation** – Geotechnical Site Characterization, Robertson & Mayne (eds)/ Balkema, Rotterdam, p.251-256.
- PECK, R.B. (1969) **Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics,** Géotechnique, 19(2), pp. 171-187.
- PEIXOTO, A.S.P. (2001) **Estudo do ensaio SPT-T e sua aplicação na prática de engenharia de fundações.** Tese de doutoramento, Feagri - Unicamp, Campinas, 2001.
- PEREZ, J. & FAURIEL, E. (1988) **Le Piézocône Améliorations Apportées à la Reconnaissance de Sols.** Revue Française de Géotech, Vol. 44, pp. 13-27
- PETRI, S. & FULFARO, V.J. (1980) **Geologia do Brasil: Fanerozoico.** Edusp, São paulo, 631 p.
- PHOON, K.K. & KULHAWY, F.H. (1999) **Characterization of geotechnical variability.** Can, Geotech, J. V.36, p 612-624.
- PHOON, K.K.; QUEK, S.T.; AN, P. (2003) **Identification of Statistically Homogeneous soil layers using Modified Bartlett Statistics.** Journal of Geotechn and Geoenviron. Eng. ASCE, 649-659.
- PINNADUWA, H.S.; KULATILAKE, W. & JEONG-GI, U (2003) **Spatial variation of cone tip resistance for the clay site at Texas A&M University** – Technical Note. Geotechnical and Geological Engineering, 21: p. 149-165

- PORSANI, J. L. (2003) **Instalação de área para testes controlados de geofísica rasa no IAG/USP**. III Workshop de Geofísica Aplicada à Engenharia e Meio Ambiente, p 1-4. SBGF, ABGE, São Paulo, 2003.
- PORSANI, J.L.; BORGES, W.R; ELIS, V.R.; DIOGO,L.A.; HODO, F.Y; MARRANO, A. & BIRELLI, C.A. (2004) **Investigações geofísicas de superfície e de poço no Sítio controlado de Geofísica rasa do IAG-USP**. Revista Brasileira de Geofísica, V.22, n. 3, p. 1-37, 2004.
- PRADO, H (1991) **Manejo dos solos: Descrições pedológicas e suas implicações**. 117 p. Ed. Nobel, São Paulo.
- RICCOMINI, C. (1989). **O rift continental do sudeste do Brasil**. São Paulo. Tese de Doutorado – Instituto de Geociências. USP. São Paulo, 256 p.
- RINALDI, V. A. REDOLFI, E. R.; SANTAMARINA, J. C.(1998) – **Characterization of collapsible soils with combined geophysical and penetration testing** – Geotechnical Site Characterization, Robertson & Mayne (eds)/ Balkema, Rotterdam, p. 581-588.
- ROBERTSON PK, CAMPANELLA RG, GILLESPIE D and GREIG J. 1986. **Use of piezometer cone data**, Proc. In-Situ-86, ASCE Specialty Conference, p. 1263-1280.
- ROBERTSON, P. K. & CAMPANELLA, R.G. (1983) **Interpretation of cone penetration tests. Part 1: Sand, Part 2: Clay**. Canadian Geotechnical Journal, V. 20 N. 4 pp 718- 745
- ROBERTSON, P. K. (1990) – **Soil classification using the cone penetration test** – Can. Geotech. J. 27, p.151-158.
- ROBERTSON, P. K. (1998) – **Cone Penetration Testing – Geotechnical Applications Guide**, First Edition; p. 1-37.
- ROBERTSON, P. K.; CAMPANELLA, R. G. & GILLESPIE, D. (1988) – **Excess Pore Pressures and the flat Dilatometer Test** – First International Symposium on Penetration testing, p.42-50.
- ROBERTSON, P. K.; SULLY, J. P.; WOELLER, D. J.;LUNNE, T.; POWELL, J. J. M. & GILLESPIE, D. G. (1992) – **Estimating coefficient of consolidation from piezocone tests** – Can. Geotech. J. 29, p.539-550.
- ROBERTSON, P.K.; CAMPANELLA, R.G.; WIGHTMAN,A.(1983) **SPT-CPT Correlations**. Journal of Geotechnical Engineering, V.109, N,11, p. 1449-1499.

