

JULIETH PAOLA QUINTERO BAÑOS

**MODELAGEM NUMÉRICA DOS FENÔMENOS QUE OCORREM
DURANTE A PENETRAÇÃO DO AMOSTRADOR SPT NO SOLO**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Edmundo Rogério Esquivel

VERSÃO CORRIGIDA
ORIGINAL SE ENCONTRA DISPONÍVEL NA UNIDADE QUE ALOJA O PROGRAMA

São Carlos – SP

2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Q7m Quintero-Baños, Julieth Paola
 Modelagem numérica dos fenômenos que ocorrem
 durante a penetração do amostrador SPT no solo /
 Julieth Paola Quintero-Baños; orientador Edmundo
 Rogério Esquivel. São Carlos, 2016.

 Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
 e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de
 Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
 2016.

 1. ensaio SPT. 2. modelagem numérica. 3.
 eficiência. 4. Abaqus/Explicit. 5. força de reação
 dinâmica do solo. 6. prova de carga dinâmica com
 energia crescente. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **JULIETH PAOLA QUINTERO BAÑOS**.

Título da dissertação: "Modelagem numérica dos fenômenos que ocorrem durante a penetração do amostrador SPT no solo".

Data da defesa: 16/06/2016

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Edmundo Rogério Esquivel (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Prof. Dr. **Ricardo Carrazedo**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Profa. Dra. **Bernadete Ragoni Danziger**
(Universidade do Estado do Rio de Janeiro/UERJ)

Aprovada

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:
Prof. Dr. **Edmundo Rogério Esquivel**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

Aos meus pais, German Quintero e Nancy Baños por seu amor e apoio incondicional. As minhas amadas irmãs Lala e Carola por sua cumplicidade.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por me trazer a este lindo país para cumprir satisfatoriamente mais uma etapa na minha vida.

Agradeço minha família por seu apoio incondicional mesmo fora de casa. À minha mãe Nancy Baños pelas suas palavras de motivação no dia a dia; ao meu pai German Quintero por seu amor e carinho; às minhas irmãs queridas, Lala e Carola, minhas parceiras e suporte em cada minuto dessa fase.

Ao prezado professor, Edmundo Esquivel por sua orientação e amizade. Agradeço infinitamente pelos conhecimentos transmitidos durante esses anos, pela confiança e sua disposição de ajuda em todo momento.

Agradeço ao professor Ricardo Carrazedo por sua grande contribuição nesse trabalho, especificamente durante a realização das análises numéricas. Agradeço à doutoranda Lara Kawai por sua ajuda na etapa inicial dessa pesquisa.

Aos meus amigos, minha segunda família, que sempre estiveram me acompanhando nos bons momentos e também nas dificuldades enfrentadas. Agradeço a minha amiga Zorany por sua companhia, apoio e boas conversas.

Agradeço aos professores do departamento da Geotecnia, pelos ensinamentos transmitidos e aos funcionários por sua boa disposição sempre.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela disponibilização da bolsa de estudos.

Obrigada a todos.

*“Nada en este mundo es imposible para un corazón
dispuesto”.*

Abraham Lincoln

RESUMO

QUINTERO-BAÑOS, J. P. **Modelagem numérica dos fenômenos que ocorrem durante a penetração do amostrador SPT no solo.** 2016. 140 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

O ensaio SPT (*Standard Penetration Test*), é o ensaio de campo geotécnico mais usado no Brasil e grande parte do mundo. A ampla utilização deste ensaio no âmbito da engenharia geotécnica deve-se à sua simplicidade, baixo custo, grande experiência prática e facilidade de aplicação dos seus resultados. Os principais objetivos do ensaio são a determinação do índice de resistência do solo (N_{SPT}) e amostragem. Apesar de ser muito utilizado na estimativa da capacidade de carga de fundações, o ensaio SPT tem sido questionado pelo fato de que o índice N_{SPT} é utilizado em correlações empíricas baseadas em observações práticas, sem nenhum fundamento científico. Além do mais, seus resultados apresentam significativas dispersões. Para analisar racionalmente os resultados do ensaio e de possibilitar a comparação dos diferentes resultados de distintas equipes, é necessário conhecer as quantidades de energia envolvidas na penetração do amostrador no solo. Tais análises requerem o conhecimento da eficiência do equipamento (η) e a força de reação dinâmica do solo à cravação do amostrador (R_D). Neste cenário, o presente trabalho aborda a interpretação racional dos resultados de ensaios SPT a partir de simulações numéricas realizadas com o software Abaqus/Explicit®. Esse programa fornece os deslocamentos do amostrador ($\Delta\rho$), força de reação dinâmica do solo (R_D), e as forças de reação nas paredes laterais externa e interna do amostrador (R_1 e R_2). Baseando-se nos resultados dos modelos numéricos, foi possível calcular a eficiência do equipamento, a partir da força de reação dinâmica do solo, as resistências unitárias de atrito atuantes nas paredes e a resistência unitária na ponta do amostrador. Também foi possível determinar a relação entre as resistências unitárias de atrito desenvolvidas no interior e exterior do amostrador (fator de atrito a). Os resultados obtidos foram comparados com resultados de trabalhos experimentais e valores teóricos determinados com base no Princípio de Hamilton da conservação da energia. Também foi possível simular uma prova de carga dinâmica com energia crescente no amostrador, variando a altura de queda do martelo. Isso confirmou que a resistência mobilizada do solo para certa energia aplicada pode estar bem abaixo da ruptura e apenas representar um ponto na curva de *resistência mobilizada versus* deslocamento.

Palavras-chave: Ensaio SPT, Eficiência, Modelagem numérica, Força de reação dinâmica do solo, Tensões no amostrador, Abaqus/Explicit®, Prova de carga dinâmica com energia crescente.

ABSTRACT

QUINTERO-BAÑOS, J. P. **Numerical modelling of the penetration of a SPT sampler into the soil.** 2016. 140 p. Master Thesis - Department of Geotechnical Engineering, School of Engineering at Sao Carlos, University of Sao Paulo, Sao Carlos, 2016.

The Standard Penetration Test (SPT) is one of the most used geotechnical tests in the world. The wide use of this test in the context of geotechnical engineering is due to its simplicity, low cost, large practical experience and its ease of application of results. The main objectives of the test are the determination of soil resistance index (NSPT) and sampling. Despite being widely used in estimating the bearing capacity of foundations, the SPT test has been questioned by the fact that the N_{SPT} index is used in empirical correlations based on practical observations, with no scientific basis. Furthermore, its results show significant dispersions. To analyze rationally the test results and to make possible to compare different results obtained from different equipment, it is necessary to know the amounts of energy existing during the penetration of the sampler into soil. Such analyses require information about the equipment efficiency (η) and the dynamic soil reaction force during the sampler penetration (R_D). In this scenario, this work addresses the rational interpretation of SPT test results from numerical simulations performed with the Abaqus/Explicit software. This program provides the sampler displacements ($\Delta\rho$), the dynamic soil reaction force (R_D) and the external and internal reaction forces acting on the sampler walls (R_1 e R_2). Based on the results of the numerical models, it was possible to calculate the efficiency of the equipment, from the dynamic soil reaction force, the unit friction resistance acting on the sampler walls and the unit resistance at the sampler tip. In addition, it was possible to estimate the relationship between the unit friction resistance acting on the internal and external walls of the sampler (friction factor a). The numerical results were compared with experimental results and theoretical values, obtained using the Hamilton's principle of conservation of energy. Furthermore, it was possible to simulate a dynamic load test with increasing energy applied to the sampler, by varying the height of fall of the hammer. It was obtained the confirmation that resistance mobilized for a certain level of energy applied to the sampler may be below the failure load and represent only a point on the graph curve mobilized resistance versus displacement.

Keywords: SPT test, efficiency, numerical modeling, dynamic soil reaction force, Abaqus/Explicit®, dynamic load test with increasing energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 - Equipamento do SPT (Schnaid e Odebrecht, 2012).	40
Figura 2. 2 – Martelos padronizados: a) com pino guia e, b) cilíndrico vazado (Morais, 2014).	41
Figura 2. 3 - Martelo e Cabeça de bater (Modificado de Lukiantchuki, 2012).	41
Figura 2. 4 - Composição para cravação (Modificado de Lukiantchuki, 2012).	42
Figura 2. 5 - Amostrador do tipo Raymond bipartido (Lukiantchuki, 2012).	43
Figura 2. 6 - Energia potencial do sistema considerando o acréscimo de energia devido ao movimento do martelo e as hastes (Odebrecht, 2003).	46
Figura 2. 7 - Propagação de ondas de tensão no ensaio SPT (Lukiantchuki, 2012).	48
Figura 2. 8 - Evolução da energia potencial, energia cinética e trabalho das forças não conservativas durante o golpe do martelo (Zapata, 2015).	50
Figura 2. 9 - Propagação da onda longitudinal de compressão uniforme em uma composição de hastes (Lukiantchuki, 2012).	53
Figura 2. 10 - Extremidade da haste livre (adaptado de Belincanta, 1985).	56
Figura 2. 11 - Extremidade da haste engastada (adaptado de Belincanta, 1985).	56
Figura 2. 12 - Extremidade da haste semi-engastada (adaptado de Belincanta, 1985).	57
Figura 2. 13 - Esquema de esforços de uma estaca submetida a carregamento estático (modificada de NEVES, 2004).	60
Figura 2. 14 - Comparação resistência estática e dinâmica (modificada de Noreña, 2011).	62
Figura 2. 15 - Equilíbrio de forças atuantes no amostrador (modificado de Zapata, 2015).	63
Figura 2. 16 – Forças atuantes na ponta aberta do amostrador (modificado de Zapata, 2015)	65
Figura 2. 17 - Curva de resistência estática mobilizada <i>versus</i> deslocamento: prova de carga com (a) energia constante e (b) energia crescente (Tsuha, Aoki e Cintra, 2013).	66
Figura 3. 1 - Resultados de ensaios de laboratório FEAGRI-Unicamp (Peixoto, 2001).	70
Figura 3. 2 - Resultados de ensaios de campo FEAGRI-Unicamp (Giacheti e De Mio, 2008).	71
Figura 3. 3 - Locação dos ensaios no campo experimental da FEAGRI/Unicamp. (Morais, 2014).	72
Figura 3. 4 - Seção esquemática da geologia de pequena profundidade em São Carlos (Bortoluci, 1983).	73
Figura 3. 5 - Resultados de ensaios penetrométricos de SPT e CPTu (Machado, 1998).	74
Figura 3. 6 - Locação do ensaio no campo experimental da EESC-USP (Zapata, 2015).	75
Figura 4. 1 - Geometria e condições de contorno do modelo numérico criado.	82
Figura 4. 2 - Tamanho (sem escala) dos modelos analisados para determinar a dimensão lateral do maciço de solo.	84
Figura 4. 3 - Deslocamentos do amostrador para diferentes larguras no maciço de solo (Profundidade: 1.5m).	84

Figura 4. 4 - Tamanho (sem escala) dos modelos analisados para determinar a dimensão vertical do maciço de solo.	85
Figura 4. 5 - Deslocamentos do amostrador para diferentes profundidades no maciço de solo (Largura: 0.5m).....	85
Figura 4. 6 - Deslocamentos do amostrador para diferentes tamanhos de elementos finitos...87	
Figura 4. 7 - Malha de elementos finitos no programa Abaqus/Explicit®.	88
Figura 5. 1 - Deslocamento - Prof. 1m – 3º golpe (FEAGRI-Unicamp).	96
Figura 5. 2 - Deslocamento – Prof. 2m – 4º golpe (FEAGRI-Unicamp).	96
Figura 5. 3 - Deslocamento - Prof. 4m – 5º golpe (FEAGRI-Unicamp).	96
Figura 5. 4 - Deslocamento - Prof. 8m – 10º golpe (FEAGRI-Unicamp).	97
Figura 5. 5 - Resistência dinâmica do solo - Prof. 1m – 3º golpe (FEAGRI-Unicamp).	98
Figura 5. 6 - Resistência dinâmica do solo - Prof. 2m – 4º golpe (FEAGRI-Unicamp).	99
Figura 5. 7 - Resistência dinâmica do solo - Prof. 4m – 5º golpe (FEAGRI-Unicamp).	99
Figura 5. 8 - Resistência dinâmica do solo - Prof. 8m – 10º golpe (FEAGRI-Unicamp).	99
Figura 5. 9 - Perfil de resistência dinâmica experimental, teórica e numérica (FEAGRI-Unicamp).	100
Figura 5. 10 - R_D e F_d versus N_{SPT} (FEAGRI-Unicamp).	100
Figura 5. 11 – Comparação entre forças dinâmicas numérica e experimental (FEAGRI-Unicamp).	101
Figura 5. 12 - Eficiência versus comprimento da composição de hastes (FEAGRI-Unicamp).	102
Figura 5. 13 - Fenômeno de embuchamento nos modelos numéricos.	103
Figura 5. 14 - Relação entre o comprimento da amostra L_a e a penetração acumulada do amostrador $\Delta\rho_{acumulado}$ (FEAGRI-Unicamp).	104
Figura 5. 15 - Força de atrito na parede externa do amostrador R_1 – Prof. 1m – 3º golpe (FEAGRI-Unicamp).	105
Figura 5. 16 - Força de atrito na parede interna do amostrador R_2 – Prof. 1m – 3º golpe (FEAGRI-Unicamp).	105
Figura 5. 17 - Força de atrito na parede externa do amostrador R_1 – Prof. 2m – 4º golpe (FEAGRI-Unicamp).	105
Figura 5. 18 - Força de atrito na parede interna do amostrador R_2 – Prof. 2m – 4º golpe (FEAGRI-Unicamp).	106
Figura 5. 19 - Força de atrito na parede externa do amostrador R_1 – Prof. 4m – 5º golpe (FEAGRI-Unicamp).	106
Figura 5. 20 - Força de atrito na parede interna do amostrador R_2 – Prof. 4m – 5º golpe (FEAGRI-Unicamp).	106
Figura 5. 21 - Força de atrito na parede externa do amostrador R_1 – Prof. 8m – 10 golpe (FEAGRI-Unicamp).	107