- ROBERTSON, P.K.; CAMPANELLA, R.G; GILLESPIE, D. & GREIG, J. (1986): **Use of piezometer cone data**. Proc. In-Situ-86, ASCE Specialty Conference, pp. 1263-1280.
- ROCHA FO, P & CARVALHO, J.B.Q. (1990) **Building Foundation in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils**. Proc. II Int. Conf. Geomechanics in Tropical Soils, V. 1, pp. 587-601, Singapore, 1988
- ROJAS, J.C. (2001) **Conceptos básicos de mecánica de suelos no-saturados**. Revista Geotecnia, N. 6, pp. 5-8, Bolivia
- RONOLD, K. O. & BJERAGER, P.(1992) – **Model uncertainty Representation in Geotechnical Reliability Analyses** – Journal of Geotechnical Engineering, vol 118, N° 3, p.363-376.
- SCHMERTMANN, J.H. (1976) **An updated correlation between relative density, Dr and Fugro-type electric cone bearing, qc** – Department of Civil Engineering Report, University of Florida.
- SCHMERTMANN, J.H. (1978) **Guidelines for Cone Penetration Test Performance and Design**. Report FHWA-TS-78-209, U.S. Dept. of Transportation; Federal Highway Adm.; Washington D.C.
- SCHMERTMANN, J.H. (1985) **Measure and use of the in situ lateral stress**. Osterbeg Volume, Internal Publication Northwestern University.
- SCHNAID, F. (2000): **Ensaio de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações**. Oficina de Textos, São Paulo, 189 pp.
- SCHNAID, F. (2005) **Geocharacterization and properties of natural soils by in situ test**. 16 ICSMGE, Osaka, Japan, V.1 , Plenary section. CD publication.
- SCHNAID, F., CONSOLI, N.C. & AVERBECK, J.H. (1998) **Aspects of cone penetration in natural weakly-cemented deposits**, Geotechnical Site Characterization, Atlanta, 1998, Balkema, V.2, pp. 1159-1163.
- SCHNEIDER, J. A.; MAYNE, P.W. and RIX, G.L. (2001) **Geotechnical site characterization in the greater Memphis area using cone penetration tests**. Engineering Geology, V. 62, pp. 169-184, Elsevier
- SENNESET, K. & JAMBU, N. (1988) **Shear strength parameters obtained from static cone penetration tests**. ASTM, STP 883:41-45.
- SENNESET, K.; SANDVEN, R. & JAMBU, N (1989) **Evaluation of Soil Parameters from Piezocone Tests**. Transportation Research Record, 1235 pp. 24-37.



- SILLS, G. C.; ALMEIDA, M. S. S. & DANZIGER, F. A. B. (1988) – **Coefficient of consolidation from piezocone dissipation tests in a very soft** – Penetration Testing, ISOPT-1, De Ruiter (ed.) / Balkema, Rotterdam, p.967-974.
- SONG, C.R.; VOYIADJIS, G.Z.; TUMAY, M.T. (1999) **Determination of permeability of soils using the Multiple Piezo-element Penetrometers**. Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. V. 23 , pp. 1609-1629.
- STEWART, W.P. AND CAMPANELLA, R.G. (1992) **Practical aspects of in-situ measurements of material damping with the SCPT**. Canadian Geotechnical Journal, V. 30, N. 2, p: 211-219.
- STRUTYNSKY, A I. & SAINY, T.J. (1992) **Use of piezometric cone penetration testing and penetrometer ground water sampling for volatile organic contaminant plume detection**. ASTM STP 1118, pp. 199-214.
- STRUTYNSKY, A. I.; ELLYN, G.; GILMER, K.; OSBORNE, C.; ROMP, J.; DARR, R. (1999) **Municipal groundwater drinking supply protection using cone penetrometer exploration methods**. Ohio – EPA, Internal paper, 1999 - Municipal Groundwater Drinking Supply Protection using Cone Penetrometer Exploration Methods.
- STRUTYNSKY, A. I.; SANDIFORD, R. E.; CAVALIER, D. (1991)– **Use of piezometric cone penetration testing with electrical conductivity measurements (CPTU-EC) for the detection of hydrocarbon contamination in saturated granular soils** – Current Practices in Ground Water and Vadose Zone Investigations, ASTM STP 1118, Nielsen, D. M.; Sara, M. N.; Editors, ASTM/ Philadelphia.
- SUGUIO, K. MARTIN, L. FLEXOR, J.M. AZEVEDO, A E.G (1985) **The Quaternary sedimentary deposits in the states of Paraná and Santa Catarina coastal plains**. Quaternary of South America and Antarctic Peninsula 2:3-25.
- SUGUIO, K.; MARTIN, L. BITTENCOURT, ACSP; DOMINGUEZ, JML; FLEXOR, J.M.; AZEVEDO, AEG (1985) **Flutuações do nível do mar durante o Quaternário Superior ao longo do litoral brasileiro e suas implicações na sedimentação costeira**. RBG, 15(4):273-286
- SUGUIO, K.; MARTIN, L.;BITTENCOURT, A, C, S.; DOMÍNGUEZ, J.M.; FLEXOR, J.M.A.; AZEVEDO, A.E.G. (1985) **Flutuações do nível relativo do mar durante o Quaternário superior ao longo do litoral brasileiro e suas implicações na sedimentação costeira**. Rev. Bras. Geoc. 15, p. 273-286.