Figura 5. 22 - Força de atrito na parede interna do amostrador R_2 – Prof. 8m – 10° golpe (FEAGRI-Unicamp).	107
Figura 5. 23 - Perfil de resistências unitárias de ponta e atrito lateral no sistema solo-amostrador (FEAGRI-Unicamp).	108
Figura 5. 24 - Fator de atrito (a) versus profundidade (FEAGRI-Unicamp).	109
Figura 5. 25 - Deslocamento - Prof. 1m – 3° golpe (EESC-USP).	111
Figura 5. 26 - Deslocamento - Prof. 2m – 3° golpe (EESC-USP).	111
Figura 5. 27 - Deslocamento - Prof. 4m – 4° golpe (EESC-USP).	111
Figura 5. 28 - Deslocamento - Prof. 5m – 3° golpe (EESC-USP).	112
Figura 5. 29 - Deslocamento - Prof. 7m – 5° golpe (EESC-USP).	112
Figura 5. 30 - Resistência dinâmica do solo - Prof. 1m – 3° golpe (EESC-USP).	114
Figura 5. 31 - Resistência dinâmica do solo - Prof. 2m – 3° golpe (EESC-USP).	114
Figura 5. 32 - Resistência dinâmica do solo - Prof. 4m – 4° golpe (EESC-USP).	114
Figura 5. 33 - Resistência dinâmica do solo - Prof. 5m – 3° golpe (EESC-USP).	115
Figura 5. 34 - Resistência dinâmica do solo - Prof. 7m – 5° golpe (EESC-USP).	115
Figura 5. 35 - Perfil de resistência dinâmica experimental, teórica e numérica (EESC-USP).	115
Figura 5. 36 – R_D e F_d versus N_{SPT} (EESC-USP).	116
Figura 5. 37 - Comparação da força dinâmica numérica e experimental (EESC-USP).	116
Figura 5. 38 - Eficiência versus comprimento da composição de hastes (EESC-USP).	118
Figura 5. 39 - Relação entre o comprimento da amostra L_a e a penetração acumulada do amostrador $\Delta\rho_{acumulado}$ (EESC-USP).	118
Figura 5. 40 - Força de atrito na parede externa do amostrador R_1 – Prof. 1m – 3° golpe (EESC-USP).	119
Figura 5. 41 - Força de atrito na parede interna do amostrador R_2 – Prof. 1m – 3° golpe (EESC-USP).	120
Figura 5. 42 - Força de atrito na parede externa do amostrador R_1 – Prof. 2m – 3° golpe (EESC-USP).	120
Figura 5. 43 - Força de atrito na parede interna do amostrador R_2 – Prof. 2m – 3° golpe (EESC-USP).	120
Figura 5. 44 - Força de atrito na parede externa do amostrador R_1 – Prof. 4m – 4° golpe (EESC-USP).	121
Figura 5. 45 - Força de atrito na parede interna do amostrador R_2 – Prof. 4m – 4° golpe (EESC-USP).	121
Figura 5. 46 - Força de atrito na parede externa do amostrador R_1 – Prof. 5m – 3° golpe (EESC-USP).	121
Figura 5. 47 - Força de atrito na parede interna do amostrador R_2 – Prof. 5m – 3° golpe (EESC-USP).	122

Figura 5. 48 - Força de atrito na parede externa do amostrador R_1 – Prof. 7m – 5 golpe (EESC-USP).....	122
Figura 5. 49 - Força de atrito na parede interna do amostrador R_2 – Prof. 7m – 5º golpe (EESC-USP).....	122
Figura 5. 50 - Perfil de resistências unitárias de ponta e atrito lateral no sistema solo-amostrador (EESC-USP).....	124
Figura 5. 51 - Fator de atrito (a) <i>versus</i> profundidade (EESC-USP).	125
Figura 5. 52 – Resistência mobilizada do solo(H=0.01 m).	125
Figura 5. 53 - Resistência mobilizada do solo(H=0.03 m).....	126
Figura 5. 54 - Resistência mobilizada do solo(H=0.06 m).....	126
Figura 5. 55 - Resistência mobilizada do solo(H=0.10 m).....	126
Figura 5. 56 - Resistência mobilizada do solo(H=0.30 m).....	127
Figura 5. 57 - Resistência mobilizada do solo(H=0.50 m).....	127
Figura 5. 58 - Resistência mobilizada do solo(H=0.75 m).....	127
Figura 5. 59 – Resistência mobilizada <i>versus</i> deslocamento: prova de carga com energia crescente.	129
Figura 5. 60 - Deslocamento do amostrador para diferentes alturas de queda do martelo.....	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 - Convenção de sinais e sentido adotada para velocidades e forças.	55
Tabela 3. 1 - Resultados dos ensaios de caracterização. (Peixoto, 2001).....	74
Tabela 4. 1 - Golpe analisado em cada profundidade, penetração inicial do amostrador e comprimento das hastes (FEAGRI-Unicamp).....	86
Tabela 4. 2 - Golpe analisado em cada profundidade, penetração inicial do amostrador e comprimento das hastes (EESC-USP).....	86
Tabela 4. 3 - Refinamento do modelo.	87
Tabela 4. 4 - Parâmetros do solo utilizados nos modelos numéricos (FEAGRI-Unicamp).....	89
Tabela 4. 5 - Parâmetros do solo utilizados nos modelos numéricos (EESC-USP).....	89
Tabela 4. 6 - Velocidades usadas nas simulações da prova de carga dinâmicas com energia crescente.	91
Tabela 5. 1 - Penetração do amostrador para diferentes profundidades (FEAGRI-Unicamp). 95	
Tabela 5. 2 - Comparações forças de reação dinâmica do solo (FEAGRI-Unicamp).....	98
Tabela 5. 3 - Comparação da eficiência a partir dos resultados numéricos e experimentais (FEAGRI-Unicamp).	102
Tabela 5. 4 - Relação $L_a/\Delta\rho_{acumulado}$ para análise do embuchamento (FEAGRI-Unicamp)....	103
Tabela 5. 5 - Tensões unitárias de atrito e ponta no sistema solo amostrador (FEAGRI-Unicamp).	108
Tabela 5. 6 - Fator de atrito (a) (FEAGRI-Unicamp).....	109
Tabela 5. 7 - Penetração do amostrador para diferentes profundidades (EESC-USP).....	110
Tabela 5. 8 - Comparações forças de reação dinâmica do solo (EESC-USP).....	113
Tabela 5. 9 - Comparação da eficiência a partir dos resultados numéricos e experimentais (EESC-USP).	117
Tabela 5. 10 - Relação $L_a/\Delta\rho_{acumulado}$ para análise do embuchamento (EESC-USP).....	119
Tabela 5. 11 - Forças de reação na parede externa (R_1) e interna (R_2) do amostrador obtidas a partir dos modelos numéricos (EESC-USP).....	123
Tabela 5. 12 - Tensões unitárias de atrito e ponta no sistema solo amostrador (EESC-USP).....	123
Tabela 5. 13 - Fator de atrito (a) (EESC-USP).....	124
Tabela 5. 14 - Resistência mobilizada última e deslocamento para diferentes alturas de queda do martelo.	128

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALE	Análise arbitrária langragiana-euleriana
ASTM	American Society For Testing and Materials
CAX4R	Elemento contínuo axissimétrico com quatro nós e integração reduzida (Abaqus/Explicit®)
CPT	Cone Penetration Test
DMT	Dilatômetro de Marchetti
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
FEAGRI	Faculdade de Engenharia Agrícola
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
MEF	Método de elementos finitos
PMT	Pressiômetro de Ménard
S-SPT	SPT sísmico
SCPT	CPT sísmico
SP01	Ensaio SPT N°1 realizado por Moraes (2014)
SP02	Ensaio SPT N°2 realizado por Moraes (2014)
SP03	Ensaio SPT N°3 realizado por Moraes (2014)
SPT	Standard Penetration Test
SPT-T	SPT com medida de torque
Unicamp	Universidade Estadual de Campinas
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SIMBOLOS

$a:$	Coeficiente de atrito
$a_h:$	Área da seção transversal da haste
$C:$	Velocidade teórica de propagação da onda nas hastes.
$c:$	Coesão do solo
$D:$	Deslocamento máximo correspondente à resistência à cravação de uma estaca na curva carga x recalque
$D_{ext}:$	Diâmetro externo do amostrador
$D_{int}:$	Diâmetro interno do amostrador
$D_P:$	Diâmetro da ponta do amostrador
$du:$	Encurtamento elástico de uma seção de haste
$dt:$	Intervalo de tempo
$dx:$	Seção de haste
$e:$	Índice de vazios do solo
$E:$	Modulo de elasticidade dinâmico do solo
$E_h:$	Módulo de elasticidade do aço
$E_{amostrador}:$	Energia que atinge o amostrador
$E_c:$	Energia cinética máxima
$E_{topo}:$	Energia transferida ao topo da composição de hastes
$EP_T:$	Energia potencial inicial
$EP_{sistema}:$	Energia potencial disponibilizada com o impacto
$F_d:$	Força de reação dinâmico teórica do solo
$F_x:$	Força de compressão uniforme.
$g:$	Aceleração da gravidade
$H:$	Altura de queda do martelo
$i:$	Número de incremento
$I:$	Vetor de forças internas
$J:$	Coeficiente de amortecimento dinâmico
$K_0:$	Coeficiente de empuxo em repouso
$L:$	Comprimento da seção biselada do amostrador
$L_a:$	Comprimento da amostra de solo recuperada dentro do amostrador
$L_{ext}:$	Deslocamento total do amostrador
$L_h:$	Comprimento do conjunto de hastes
$LL:$	Limite de liquidez

$LP:$	Limite de plasticidade
$L_P:$	Comprimento vertical da seção biselada do amostrador
$m:$	Massa do corpo considerado
$M_h:$	Massa da haste
$M_m:$	Massa do martelo
$M^{NJ}:$	Matriz de massa
$n:$	Porosidade
$N_{SPT}:$	Índice de resistência à penetração
$P:$	Carga aplicada a uma estaca
$P^J:$	Vetor de carga aplicada
$P_L:$	Parcela da carga P atuante na lateral
$P_P:$	Parcela da carga P atuante na ponta
$q_c:$	Resistência de ponta do ensaio CPTu
$R^2:$	Coefficiente de correlação linear de Pearson
$R_1:$	Força de reação na parede externa do amostrador
$R_2:$	Força de reação na parede interna do amostrador
$R_3:$	Força de reação na seção anelar da ponta do amostrador
$R_4:$	Componente vertical da força de reação ao longo da superfície biselada tronco-cônica do amostrador
$R_5:$	Componente horizontal da força de reação ao longo da superfície biselada tronco-cônica do amostrador
$R_D:$	Força de reação dinâmica experimental do solo
$R_f:$	Razão de atrito
$r_i:$	Resistência unitária na parede externa e no chanfro do amostrador
$r_{ii}:$	Resistência unitária na parede interna do amostrador
$R_L:$	Esforço de reação do solo ao longo do fuste da estaca
$r_p:$	Resistência unitária sob a ponta aberta do amostrador
$R_P:$	Esforço de reação do solo na ponta da estaca
$R_s:$	Força de reação estática do solo
$R_t:$	Força de reação total do solo
$R_v:$	Resistência viscosa mobilizada
$S_L:$	Área da superfície da parte biselada do amostrador
$T:$	Energia cinética total do sistema
$T_A:$	Energia transferida ao sistema amostrador-solo

T_{max} :	Torque máximo
u^N :	Um grau de liberdade (um componente de deslocamento ou rotação)
v :	Velocidade do martelo quando impacta a cabeça de bater
V :	Energia potencial de deformação
$v(t)$:	Velocidade das partículas
V_e :	Energia potencial elástica
V_{eh} :	Energia potencial elástica de deformação das hastes
V_{es} :	Energia potencial elástica devido a deformação do solo
v_p :	Velocidade de penetração
Z :	Impedância da haste
W_h :	Peso das hastes e da cabeça de bater
w_{max} :	Autovalor mais elevado do sistema
W_{nc} :	Trabalho realizado por forças não conservativas
W_{nat} :	Teor de umidade do solo em estado natural
W_p :	Trabalho realizado por forças resistentes não conservativas
ν :	Número de Poisson do solo
γ :	Peso específico do solo
γ_d :	Peso específico seco
γ_{nat} :	Peso específico do solo em estado natural
γ_s :	Peso específico dos sólidos
δ :	Ângulo de cisalhamento na interface solo-amostrador
ε :	Deformação unitária
η :	Eficiência do equipamento SPT
η_1 :	Eficiência do martelo
η_2 :	Eficiência da composição de hastes
η_3 :	Eficiência do sistema
Δt :	Incremento de tempo
$\Delta \rho$:	Penetração permanente do amostrador
$\Delta \rho_{inicial}$:	Penetração inicial do amostrador no solo nas simulações numéricas
ρ_h :	Massa específica do aço.
σ_{v1} :	Tensão vertical efetiva na parte superior do solo modelado
σ_{v2} :	Tensão vertical efetiva na parte inferior do solo modelado
σ_x :	Tensão de compressão
ϕ :	Ângulo de atrito interno
l :	Comprimento da composição de hastes

SUMARIO

1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	29
1.1	INTRODUÇÃO.....	31
1.2	JUSTIFICATIVA.....	32
1.3	OBJETIVOS.....	32
1.3.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	<i>32</i>
1.3.2	<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>32</i>
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	35
2.1	ENSAIO SPT.....	37
2.1.1	<i>Histórico do ensaio SPT.....</i>	<i>37</i>
2.1.2	<i>Equipamento do ensaio SPT.....</i>	<i>39</i>
2.1.3	<i>Execução do ensaio SPT.....</i>	<i>43</i>
2.2	ENERGIA NO ENSAIO SPT.....	44
2.3	EFICIÊNCIA DO EQUIPAMENTO SPT.....	45
2.4	TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA NO ENSAIO SPT.....	47
2.5	APLICAÇÃO DO PRINCÍPIO DE CONSERVAÇÃO DA ENERGIA DE HAMILTON NO ENSAIO SPT.....	49
2.6	TEORIA DA EQUAÇÃO DA ONDA.....	51
2.7	CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	54
2.7.1	<i>Extremidade da haste livre.....</i>	<i>55</i>
2.7.2	<i>Extremidade da haste engastada.....</i>	<i>56</i>
2.7.3	<i>Extremidade da haste semi-engastada.....</i>	<i>57</i>
2.8	RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO.....	58
2.8.1	<i>Resistência dinâmica mobilizada durante a cravação do amostrador SPT.....</i>	<i>58</i>
2.8.2	<i>Resistência estática mobilizada durante a cravação do amostrador SPT.....</i>	<i>59</i>
2.8.3	<i>Resistência estática mobilizada através da aplicação do Princípio de Hamilton.....</i>	<i>61</i>
2.8.4	<i>Resistência por atrito lateral e de ponta no amostrador SPT.....</i>	<i>62</i>
2.9	A REVOLUÇÃO DA ENERGIA CRESCENTE.....	65
3	AREA DE ESTUDO.....	67
3.1	CAMPO EXPERIMENTAL DA FEAGRI - UNICAMP.....	69
3.1.1	<i>Aspectos Geológicos.....</i>	<i>69</i>
3.1.2	<i>Caracterização Geotécnica.....</i>	<i>70</i>
3.1.3	<i>Ensaio de Campo.....</i>	<i>71</i>
3.2	CAMPO EXPERIMENTAL DA EESC - USP.....	72

3.2.1 Aspectos geológicos	72
3.2.2 Caracterização geotécnica.....	73
3.2.3 Ensaio de campo	74
4 MODELAGEM NUMERICA DA CRAVAÇÃO DO AMOSTRADOR SPT	77
4.1 ABAQUS/EXPLICIT® PARA ANALISES DINÂMICAS	79
4.2 GRANDES DEFORMAÇÕES - TÉCNICA DE ATUALIZAÇÃO DA MALHA NO PROGRAMA ABAQUS/EXPLICIT®	81
4.3 CONSIDERAÇÕES DO MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.....	81
4.4 REFINAMENTO DO MODELO.....	87
4.5 PARÂMETROS USADOS NOS MODELOS	88
4.6 INTERFACE DE CONTATO.....	90
4.7 PROVA DE CARGA DINÂMICA COM ENERGIA CRESCENTE NO AMOSTRADOR SPT	91
5 RESULTADOS E ANÁLISES	93
5.1 FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA - UNICAMP	95
5.1.1 Penetração do amostrador.....	95
5.1.2 Resistência dinâmica do solo (R_D).....	98
5.1.3 Eficiência do equipamento	101
5.1.4 Comprimento da amostra.....	102
5.1.5 Resistências unitárias de atrito externa e interna.....	104
5.2 ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - USP	110
5.2.1 Penetração do amostrador.....	110
5.2.2 Resistência dinâmica do solo (R_D).....	112
5.2.3 Eficiência do equipamento	117
5.2.4 Comprimento da amostra.....	118
5.2.5 Resistências unitárias de atrito externas e internas.....	119
5.3 PROVA DE CARGA DINÂMICA COM ENERGIA CRESCENTE	125
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	131
6.1 CONCLUSÕES	133
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	135
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	137
APÊNDICE A- Roteiro de utilização do programa Abaqus/Explicit para simular numericamente o processo de cravação do amostrador SPT no solo.	141



Capítulo 1

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 Introdução

No âmbito geotécnico, as decisões de engenharia se baseiam em resultados estimados a partir de ensaios *in situ* que permitem determinar o perfil do terreno e nas propriedades geomecânicas dos solos envolvidos. O ensaio SPT (*Standard Penetration Test*) é o ensaio de campo geotécnico mais difundido, tanto no Brasil como em outros países do mundo, conjugado com a obtenção de amostras em uma sondagem de simples reconhecimento. O amplo emprego deste ensaio no âmbito da engenharia geotécnica deve-se à sua simplicidade, robustez e facilidade de aplicação dos seus resultados (Lukiantchuki, 2012).

O principal resultado do ensaio SPT é o índice de resistência do solo (N_{SPT}), resultante da penetração dinâmica de um amostrador padronizado no solo, sob ação da queda livre de um martelo a uma altura de queda constante. O índice N_{SPT} tem sido empregado em correlações empíricas ou semi-empíricas como um parâmetro muito importante para o projeto de fundações. Porém, diversas críticas têm sido realizadas ao ensaio, relacionadas à utilização dessas correlações empíricas, a maioria baseadas em observações práticas, sem nenhum fundamento científico (Lobo, 2009). Os julgamentos também estão relacionados com a dispersão dos resultados dos ensaios, principalmente derivados da dependência do operador, da diversidade dos equipamentos e dos procedimentos em uso.

Com o intuito de analisar racionalmente os resultados do ensaio e de possibilitar a comparação dos diferentes resultados de distintas equipes, se começa a estimar a energia envolvida na penetração do amostrador padronizado no solo. É assim que tem se conseguido calcular um valor da resistência à penetração dinâmica dos solos a partir dos resultados do ensaio realizado e interpretar o índice N_{SPT} como um parâmetro com significado físico. A interpretação das propriedades dos solos tanto em areias como em argilas, é baseada no cálculo da resistência dinâmica, possibilitando estimar o ângulo de atrito interno e a resistência ao cisalhamento não drenada (Schnaid et al, 2009). Para fins de dimensionamento de estacas pode-se obter a resistência unitária de ponta e de atrito lateral também a partir da medição da energia nos ensaios.

As contínuas e recentes pesquisas baseadas na interpretação racional dos resultados do ensaio SPT, considerando a quantidade de energia que realmente chega ao amostrador, ajuda bastante no incremento da credibilidade do ensaio.

1.2 Justificativa

A similaridade de mecanismos de ruptura gerados pela cravação dinâmica de amostradores no solo e estacas permite que soluções teóricas e a experiência acumulada na engenharia de fundações sejam utilizadas na modelagem numérica da resistência ao cisalhamento do solo mobilizada em ensaios dinâmicos (Lobo, 2009). A aplicação de uma abordagem racional de interpretação de ensaios dinâmicos, a partir do desenvolvimento de uma modelagem numérica embasada no método de elementos finitos, abre uma gama de aplicações na prática de engenharia, reduzindo custos e incorporando maior confiabilidade aos projetos.

O entendimento dos mecanismos de mobilização de resistência devido à penetração dinâmica de elementos no solo permite discutir questões amplamente debatidas ao longo de décadas relacionadas com a interpretação de ensaios SPT. Somado a isto, abordagens racionais de interpretação de ensaios dinâmicos possibilitam o desenvolvimento de soluções numéricas e analíticas para a estimativa de parâmetros de resistência dos solos.

Estimar quantitativamente a parcela de atrito lateral e de resistência de ponta de ensaios SPT, realizados sem instrumentação para a obtenção da energia a partir de modelos numéricos motiva a realização de este trabalho.

1.3 Objetivos

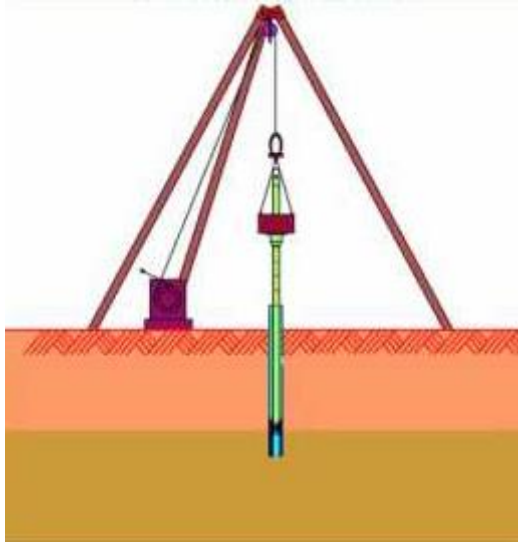
1.3.1 Objetivo Geral

Estimar e analisar a resistência do solo e as tensões desenvolvidas no amostrador no momento da sua penetração, por meio de modelos numéricos de elementos finitos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Comparar o deslocamento do amostrador resultante das simulações numéricas com a penetração medida em campo, em ensaios SPT realizados em Campinas e São Carlos.
- Estimar as forças de reação dinâmica do solo à cravação do amostrador a partir de modelos numéricos e compará-las com as forças medidas em ensaios de campo realizados em Campinas e São Carlos.
- Quantificar a partir dos modelos numéricos as tensões de atrito lateral e de ponta atuando no amostrador durante a sua cravação para os solos de Campinas e São Carlos e compará-las com resultados experimentais.
- Analisar o fenômeno de embuchamento com base nas simulações numéricas.

- Calcular a eficiência do equipamento a partir dos resultados fornecidos pela modelagem no ensaio.
- Determinar o fator de atrito (a), resultante das simulações numéricas e compará-lo com aqueles estimados experimentalmente.
- Simular uma prova de carga dinâmica com energia crescente no amostrador padrão do ensaio SPT, e analisar os resultados encontrados.



Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma descrição do ensaio SPT, seguido dos conceitos de energia aplicados à interpretação desses ensaios. Também é mostrado como é avaliada a eficiência do equipamento, a partir de estimativas de energia e da resistência estática do solo. Finalmente é tratado o mecanismo de interação solo-amostrador, assim como o equilíbrio das forças atuantes no amostrador com base na aplicação direta do princípio de conservação de energia de Hamilton.

2.1 Ensaio SPT

2.1.1 Histórico do ensaio SPT

Os procedimentos do ensaio SPT têm evoluído ao longo dos anos, até chegar àqueles que são realizados na atualidade. Esse ensaio teve seu início em 1902 nos Estados Unidos, quando Charles R. Gow introduziu o processo de cravação dinâmica de um tubo metálico de 25.4 mm de diâmetro e aproximadamente 450 mm de comprimento, a partir da queda de um martelo com massa de 50 kg, substituindo, assim, o sistema de obtenção de amostra de solo através da perfuração com água (Odebrecht, 2003). Visto que na época não eram registrados os procedimentos adotados, tais como a profundidade de realização do procedimento, altura de queda do martelo, contagem dos golpes, etc., este processo ainda não podia ser considerado um ensaio (Belincanta, 1998).

Na década de 30, Fletcher & Morh introduziram o martelo de 63.6 kg, altura de queda de 762 mm, amostrador com 51 mm de diâmetro externo e 35 mm de diâmetro interno. O resultado do ensaio SPT na época, era o número de golpes necessários para penetrar o amostrador 300 mm no solo, depois da cravação de 150 mm iniciais (Belincanta,1998; Odebrecht, 2003). Esse procedimento só veio a ser divulgado em 1948 com a publicação do livro *Soil Mechanics in Engineering Practice* de Terzaghi e Peck, quando o ensaio foi apresentado com o nome de *Standard Penetration Test* (Belincanta,1998; Odebrecht, 2003).

A publicação do livro *Soil mechanics in engineering practice* (1948), deu início à utilização sistemática e racional do ensaio SPT, pois além de apresentar as primeiras correlações, fez importantes recomendações quanto aos equipamentos e procedimentos do ensaio. Posteriormente essas recomendações foram adotadas por normas que prescreviam o ensaio, consolidando o ensaio SPT como uma importante ferramenta de investigação geotécnica (Cavalcante, 2002).

Este ensaio foi introduzido no Brasil pelo Eng. Odair Grillo no início de 1940, através do IPT (*Instituto de Pesquisas Tecnológicas*) de São Paulo. Assim, em 1943, começaram a ser realizadas inicialmente medidas de penetração de forma experimental e pouco tempo depois já eram realizadas de forma sistemática. Na época, o amostrador foi chamado de amostrador IPT, e tinha 38 mm de diâmetro interno e 46 mm de diâmetro externo (Odebrecht, 2003).

Nos anos 50 foram feitas as primeiras tentativas oficiais para padronizar o ensaio, baseando-se nas propostas de James D. Parson, e da norma da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), designada *Tentative Method for Penetration Test and Split-Barrel Sampling of Soils* (ASTM D1586/58T). Essa norma não definia claramente o que era resistência à penetração. Em 1963, essa dúvida foi esclarecida com a sua segunda edição, ASTM D1586-63T, na qual foi definido o índice N_{SPT} , como sendo o número de golpes necessários para cravar o amostrador no segundo e terceiro intervalo de 152 mm cada um (Cavalcante, 2002).

O ensaio SPT entrou em descrédito a partir da década de 60, estimulado pelas publicações de Fletcher (1965) e Mohr (1966), nas quais se mostraram os muitos fatores que intervêm nos resultados do ensaio SPT. A falta de padronização no Brasil provocou o surgimento de diversos equipamentos e também de diferentes procedimentos, o que causou uma grande diversidade dos resultados, tornando difícil a correlação dos resultados do ensaio SPT com outros parâmetros. Assim a sondagem passou por um período de descrédito (Peixoto, 2001).