- SULLY, J. P.; CAMPANELLA, R. G. & ROBERTSON, P. K. (1988) – **Overconsolidation Ratio of clays from penetration pore pressures** – Journal of Geotechnical Engineering, Vol 114, No. 2, p.209-216.
- SULLY, J. P.; CAMPANELLA, R. G.; ROBERTSON, P. K. (1988) – **Interpretation of penetration pore pressures to evaluate stress history in clays** – Penetration Testing, ISOPT-1, De Ruyter (ed) / Balkema, Rotterdam, p.993-999.
- SULLY, J.P. & CAMPANELLA, R.G. (1994) **Evaluation of field CPTU dissipation data in overconsolidated fine-grained soils**. Proc. 13<sup>th</sup> Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng. V. 1, pp. 201-204, New Delhi.
- SULLY, J.P.; ROBERTSON, P.K.; RICHARD, G.C.; WOELLER, J.D.(1999) **An approach to evaluation of field CPTU dissipation data in overconsolidated fine-grained soils**. Can. Geotech. J. 36: 369-381
- SYMS, F. H. (2002) **Calibration of the electric piezocone penetrometer for predicting sediment character and geologic mapping of Eocene Carolina coastal plain sediments**. PhD Thesis, University of South Carolina, 146 p.
- TABBA, M.M. & YONG, R.N. (1981) **Mapping and Predicting soil properties: Theory and Applications**. Proc. ASCE, V. 107, p.773-811.
- TAKESUE, K.; SASAO, H. AND MAKIHARA, Y. (1996) **Cone Penetration Testing in Volcanic Soil Deposits**. Advances in site investigation practice. Pp.452-463, Thomas Telford, London.
- TERZAGHI, K. (1943) **Theoretical Soil Mechanics**. John Willey & Sons, New York.
- THOMAS, F.M. & THORP, M.B. (1995) **Geomorphic response to rapid climatic and Hydrologic change during late Pleistocene and early Holocene in the humid and sub-humid tropics**. Quaternary Science review, V.14, pp. 193-207.
- TOGNON, A. (1985) **Dicionário de termos técnicos de Geologia de Engenharia**, ABGE, São Paulo.
- TORTENSSON, B. A (1975) **Pore-Pressure sounding instrument**. Proc. ASCE Spec. Conf. In Situ Measurement of Soil Properties, V. 2, pp.48-54.
- VANMARCKE, E.H. (1978) **Probabilistic characterization of soil profiles**. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 103 (GT11): 1227-1246.
- VARGAS, M (1985) **The Concept of Tropical Soils**. . Proc. 1<sup>st</sup> Int. Conf. Geomec. Tropical Soils – Brasília, V. 3, pp.101-134 – Brasilia, 1985.

- VARGAS, M (1990) **Collapsible and Expansive soils in Brasil**. Proc. II Int. Conf. Geomechanics in Tropical Soils, V. 1, pp. 489-492, Singapore, 1988
- VAUGHAN, P.R. (1985) **Mechanical and hydraulic properties, particularly as related to their structure and mineral components**. Genral report. Proc. 1<sup>st</sup> Int. Conf. Geomec. Tropical Soils – Brasília, V.3, pp 231-336
- VESIC, A.S. (1972) **Expansion of Cavities in infinite Soil Mass**. JSMFE Div. ASCE, SM3.
- WHITMAN, R. V.(1986) – **Organizing and Evaluating Uncertainty in Geotechnical Engineering, Symp.** Uncertainty in Geologic Environment, p.1-28.
- WICKREMESINGHE, S.D. (1989) **Statistical Characterization of Soil Profiles Using In situ Tests**. PhD These, 288 p. UBC – British Columbia
- WILSON (2001) **Implications of determining design parameters given site variability, Different Testing Methods, and uncertainty in Correlations**. BAsc, University of British Columbia, 86 p. 2001
- WISSA, A E.Z.; MARTIN,R.T.;GARLANGER, J.E. (1975) **The piezometer probe**. Proc. ASCE Spec. Conf. In Situ Measurement of Soil Properties, V. 1, pp.536-345
- WROTH,C.P. (1994)**The interpretation of in situ soil tests**. Geotechnique, V. 34, n. 4, pp. 449-489
- WU, T. H.; ABDEL-LATIF, M. A.; NUHFER, M. A.(1996) **Use of geologic information in site characterization-**. Uncertainty in Geologic Environment p.76-90.
- ZHANG, Z. & TUMAY, M.T. (1996) **Simplication of Soil Classification Charts derived from the Cone Penetration Test**. Geotechnical testing Journal, V. 19, n. 2, pp. 203-216.
- ZHANG, Z.& TUMAY, M. T. (1999) – **Statistical To Fuzzy Approach Toward CPT Soil Classification** – Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, V. 125, N. 3, pp.179-186.