Porém, após a segunda metade da década 70 e começo da década de 80, iniciou-se uma nova fase para o ensaio SPT, com a consideração da importância das energias envolvidas no ensaio (Odebrecht, 2003).

A primeira tentativa de padronização no Brasil se deveu à Associação Paulista de Geologia de Engenharia (Atual Associação Brasileira de Geologia de Engenharia), em 1977: “Diretrizes para Execução de Sondagens - 1ª Tentativa” (Peixoto, 2001). Posteriormente, em 1974, é apresentada uma proposta de Método de Execução de Sondagem de Simples Reconhecimento dos Solos, no 5º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos. Esta proposta de norma, após ser discutida em eventos técnicos, como também por usuários e pesquisadores, foi enviada à ABNT em 1977, para discussão e aprovação. Em 1979, tornou-se oficialmente a primeira norma brasileira de sondagem SPT, denominada “Execução de Sondagens de Simples Reconhecimento dos Solos”, MB 1211/79, sendo alterada posteriormente para NBR 6484/80 (Odebrecht, 2003).

A partir da década de 80, são publicados trabalhos que reforçam a necessidade e importância da medida de energia no ensaio SPT. Assim, começaram a ser desenvolvidos

equipamentos para quantificar tal energia, os quais evoluíram a partir da utilização de acelerômetros iguais aos que eram utilizados em ensaios de carregamento dinâmico em estacas (Odebrecht, 2003).

No ano 2001, uma nova versão da NBR 6484 foi publicada, trazendo inovações quanto às especificações relativas aos equipamentos, processos de perfuração, método de observação do nível d'água, forma de apresentação final dos resultados, além de apresentar uma classificação das camadas de solo em função dos valores do índice N_{SPT} e do tipo de solo. Esta nova versão também se preocupou com a questão da variabilidade na energia do ensaio devido a mudanças incorporadas pelas empresas de sondagem. Por isso a norma é clara ao estabelecer que ao serem feitas quaisquer alterações no equipamento que alterem o nível de energia incidente disponível para a cravação do amostrador, a empresa prestadora do serviço deve apresentar a respectiva correlação, obtida por estudo dessa energia disponibilizada (Cavalcante, 2002).

Atualmente, a norma NBR 6484 encontra-se em revisão. Assim, devido à prática corrente do ensaio no Brasil, esta nova versão da norma apresentará como parte complementar, porém ainda não obrigatória, uma metodologia para avaliação da energia em ensaios SPT.

2.1.2 Equipamento do ensaio SPT

Segundo a norma NBR 6484 (ABNT, 2001), a aparelhagem do SPT está formada pelos seguintes componentes (Figura 2. 1):

- *Torre com roldana*: estrutura utilizada para o levantamento do martelo.
- *Trado-concha*: usado para escavar o primeiro metro na superfície do perfil do terreno, possui um diâmetro de $100\text{mm} \pm 10\text{mm}$.
- *Trado helicoidal*: utilizado para abrir os furos iniciais da sondagem. Deve ter um diâmetro de 5 mm a 7 mm menor que o diâmetro dos tubos de revestimento para possibilitar sua operação por dentro destes.
- *Trépano ou peça de lavagem*: Formada por uma peça de aço biselada e dotada de duas saídas de água laterais. Deve ter um diâmetro 3 mm ou 5mm menor ao diâmetro dos tubos de revestimento.
- *Sistema de circulação da água*: é constituída por uma bomba hidráulica, mangueiras de engate rápido e uma caixa para decantação de detritos.
- *Martelo padronizado*: Massa cilíndrica ou prismática de ferro de 65 kg. Possui na sua face inferior um coxim de madeira dura, com a finalidade de proteger o martelo e para ter um melhor contato entre as partes no momento do impacto. O martelo pode ser vazado ou

maciço com haste guia (Figura 2. 2). A haste-guia dos martelos maciço deve ter um comprimento de 1.2 m ao longo do eixo de simetria longitudinal do martelo, e a 0.75 m de distância da superfície inferior do martelo deve conter uma marca para garantir a queda do martelo da altura correta.

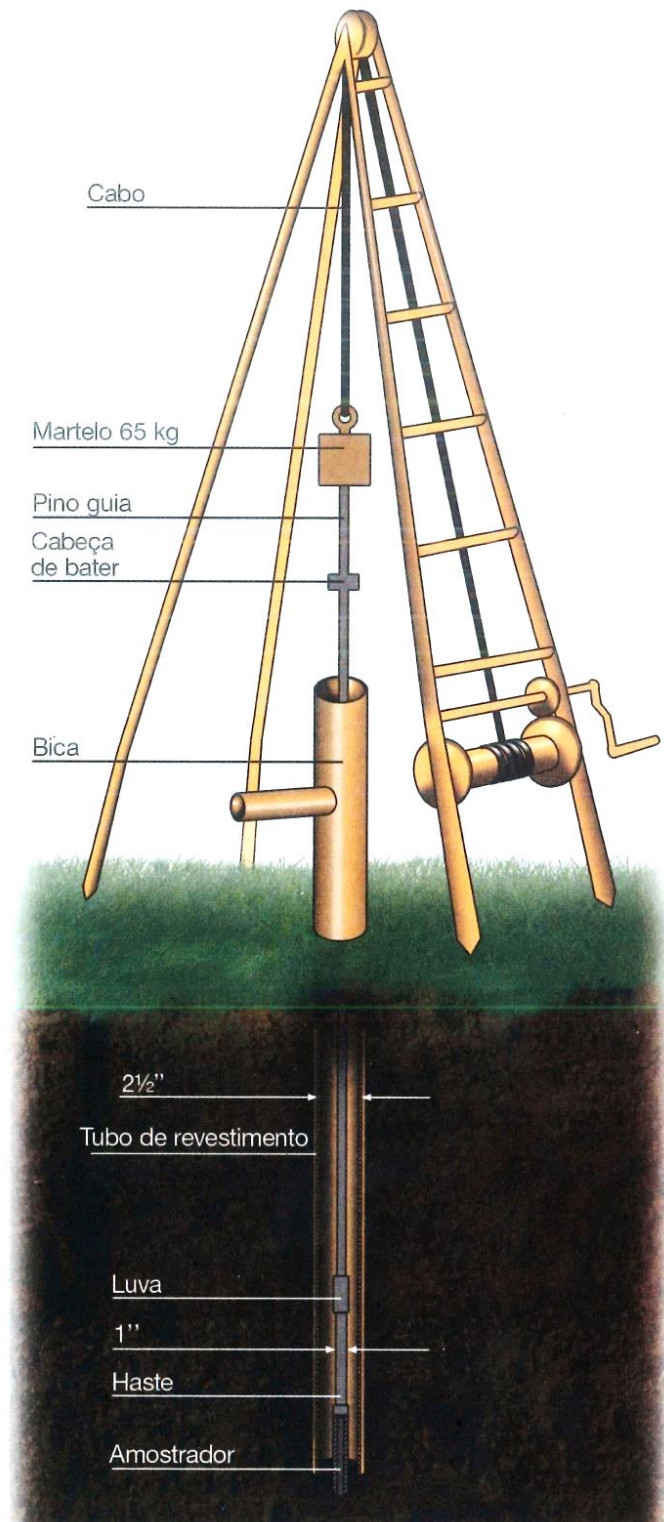


Figura 2. 1 - Equipamento do SPT (Schnaid e Odebrecht, 2012).

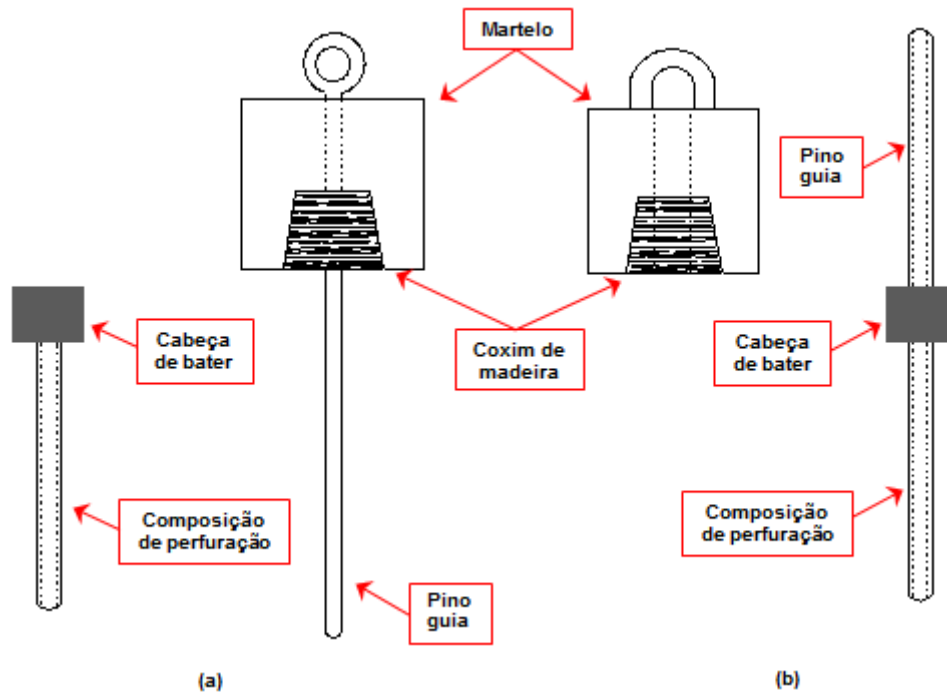


Figura 2. 2 – Martelos padronizados: a) com pino guia e, b) cilíndrico vazado (Morais, 2014).

- *Cabeça de bater*: Constituída com um tarugo de aço de diâmetro de 83 ± 5 mm, altura de 90 ± 5 mm e massa nominal entre 3.5 kg e 4.5 kg, a qual recebe o impacto do martelo (Figura 2. 3).



Figura 2. 3 - Martelo e Cabeça de bater (Modificado de Lukiantchuki, 2012).

- *Composição para cravação*: constituída por hastes de aço (Figura 2. 4) com diâmetro externo de $33.4 \text{ mm} \pm 2.5 \text{ mm}$, diâmetro interno de $24.3 \text{ mm} \pm 2.5 \text{ mm}$, comprimento de 1m ou 2 m e massa teórica linear de 3.23 kg/m. Os segmentos de haste são acoplados por sistema luvas ou de roscas, que devem estar devidamente atarraxadas para formar um conjunto retilíneo e apresentar um estado de conservação e uso.

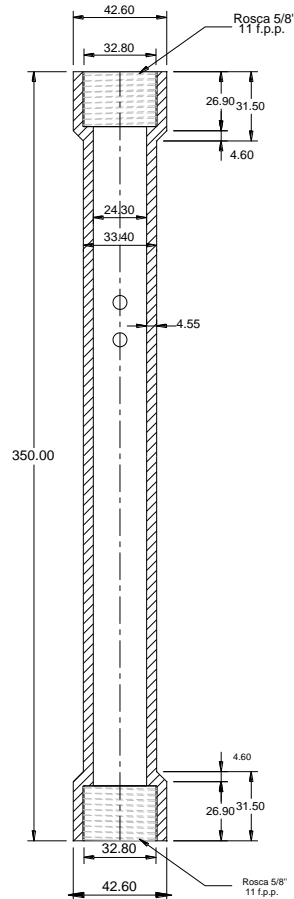


Figura 2. 4 - Composição para cravação (Modificado de Lukiantchuki, 2012).

- *Amostrador padrão tipo Raymond*: é composto pelas seguintes partes (Figura 2. 5):
 - *Corpo*: constituído por um tubo de aço perfeitamente retilíneo podendo ou não ser bipartido longitudinalmente, com dimensões nominais padronizadas. O amostrador deve ter um comprimento de 609.6 mm, diâmetro interno de $34.9 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ e diâmetro externo de $50.8 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$.
 - *Cabeça*: deve ter dois orifícios laterais para saída de água e do ar, bem como devendo conter interiormente uma válvula constituída por esfera de aço recoberta de material inoxidável.
 - *Sapata ou bico*: Deve ser de aço temperado para resistir os esforços ao qual é submetido, não deve apresentar trincas, rebordos, denteações, amassamentos ou algum outro tipo de deformação que altere a seção nominal do mesmo.

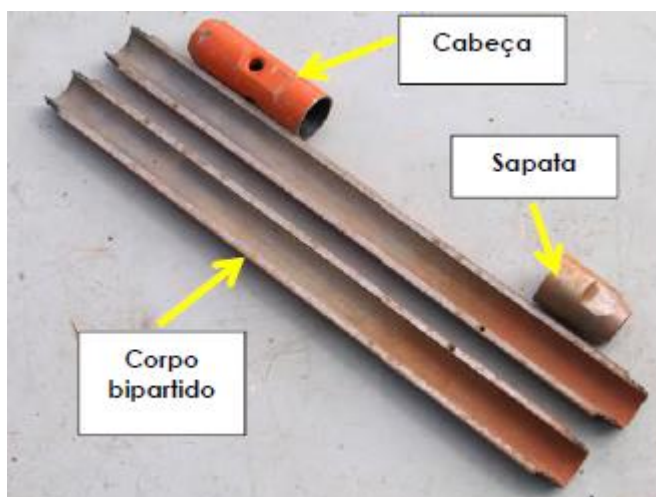


Figura 2. 5 - Amostrador do tipo Raymond bipartido (Lukiantchuki, 2012).

2.1.3 Execução do ensaio SPT

Para executar o ensaio SPT, inicialmente instala-se a torre no local onde será executado o ensaio. No topo da torre é montado um conjunto de roldanas pelas quais passa uma corda, que ajudam no manejo das hastes e a elevar o martelo a uma altura desejada. Montado isso, para cada metro de profundidade são realizadas três etapas principais, fazendo assim a sondagem de simples reconhecimento com medida do SPT. As três etapas são (Lukiantchuki, 2012):

- **Perfuração:** utilizando um trado-concha ou uma cavadeira manual se deve abrir um furo inicial de 1m de profundidade onde posteriormente é inserido o amostrador e realizado o ensaio. Nos seguintes metros de profundidade, e até atingir o nível da água, deve ser utilizado um trado helicoidal para a perfuração inicial. Após de encontrar o nível da água, com auxílio de um trepano, a escavação do furo é realizada com circulação de água.
- **Ensaio de penetração:** nessa etapa é determinado o índice N_{SPT} de resistência à penetração do solo. Consiste em aplicar golpes sucessivos através do martelo, o deixando cair livremente de uma altura padrão de 0.75m causando a cravação de 0.45m do amostrador no solo. Corresponde ao índice de resistência N_{SPT} , o número de golpes necessários para cravar os últimos 0.30m do amostrador no solo.
- **Amostragem:** consiste em coletar para cada metro de profundidade o solo que fica dentro do amostrador (amostra) depois da sua cravação total, para a realização de testes posteriores e classificação táctil visual do solo. A amostragem possibilita descobrir as camadas de solo que compõem o perfil do terreno e a descoberta do nível freático.

A cravação do amostrador-padrão é interrompida antes dos 45 cm de penetração sempre que ocorrer uma das seguintes situações:

- a) em qualquer dos três segmentos de 15 cm, o número de golpes ultrapassar 30; ou
- b) não se observar avanço do amostrador-padrão durante a aplicação de cinco golpes sucessivos do martelo.

2.2 Energia no ensaio SPT

Apesar de o SPT ser o ensaio de reconhecimento geotécnico mais utilizado no Brasil e grande parte do mundo, devido à sua simplicidade e facilidade de operação e também por ser mais econômico várias críticas têm sido feitas por usar o índice N_{SPT} em correlações empíricas baseadas em observações práticas, sem nenhum fundamento científico, também pela dispersão dos resultados, principalmente proveniente da dependência do operador e da diversidade dos equipamentos e dos procedimentos em uso. É por esta razão que, a fim de comparar os diferentes resultados de distintas equipes, é necessário conhecer a eficiência (η) dos diferentes equipamentos.

No instante inicial de sua queda, o martelo do SPT perde energia potencial e ganha energia cinética máxima, que será máxima no instante imediatamente antes do impacto na cabeça de bater. Nesse momento, ocorre a propagação de uma onda de compressão no sentido descendente da composição das hastes, transmitindo a energia que faz com que o amostrador seja cravado no solo.

Para determinar experimentalmente a energia que chega ao amostrador é utilizada uma instrumentação composta por dois acelerômetros e uma célula de carga, instalados no segmento da haste localizado logo acima do amostrador. Os acelerômetros instalados diametralmente opostos medem a aceleração das partículas da haste propiciada pela onda de tensão gerada devido ao impacto do martelo. Integrando-se os sinais de aceleração obtém-se a velocidade das partículas (v) em função do tempo (t). A célula de carga mede a força axial na seção instrumentada. É possível obter a energia que atinge o mostrador por meio da integração do produto da força e velocidade ao longo do tempo (Sy e Campanella, 1991):

$$E = \int_0^t F \times v \cdot dt \quad 2.1$$

onde,

E = energia (J)

F = força axial (N);

v = velocidade da partícula (m/s);

t = tempo (s).

Também é possível avaliar teoricamente a quantidade de energia que chega ao amostrador, como será mostrado a seguir.

2.3 Eficiência do equipamento SPT

Inicialmente, a eficiência era definida como a relação entre a quantidade de energia transferida ao topo da composição de hastes (E_h), no momento do primeiro impacto do martelo, e a energia potencial nominal do ensaio SPT ($EP_T = M_m \times g \times h \approx 478.2$ J). Entretanto, a eficiência foi posteriormente redefinida como a relação entre a energia que realmente chega ao amostrador e a energia potencial nominal do ensaio (Aoki e Cintra, 2000).

Entretanto, a energia potencial disponibilizada ao sistema é maior do que a energia potencial nominal, pois ocorre um movimento descendente do sistema amostrador-haste-cabeça de bater com a cravação ou penetração do amostrador no solo (Odebrecht, 2003). Assim, a eficiência (η) deve ser calculada como a relação entre a energia que chega ao mostrador e a energia potencial do sistema (Equação 2. 2):

$$\eta = \frac{E_{amostrador}}{EP_{sistema}} \quad 2.2$$

O progresso da penetração do amostrador no solo, causada pelo impacto do martelo, pode ser dividido em três estágios (Figura 2. 6). O primeiro estágio ($t_1=0$) corresponde ao momento antes da queda livre do martelo. O segundo estágio ($t_2=t$) representa o momento imediatamente antes de ocorrer o impacto entre o martelo e a cabeça de bater. E o terceiro estágio ($t_3=\infty$) mostra o amostrador totalmente cravado no solo após a finalização do ensaio. Nesse instante, a energia potencial gravitacional do martelo e das hastes já foi totalmente consumida na penetração do amostrador no solo, devolvidas elasticamente e amortecidas dinamicamente no interior do martelo e da haste (Odebrecht, 2003).

Considerando um referencial fixo e externo ao sistema, a energia potencial do sistema ($E_{psistema}$) pode ser representada pela seguinte equação:

$$EP_{sistema} = EP_T + (\Delta\rho \times M_m \times g) + (\Delta\rho \times M_h \times g) \quad 2.3$$

onde,

EP_T = energia potencial teórica ($H \times M_m \times g$);

H = altura de queda (m);

M_m = massa do martelo (kg);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

$\Delta\rho$ = penetração do amostrador (m);

M_h = massa das hastes (kg).

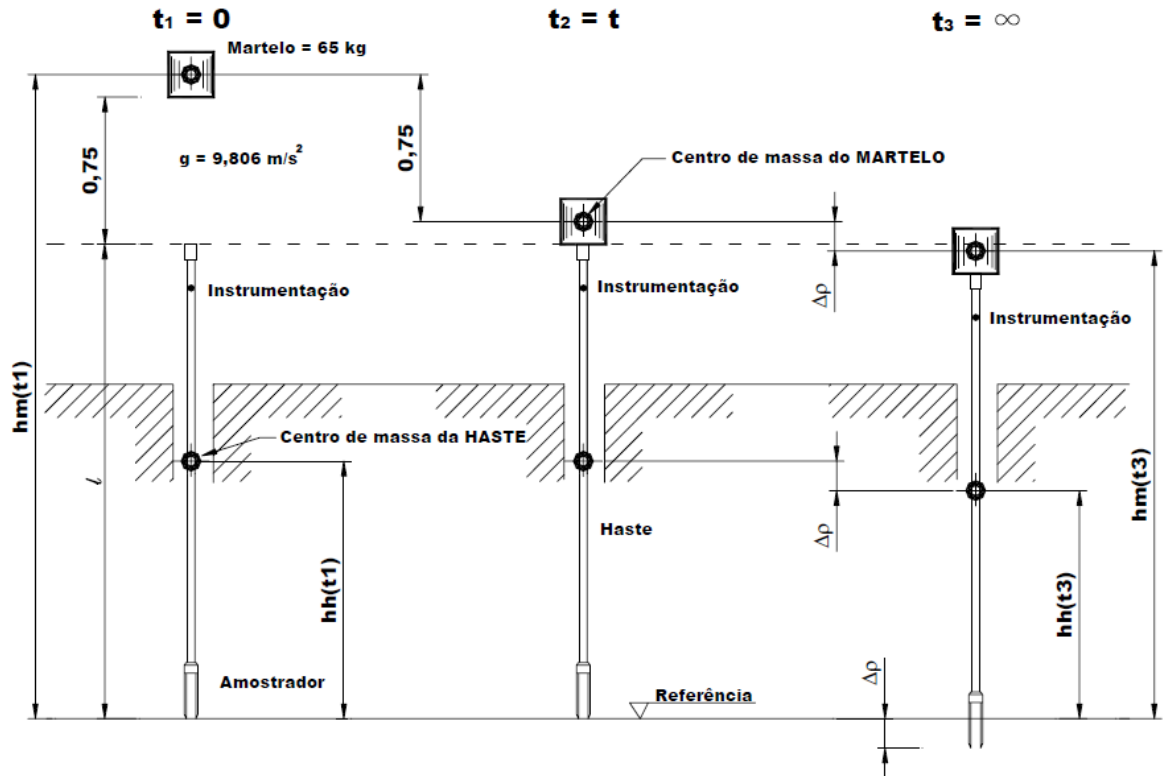


Figura 2. 6 - Energia potencial do sistema considerando o acréscimo de energia devido ao movimento do martelo e as hastes (Odebrecht, 2003).

Quando se tem comprimentos de haste maiores que 20 metros e/ou solos mais resistentes, com $N_{SPT} \geq 15$, a penetração do amostrador no solo é muito pequena. Assim, o acréscimo da energia potencial gravitacional do martelo e das hastes pode ser considerado desprezível, de modo que o valor da energia potencial do sistema é bastante próximo ao valor da energia potencial gravitacional teórica inicial. Para esses casos, pode-se assumir que os valores dessas energias são iguais (Odebrecht, 2003).

A quantidade de energia que atinge o amostrador pode ser obtida experimentalmente utilizando uma instrumentação nas hastes conforme mencionado no item 2.2. Segundo Odebrecht et al. (2004), outra alternativa para se avaliar a quantidade de energia que chega ao amostrador seria teoricamente através da utilização de três coeficientes de eficiência: eficiência do martelo (η_1), eficiência da composição de hastes (η_2) e eficiência do sistema (η_3). Estes coeficientes quantificam a energia perdida no processo de penetração do amostrador no solo. A quantidade de energia perdida depende do tipo de equipamento utilizado (tipo do martelo, o comprimento das hastes, a geometria do amostrador, equipamento mecânico ou automático,

etc.), dos cuidados na realização do ensaio (mal ajustamento das peças que compõem o equipamento) e as reflexões da onda devido à utilização de luvas para conectar as hastes. Assim, a energia que chega ao amostrador é representada por:

$$E_{amostrador} = \eta_3 [\eta_1 (EP_T + (\Delta\rho \times M_m \times g)) + \eta_2 (\Delta\rho \times M_h \times g)] \quad 2.4$$

Para se estimar preliminarmente a quantidade de energia que atinge o amostrador, utilizando essa equação, para configurações do equipamento SPT brasileiro, pode-se adotar seguintes coeficientes (Odebrecht et al., 2005):

$$\eta_1 = 0.76$$

$$\eta_2 = 1 \text{ e}$$

$$\eta_3 = 1 - 0.0042L_h, \text{ onde } L_h \text{ é o comprimento total da composição de hastes}$$

Também é importante compreender que quanto menor o comprimento das hastes e/ou menos resistente for o solo abaixo do amostrador, maior será a eficiência do equipamento, pois menor é a quantidade de energia elástica recuperável que será armazenada nas hastes e no solo. Isto indica que quando o comprimento das hastes tende a zero, a eficiência do sistema é máxima (Cavalcante, 2002).

2.4 Transferência de Energia no Ensaio SPT

Quando ocorre o impacto do martelo na cabeça de bater, uma onda de compressão se propaga pela composição de hastes. Essa onda é formada por pulsos que perdem a sua intensidade ao longo do tempo. O intervalo de tempo para a onda atingir a extremidade do amostrador e ser refletida de volta é de aproximadamente $2\ell/C$, onde ℓ é o comprimento do conjunto de hastes e C é a velocidade de propagação da onda gerada. O martelo e a cabeça de bater permanecem em contato até o instante $2\ell/C$, quando chegam os pulsos de tensão refletidos durante a cravação do amostrador (Lukiantchuki, 2012).

O processo da transferência de energia mostrando os fenômenos de propagação (reflexão e absorção) dos pulsos de tensão é mostrado na Figura 2. 7 (Lukiantchuki, 2012), sendo:

1. Martelo inicialmente em repouso é levantado a uma altura (hq). Neste momento a energia disponível no sistema se encontra na forma de energia potencial (Figura 2. 7a);
2. Quando o martelo é deixado cair livremente, ocorre uma transformação da energia potencial em energia cinética. No instante que o martelo impacta a cabeça de bater, essa energia cinética é transferida à composição de hastes, propagando uma onda de compressão no sentido descendente (Figura 2. 7b);

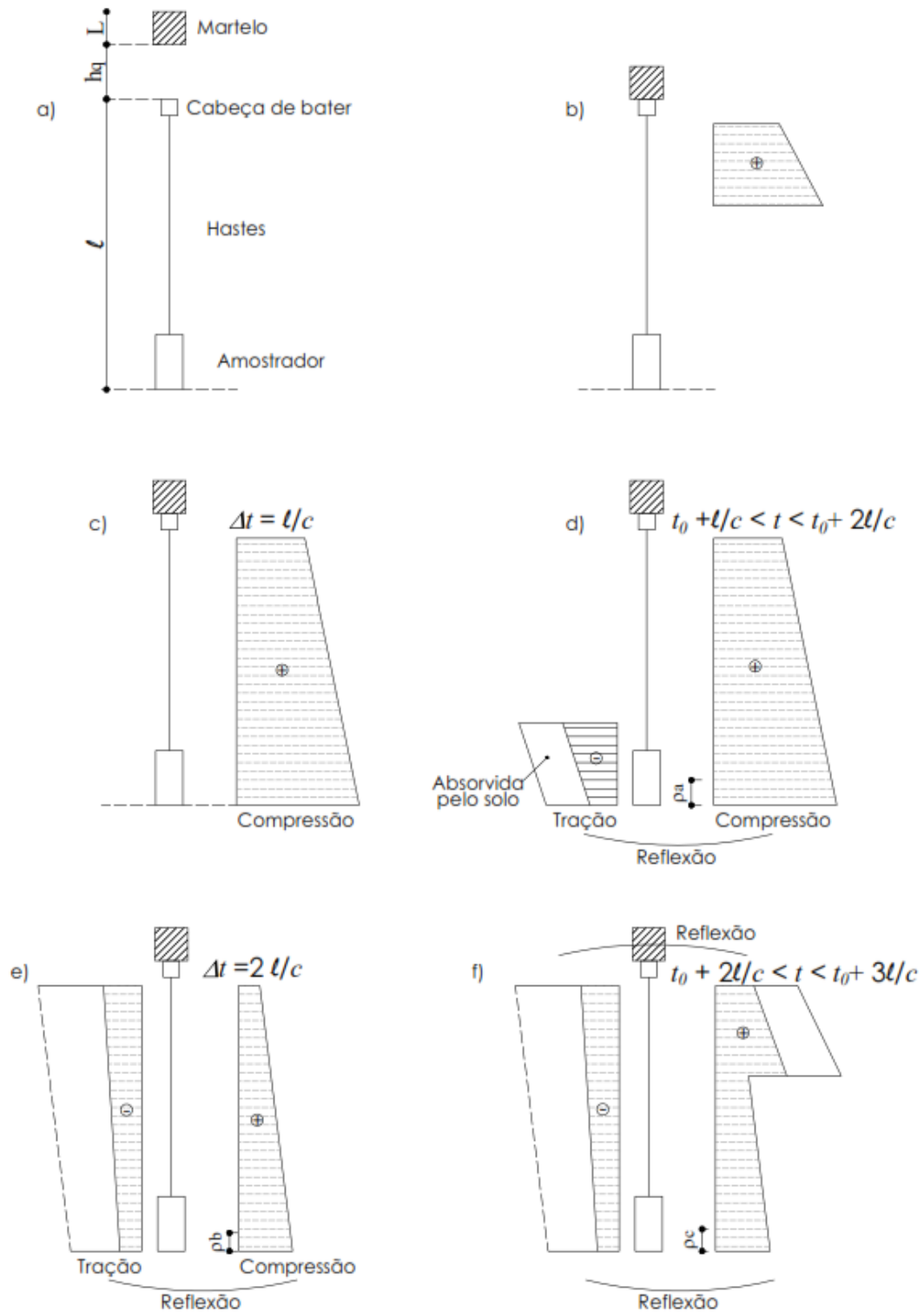


Figura 2. 7 - Propagação de ondas de tensão no ensaio SPT (Lukiantchuki, 2012).

3. No instante l/C , os pulsos atingem o amostrador (Figura 2. 7c), e uma parte dessa energia é transformada no trabalho necessário para causar penetração do amostrador no solo (Figura 2. 7c, d, e). A outra parte da energia é refletida também na forma de pulsos de tensão, em sentido ascendente até atingir o topo da composição de hastes (Figura 2. 7e);

4. A partir do instante $2l/C$ (Figura 2. 7f), quando os pulsos refletidos chegam ao topo do conjunto de hastes, eles são novamente refletidos no sentido descendente. Quando a onda alcança o amostrador pela segunda vez, no instante $3l/C$, esses pulsos podem causar uma penetração adicional do amostrador, dependendo da magnitude dos pulsos e da resistência do solo;

No instante $2l/C$ ocorre uma rápida separação entre a cabeça de bater e o martelo, de forma preponderante quando o N_{SPT} é baixo (Cavalcante, 2002). Quando o martelo impacta novamente a cabeça de bater, ocorre a propagação de uma segunda onda de tensão com sentido descendente e transferindo a quantidade de energia gerada pela segunda queda do martelo. Após o segundo impacto as ondas não são mais simples, agora estando formadas por pulsos ascendentes e descendentes, aqueles gerados por novos impactos do martelo, e aqueles refletidos na ponta do amostrador e no topo da cabeça de bater (Lukiantchuki, 2012). Cabe destacar que todos estes impactos sucessivos foram a partir da aplicação de um único golpe do martelo.

As ondas continuam se propagando ao longo da composição de hastes e amostrador, até serem consumidas na cravação do amostrador no solo e nas perdas existentes durante a sua propagação. O evento finaliza quando a magnitude dos pulsos não é suficiente para permitir qualquer penetração adicional do amostrador (Lukiantchuki, 2012).

2.5 Aplicação do princípio de conservação da energia de Hamilton no ensaio SPT

Aoki e Cintra (2000), baseando-se no Princípio da Conservação de Energia de Hamilton, estimaram as energias envolvidas no ensaio SPT devido à aplicação de um golpe do martelo na cabeça de bater. O Princípio de Hamilton pode ser representado pela expressão variacional (Equação 2. 5) que coincide com a lei da conservação da energia, a qual afirma que a energia não pode ser criada nem destruída, mas uma forma de energia pode ser transformada em outra.

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(T - V)dt + \int \delta(W_{nc})dt = 0 \quad 2. 5$$

onde:

δ = Variação no intervalo de tempo (t_2-t_1);

T = Energia cinética total no sistema;

V = Energia potencial no sistema;

W_{nc} = Trabalho realizado por forças não conservativas (incluindo amortecimento);

Para uma melhor compreensão da aplicação do princípio de Hamilton ao impacto do martelo que ocorre no ensaio, a Figura 2. 8 mostra a evolução da energia potencial, a energia cinética e o trabalho realizado por forças não conservativas e a transferência da energia pelas hastes no ensaio SPT.

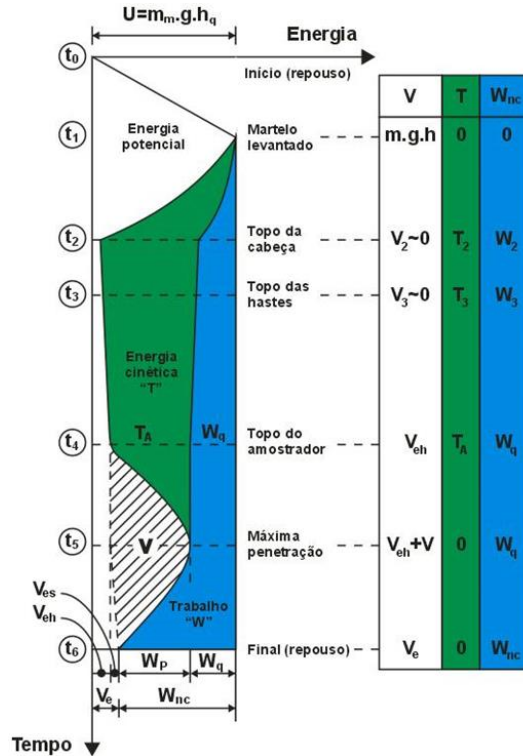


Figura 2. 8 - Evolução da energia potencial, energia cinética e trabalho das forças não conservativas durante o golpe do martelo (Zapata, 2015).

Os principais instantes e eventos na evolução das diferentes energias e o trabalho durante o do ensaio, são descritos a seguir:

1. No instante t_0 , é iniciado o levantamento do martelo, que ganha energia potencial.
2. No instante t_1 , o martelo e a cabeça de bater estão separados por 0.75 m, e o sistema se encontra com uma energia potencial inicial ($EP_T = 478.2J$). Esta energia também pode ser chamada como energia potencial nominal.
3. No instante t_2 , após a queda livre do martelo, ocorre o impacto com a cabeça de bater, quando a energia potencial inicial (EP_T) se transforma em três parcelas: energia cinética (T_2), energia de deformação elástica (V_2) (aproximadamente nula) e em trabalho realizado por forças não conservativas (W_2), devido ao atrito na corda e na roldana do equipamento.
4. Quando a onda de tensão percorre a cabeça de bater, no intervalo de tempo (t_2 a t_3) as variações da energia potencial e cinética e também do trabalho das forças não conservativas podem ser consideradas desprezíveis.

5. Do instante t_3 até o instante t_4 , a onda percorre descendentemente pelas hastes até atingir o topo do amostrador. Durante esse intervalo de tempo a energia cinética T_3 se reduz para T_A e o trabalho realizado por forças não conservativas no sistema W_3 aumenta ligeiramente para W_q , causado principalmente pelo acoplamento das hastes por meio de luvas (podendo ser considerado desprezível). A energia de deformação passa de nula para V_{eh} , devido à deformação elástica da composição de hastes. A energia cinética que atinge o amostrador no instante t_4 (T_A), é utilizada por Aoki e Cintra (2000) no cálculo da eficiência do equipamento SPT. Quanto maior for o comprimento da composição de hastes, menor será o valor da energia cinética que atinge o amostrador (T_A) (Neves, 2004).
6. Durante o intervalo de tempo (t_4 a t_5), a energia cinética (T_A), é transformada em energia potencial de deformação (V).
7. Esta energia potencial de deformação (V), no intervalo de tempo (t_5 a t_6) é transformada em energia de deformação elástica (V_e), que pode ser dividida em duas parcelas, uma causada pela deformação elástica do solo e do amostrador (V_{es}) e a outra causada pela deformação elástica das hastes (V_{eh}). Além da energia de deformação elástica (V_e), outra parte da energia potencial de deformação (V) é transformada em trabalho realizado pelas forças resistentes não conservativas (W_p), causada pela cravação do amostrador no solo.
8. Toda a energia potencial elástica (V_e) é restabelecida no instante t_6 , para os solos mais resistentes. No fim do evento, o trabalho total realizado por forças não conservativas é representado por W_{nc} , e a quantidade desse trabalho que corresponde às forças resistentes resultantes da penetração do amostrador no solo é representado por W_p . Assim, o sistema entra em repouso e o evento é encerrado. Principalmente em solos pouco resistentes, a onda é refletida no tempo t_6 , resultando em novos impactos sucessivos, de menor intensidade, mas que derivam em penetrações adicionais até o sistema entrar em repouso.

2.6 Teoria da equação da onda

No começo da década de 30, se deu início à aplicação dos conceitos de propagação de ondas a partir de análises da cravação de barras no solo. Entretanto estes conceitos só foram concretizados após a publicação de Smith (1960), na qual que apresentou uma rotina de cálculo para compreender o procedimento de penetração de elementos de fundações no solo (Lobo, 2009).

Para entender como a onda trafega através das hastes, é importante relembrar que após martelo impactar na cabeça de bater, é gerada uma onda longitudinal de tensão descendente,

transferindo uma força de compressão uniforme F_x , que se propaga ao longo do conjunto de hastes com uma velocidade C . Belicanta (1985) mostra algumas hipóteses simplificadoras que devem ser assumidas quando a teoria da equação da onda é aplicada em barras elásticas de comprimento finito, como é o caso das hastes do ensaio SPT. Essas hipóteses são mostradas a seguir:

- A seção transversal da haste permanece plana durante a propagação da onda de tensão ao longo do seu comprimento.
- A tensão se distribui uniformemente na seção transversal da haste.
- Os movimentos transversais das partículas são desprezíveis.
- Durante a propagação da onda na composição de hastes, as perdas de energia são desprezíveis.
- A onda se propaga na composição de hastes com uma velocidade constante (C) que depende das características do material das hastes.
- O material que compõe o conjunto de hastes é elástico linear.

Uma força dinâmica aplicada a um corpo elástico forma ondas de tensão e deformação que se propagam no interior do corpo com velocidades finitas (Lukiantchuki, 2012). No ensaio SPT, no momento do impacto do martelo com a cabeça de bater, uma pequena parte da haste é comprimida (Figura 2. 9a). Esta deformação comprime o elemento seguinte que se deforma e assim sucessivamente, nos elementos subsequentes. Este efeito em cadeia de deformação, gera uma onda de compressão que percorre a composição de hastes com uma velocidade C (Lobo, 2009). A força de compressão F_x é transmitida de seção em seção com comprimento dx , em um intervalo de tempo dt :

$$dx = C \times dt \quad 2.6$$

Conforme mostrado na Figura 2. 9b, em uma região da haste, com comprimento dx , ocorre um encurtamento elástico du que é o deslocamento no topo do segmento de haste, que pode ser determinada pela lei de Hooke:

$$\sigma_x = E_h \times \varepsilon = E_h \times \frac{du}{dx} \quad 2.7$$

onde,

σ_x = tensão de compressão (kPa), assumida positiva;

E_h = módulo de elasticidade do material das hastes (MPa).

ε = deformação

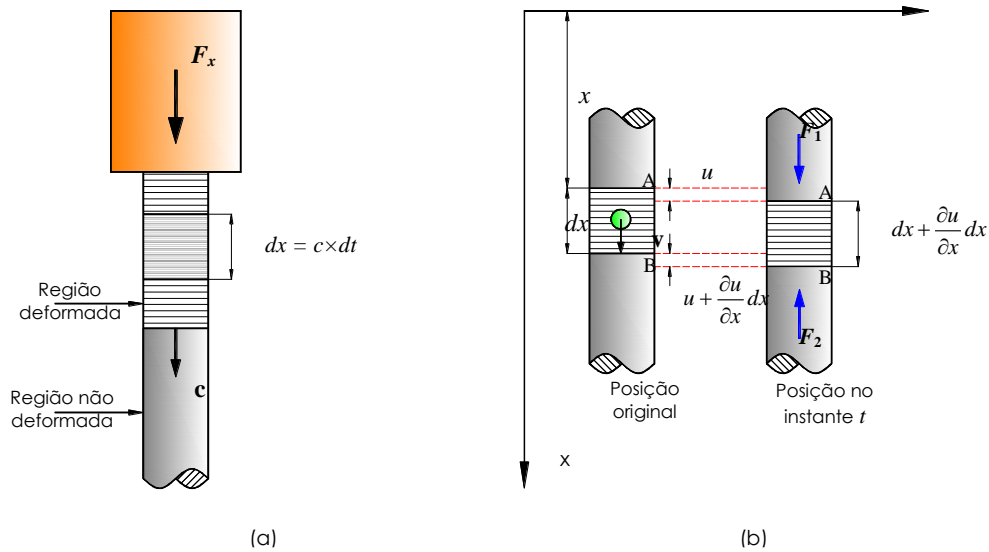


Figura 2.9 - Propagação da onda longitudinal de compressão uniforme em uma composição de hastes (Lukiantchuki, 2012).

Combinando as Equações 2.6 e 2.7, resulta:

$$\frac{du}{dt} = \frac{\sigma_x}{E_h} \times C \Rightarrow v = \frac{\sigma_x}{E_h} \times C \quad 2.8$$

onde,

v = velocidade de partícula

As partículas da zona comprimida estão sujeitas à mesma velocidade v . As partículas situadas logo à frente da onda de propagação com velocidade inicial nula ($v=0$) são aceleradas, atingindo uma velocidade final v .

Como mostra a equação 2.8, a velocidade da partícula (v) terá o mesmo sentido da velocidade de propagação da onda (C) quando a onda for de compressão. No caso de ser uma onda de tração as velocidades terão sentidos contrários.

De acordo com a Segunda Lei de Newton pode-se escrever:

$$F_x \times dt = m \times v \quad 2.9$$

$$F_x = a_h \times \sigma_x \quad 2.10$$

$$m = \rho_h \times a_h \times dx \quad 2.11$$

onde:

m = massa do elemento.

a_h = área de seção transversal.

ρ_h = massa específica do material da haste.

Substituindo as equações 2. 6, 2. 10 e 2. 11 na Equação 2. 9, obtém-se:

$$\sigma_x = \rho_h \times v \times C \quad 2. 12$$

A partir das equações 2. 8 e 2. 12 pode-se obter a velocidade da onda:

$$C = \sqrt{\frac{E_h}{\rho_h}} \quad 2. 13$$

A Equação 2. 13 comprova que a velocidade de propagação de uma onda longitudinal de tensão (C) depende só das propriedades do meio em que se propaga. Entretanto, a velocidade das partículas do corpo (v) depende além das propriedades do meio, também do nível de tensão aplicada (Equação 2. 8).

Combinando as Equações 2. 8 e 2. 10 obtém-se a equação 2. 14, que mostra a existência de uma proporcionalidade entre a força de compressão aplicada no corpo e a velocidade adquirida pelas partículas. Nessa equação, a constante de proporcionalidade Z é denominada impedância.

$$F_x = \frac{E_h \times a_h}{C} \times v = Z \times v \quad 2. 14$$

2.7 Condições de contorno

As condições do contorno, tais como, resistência do solo, mudanças na seção e terminação das hastes, atrito entre o solo e o amostrador, definem como a onda de tensão se propaga e se reflete ao longo do conjunto de hastes do equipamento do SPT (Belincanta, 1985). Como mencionado anteriormente, para empregar a teoria de equação da onda no ensaio SPT, é suposto que a seção transversal das hastes permanece plana. Através da verificação das velocidades das ondas descendentes e ascendentes e do equilíbrio de forças, outras condições de contorno podem ser estudadas. S

No instante em que a onda longitudinal de compressão chega ao amostrador ($t = \ell/C$), este se desloca e o solo reage com uma força de reação dinâmica (R_D). Essa onda de tensão possivelmente vai se decompor em duas parcelas. Uma parcela é refletida e a outra é utilizada no trabalho que provoca a penetração do amostrador no solo. A intensidade e sentido da onda refletida e da onda consumida na cravação dependem do estado em que o solo se encontra (Zapata, 2015).

Com as equações de equilíbrio (Equação 2. 15) e de compatibilidade (Equação 2. 16), é possível obter a força de reação dinâmica do solo (R_D) e a velocidade das partículas (v_p) na extremidade do amostrador.

$$R_D = F \downarrow + F \uparrow \quad (\text{Equilíbrio}) \quad 2.15$$

$$v_p = v \downarrow + v \uparrow \quad (\text{Compatibilidade}) \quad 2.16$$

onde $F \downarrow$ e $v \downarrow$ são a força e a velocidade correspondentes à onda incidente e $F \uparrow$ e $v \uparrow$ são a força e a velocidade correspondentes à onda refletida.

A partir das equações de equilíbrio e compatibilidade, é possível seguir uma convenção de sinais para a velocidade das partículas e a força axial, como mostrado na Tabela 2.1 (Zapata, 2015).

Tabela 2.1 - Sinais e sentido adotados para velocidades e forças.

Onda	Força
Descendente	$F \downarrow = v \downarrow Z > 0$ (Compressão)
Ascendente	$F \uparrow = -v \downarrow Z < 0$ (Tração)

De acordo com Odebrecht (2003), são as seguintes possibilidades do que pode acontecer no solo, quando a onda incidente atinge o amostrador:

- Resistência dinâmica do solo nula ($R_D = 0$), permitindo a penetração livre do amostrador (extremidade da haste livre).
- Resistência dinâmica do solo consideravelmente elevada ($R_D = \infty$), impedindo a penetração do amostrador (extremidade da haste engastada).
- Resistência dinâmica do solo finita e igual à força correspondente à onda incidente ($F \downarrow$) (extremidade da haste semi-engastada).

2.7.1 Extremidade da haste livre

A extremidade da haste pode ser considerada livre quando se supõe que não haja reação do solo ($R_D = 0$), ou melhor, o amostrador é cravado livremente no solo. Neste caso, a onda que atinge o amostrador é refletida com igual intensidade, porém com sentido inverso. Assim, quando a onda incidente for de compressão, a onda refletida será de tração. (Equação 2.17 e Figura 2.10).

$$R_D = 0 \Rightarrow F \uparrow = -F \downarrow \quad 2.17$$

A partir da soma das velocidades derivadas da onda incidente e da onda refletida pode ser obtida a velocidade das partículas do amostrador. Igualmente, as partículas no segmento de superposição das ondas de tensão descendente e ascendente serão de novo aceleradas durante e

após da reflexão, pois a velocidade das partículas no amostrador duplica seu valor (Equações 2.18 e 2.19) (Belincanta, 1985).

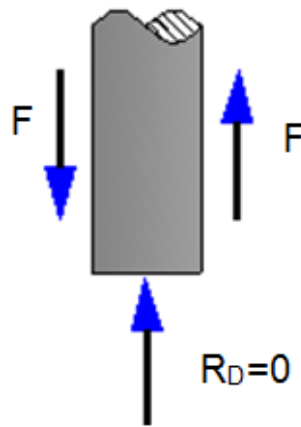


Figura 2.10 - Extremidade da haste livre (adaptado de Belincanta, 1985).

$$v_p = v \downarrow + v \uparrow = \frac{F \downarrow}{Z} - \frac{F \uparrow}{Z} \quad 2.18$$

$$v_p = \frac{F \downarrow}{Z} + \frac{F \downarrow}{Z} = \frac{2F \downarrow}{Z} = 2v \downarrow \quad 2.19$$

2.7.2 Extremidade da haste engastada

A extremidade da haste pode ser considerada engastada quando a resistência do solo é suficientemente elevada para evitar a cravação do amostrador no solo ($R_D = \infty$), de forma que a velocidade das partículas seja zero. (Equação 2.20).

$$v_p = 0 \Rightarrow v \uparrow = -v \downarrow \quad 2.20$$

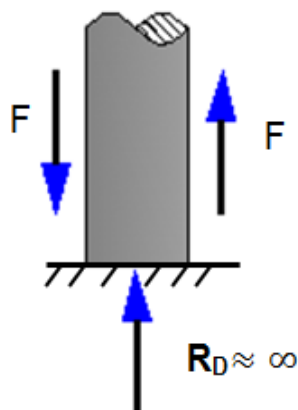


Figura 2.11 - Extremidade da haste engastada (adaptado de Belincanta, 1985).

Assim, a onda que atinge o amostrador é refletida com o mesmo sinal e a mesma intensidade. Em tal caso, tanto a onda descendente e como a onda ascendente são de

compressão, ou seja, a força total, será duplicada por causa da superposição das ondas longitudinais. Também ocorre uma mudança no sentido da velocidade após a reflexão.

$$F = F \downarrow + F \uparrow = 2F \downarrow \quad 2.21$$

2.7.3 Extremidade da haste semi-engastada

Quando o solo oferece uma resistência ou força de reação finita, a extremidade do amostrador pode ser considerada como semi-engastada, assumindo que a força de reação dinâmica do solo é igual à força de compressão que atinge o amostrador (Equação 2.22 e Figura 2.12).

$$R_D = F \downarrow + F \uparrow \Rightarrow F \uparrow = R_D - F \downarrow \quad 2.22$$

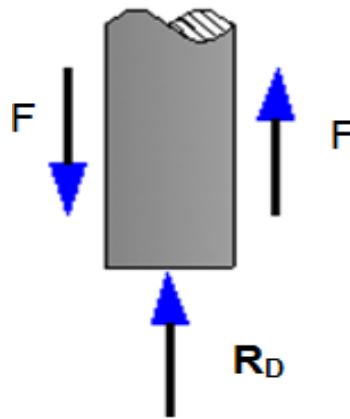


Figura 2.12 - Extremidade da haste semi-engastada (adaptado de Belincanta, 1985).

Supondo que a onda de tensão descendente seja de compressão, através da Equação 2.22, pode-se concluir que:

- Não haverá onda refletida na extremidade da haste, se a força de reação dinâmica do solo (R_D) for igual à força incidente ($F \downarrow$).
- A onda refletida será de compressão, se força de reação dinâmica do solo (R_D) for maior do que a força incidente ($F \downarrow$).
- A onda refletida será de tração, se a força de reação dinâmica do solo (R_D) for menor do que a força incidente ($F \downarrow$).

A velocidade das partículas (v_p) e a penetração do amostrador no solo ($\Delta\rho$) podem ser estimados a partir das Equações 2.23 e 2.24. O instante t_1 é quando começa o evento e o instante t_2 quando o evento é encerrado após da ocorrência de todos os impactos sucessivos.

$$v_p = v \downarrow + v \uparrow = \frac{F \downarrow}{Z} + \left(-\frac{F \uparrow}{Z} \right) = \frac{F \downarrow}{Z} - \frac{(R_D - F \downarrow)}{Z} = \frac{(2F \downarrow - R_D)}{Z} \quad 2.23$$

$$\Delta\rho = \int_{t_1}^{t_2} v_p dt = \frac{1}{Z} \int_{t_1}^{t_2} (2F \downarrow - R_D) dt \quad 2.24$$

De acordo com a Equação 2. 24, pode-se dizer que haverá deslocamento do amostrador ($\Delta\rho$) quando a velocidade for positiva, ou seja, quando $2F\downarrow$ for maior que a força de reação do solo (R_D).

2.8 Resistência à penetração

O índice de resistência N_{SPT} é utilizado para obter parâmetros usados no projeto de fundações, tais como, a capacidade de carga de uma fundação ou a tensão admissível do solo. Também podem ser estimadas características de engenharia com base em correlações empíricas (ASTM International, 2010). Porém, a resistência real do solo à cravação não é representada pelo índice N_{SPT} .

O valor real da resistência à penetração do solo, pode ser representado pela força de reação dinâmica ou pela força de reação estática causada pela penetração do amostrador no solo. É possível estimar essas forças de reação por meio da quantidade de energia que chega ao amostrador (Zapata, 2015).

2.8.1 Resistência dinâmica mobilizada durante a cravação do amostrador SPT

Partindo da quantidade de energia que chega ao amostrador, é possível estimar o trabalho necessário para cravar o amostrador no solo. Esse trabalho corresponde ao produto da força de reação dinâmica do solo pela penetração do amostrador no solo. Assim, a força de reação dinâmica teórica do solo causada pela penetração do amostrador no solo pode ser determinada por meio da seguinte equação:

$$E_{amostrador} = W_p = F_d \times \Delta\rho \Rightarrow F_d = \frac{E_{amostrador}}{\Delta\rho} \quad 2.25$$

onde

$E_{amostrador}$ = energia que atinge o amostrador.

W_p = trabalho realizado pelas forças não conservativas atuantes no sistema amostrador-solo.

F_p = Resistência dinâmica teórica de reação do solo.

$\Delta\rho$ = penetração do amostrador no solo.

Segundo Schnaid et al. (2009), combinando-se as equações 2. 4 e 2. 25, pode-se calcular a resistência dinâmica teórica do solo à cravação do amostrador:

$$F_d = \frac{\eta_3[\eta_1(EP_T + (\Delta\rho \times M_m \times g)) + \eta_2(\Delta\rho \times M_h \times g)]}{\Delta\rho} \quad 2. 26$$

Odebrecht et al. (2004), sugerem usar na equação 2. 26 os valores de 0.76, 1 e 1-0.0042ℓ, para os coeficientes η_1 , η_2 e η_3 respectivamente, onde ℓ é o comprimento total do conjunto de hastes em metros.

Ainda segundo Schnaid et al. (2009), é importante obter a força dinâmica teórica (F_d), pois, a interpretação das propriedades do solo, tanto em areias como em argilas, baseada nesta força, permite a avaliação de parâmetros do solo.

Em diferentes trabalhos sobre a interpretação dos resultados do ensaio SPT, que consideram a energia envolvida na cravação do amostrador, tem sido medida experimentalmente a força dinâmica de reação do solo (R_D). Utilizando uma instrumentação instalada no segmento de haste localizada logo acima do amostrador, é possível obter sinais da força axial na seção instrumentada para todos os golpes do ensaio em cada profundidade do perfil do terreno. Para certa profundidade a reação R_D do solo é definida como a média dos valores das reações dinâmicas do solo (R_{Di}) para cada golpe (Lukiantchuki et al., 2012):

$$R_D = \frac{\sum R_{Di}}{N_{SPT}} \quad 2. 27$$

onde N_{SPT} é o número de golpes para a cravação dos últimos 0.3 m do amostrador no solo nessa profundidade.

2.8.2 Resistência estática mobilizada durante a cravação do amostrador SPT

Para um corpo submetido a um carregamento estático para penetrar no solo, o equilíbrio de forças é muito mais simples de se analisar do que o equilíbrio de forças quando se trata de um elemento submetido a um carregamento dinâmico (Neves, 2004).

De acordo com a Figura 2. 13, a carga P aplicada sobre a estaca pode ser decomposta em duas parcelas. Uma delas atua sobre a superfície lateral da estaca (fuste) (P_L) e a outra atua na extremidade da estaca (P_p):

$$P = P_p + P_L \quad 2. 28$$

Igualmente, o solo reage com um esforço de reação ao longo do fuste (R_L) e outro esforço de reação na extremidade da estaca (R_p). Para que não se altere o equilíbrio do sistema, a somatória destes esforços deve coincidir com o valor da carga P :

$$R_p + R_L = P \quad 2.29$$

$$R_p + R_L = P_p + P_L \quad 2.30$$

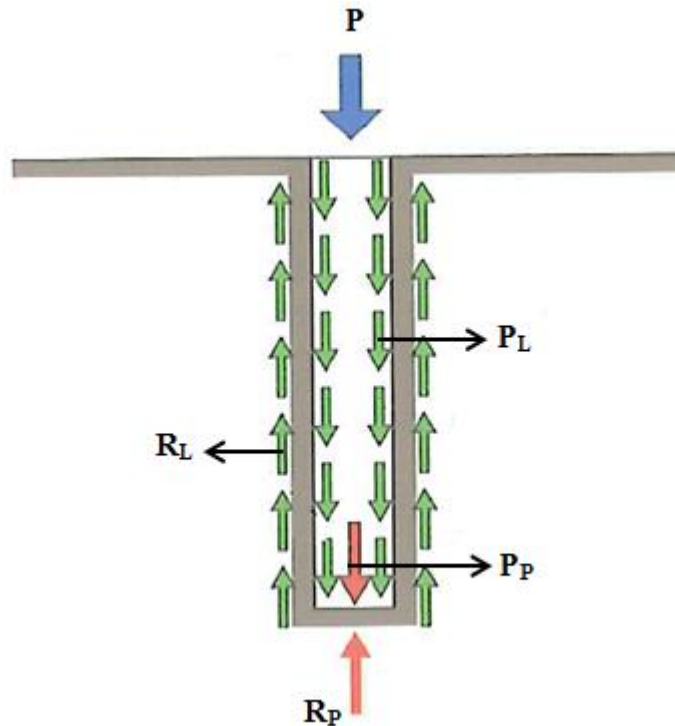


Figura 2. 13 - Esquema de esforços de uma estaca submetida a carregamento estático (modificada de NEVES, 2004).

Somente quando a resistência ao longo do fuste de uma estaca (R_L) atinge seu valor máximo, a resistência de ponta (R_p) é mobilizada. Para o caso em que são aplicados esforços estáticos sobre o amostrador, se a reação estática do solo (R_s), representasse a única parcela da resistência total (R_t) apresentada pelo solo, a equação 2. 29 poderia ser escrita da seguinte forma:

$$R_p + R_L = R_s \Rightarrow R_t = R_s \quad 2.31$$

Durante a cravação do amostrador, a reação dinâmica do solo (R_D) pode ser decomposta em duas parcelas de resistência, uma resistência estática (R_s) e uma resistência viscosa (R_v) (Smith, 1960):

$$R_D = R_s + R_v \quad 2.32$$

A parcela de resistência viscosa (R_v) depende do coeficiente de amortecimento dinâmico (J), da força de reação estática e da velocidade das partículas (v). Executando ensaios SPT em areias e areias siltsosas, Neves (2004) estimou as velocidades das partículas utilizando acelerômetros instalados na haste logo acima do amostrador. Nesses ensaios, os valores estimados das velocidades apresentaram valores muito baixos na faixa de 1.0 a 2.0 m/s

aproximadamente. Conseqüentemente, os valores de resistência viscosa (R_v) resultaram também muito baixos, podendo assumir $R_v \cong 0$.

Portanto, nesse caso, para os solos estudados por Neves (2004) a única parcela de reação do solo devido à penetração do amostrador é a parcela de resistência estática (R_s), independentemente de o esforço aplicado no amostrador ser dinâmico ou estático. Assim, pode concluir-se que:

$$R_t = F_d \cong R_s \quad 2.33$$

2.8.3 Resistência estática mobilizada através da aplicação do Princípio de Hamilton

Assumindo a validade da Equação 2.33, a Equação 2.25 pode ser reescrita, fornecendo então a força de reação à cravação do amostrador no solo:

$$R_s = R_t = F_d = \frac{E_{amostrador}}{\Delta\rho} \quad 2.34$$

Devido a que para uma determinada profundidade a penetração do amostrador no solo tem um valor diferente para cada golpe, então o deslocamento $\Delta\rho$ é assumido como uma penetração média nessa profundidade:

$$\Delta\rho = \frac{0.3}{N_{SPT}} (m) \quad 2.35$$

Substituindo a equação 2.35 na equação 2.34:

$$R_s = E_{amostrador} \frac{N_{SPT}}{0.3} (N) \quad 2.36$$

A resistência estática do solo pode então ser determinada a partir da eficiência do equipamento, sugerida por Aoki e Cintra (2000):

$$\eta = \frac{E_{amostrador}}{EP_T} = \frac{E_{amostrador}}{478.2} \quad 2.37$$

Nas equações 2.36 e 2.37 a energia que chega ao amostrador ($E_{amostrador}$) deverá estar em Joules.

Combinando as Equações 2.36 e 2.37, obtém-se:

$$R_s = \frac{\eta \times 0.478 \times N_{SPT}}{0.3} (kN) \quad 2.38$$

Essa expressão permite que o índice N_{SPT} seja interpretado como um parâmetro com significado físico. A Equação 2.38 pode ser redefinida, a fim de incorporar a correção da

energia potencial do sistema, considerando a correção proposta por Odebrecht (2003) que adota um referencial fixo e externo ao sistema (Morais, 2014).

$$R_s = \eta \times \left[\frac{M_m \times g \times 0.75 \times \left(\frac{0.3}{N_{SPT}} + 0.75 \right)}{1000} \right] \times \frac{N_{SPT}}{0.3} \quad (\text{kN}) \quad 2.39$$

Noreña (2011) realizou provas de carga estáticas com amostradores em solos arenosos e comparou os seus resultados com a resistência dinâmica do solo calculada com a Equação 2.26, confirmando que as resistências estática e dinâmica podem ser consideradas iguais. Também verificou que as resistências dinâmica e estática não são diferentes devido a possíveis alterações que ocorrem nas condições do solo, quando o carregamento aplicado for dinâmico (Figura 2.14). Essa comparação permite calcular a resistência dinâmica do solo à cravação do amostrador SPT a partir da equação 2.39.

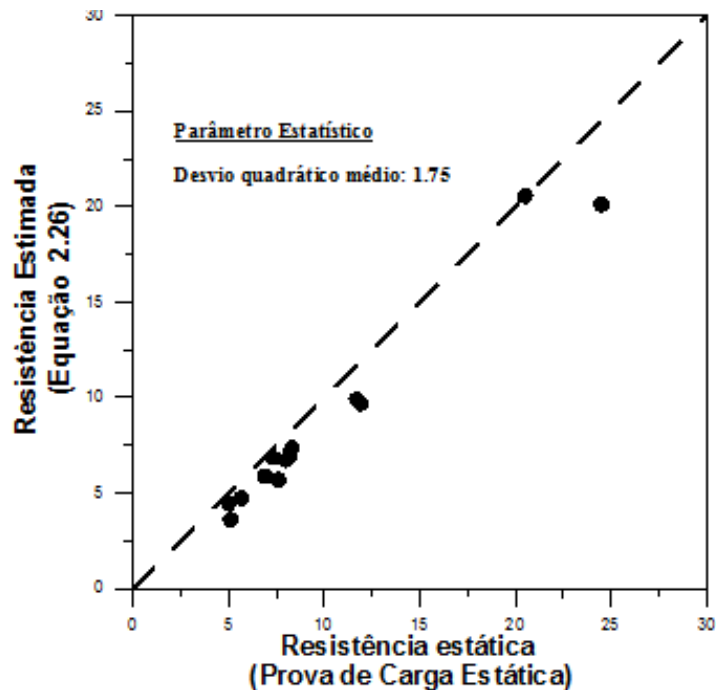


Figura 2.14 - Comparação resistência estática e dinâmica (modificada de Noreña, 2011).

2.8.4 Resistência por atrito lateral e de ponta no amostrador SPT

De acordo com Aoki (2013), para se estimar a resistência à penetração do amostrador no solo e o atrito lateral entre o amostrador e o solo no ensaio SPT, é necessário conhecer:

- a) dimensões do amostrador;
- b) comprimento da amostra de solo recuperada no interior do amostrador;
- c) índice de resistência N_{SPT} ;

- d) eficiência do equipamento;
- e) relação entre a resistência unitária nas paredes interna e externa do amostrador (fator de atrito a).

Assim, não é necessário conhecer o tipo do solo onde foi realizado o ensaio (Aoki, 2013).

A Figura 2. 15 mostra as forças atuantes no amostrador durante a sua penetração no solo, permitindo definir a equação de equilíbrio das forças verticais não conservativas atuantes no amostrador durante o impacto do martelo:

$$R_D + W_h = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad 2. 40$$

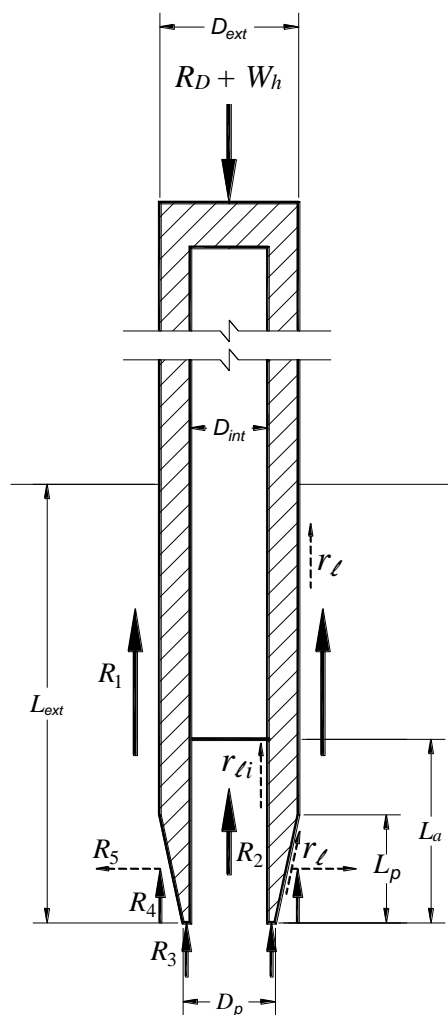


Figura 2. 15 - Equilíbrio de forças atuantes no amostrador (modificado de Zapata, 2015).

Na Figura 2. 15, tem-se:

D_{ext} = diâmetro externo do amostrador = 50.8 mm

D_{int} = diâmetro interno do amostrador = 34.7 mm

D_p = diâmetro da ponta do amostrador = 32.8 mm

L_p = comprimento da seção biselada do amostrador = 21.5 mm

L_{ext} = penetração total do amostrador.

L_a = comprimento da amostra.

r_ℓ = resistência unitária na parede externa e no chanfro do amostrador.

r_{li} = resistência unitária na parede interna do amostrador.

R_D = força de reação dinâmica experimental.

W_h = peso das hastes e cabeça de bater.

R_1 = força de reação na parede vertical externa do amostrador.

R_2 = força de reação na parede interna do amostrador.

R_3 = força de reação vertical na seção anelar da ponta do amostrador.

R_4 = componente vertical da força de reação ao longo da superfície biselada tronco-cônica do amostrador.

R_5 = componente horizontal da força de reação ao longo da superfície biselada tronco-cônica do amostrador.

As forças de reação R_1 e R_2 , que se desenvolvem ao longo das paredes laterais externa e interna do amostrador, são dadas por:

$$R_1 = \pi \times D_{ext} \times (L_{ext} - L_p) \times r_\ell \quad 2.41$$

$$R_2 = \pi \times D_{int} \times r_{li} \times L_a \quad 2.42$$

Introduzindo o fator de atrito (a), pode-se reescrever a equação 2.42 como:

$$R_2 = \pi \times D_{int} \times a \times r_\ell \times L_a \quad 2.43$$

A Figura 2.16 apresenta o equilíbrio das resistências atuantes na ponta aberta do amostrador, sendo possível observar que a força de reação interna (R_2) é igual à resultante da resistência unitária sob a ponta aberta do amostrador padrão SPT:

$$R_2 = \pi \times \frac{D_{int}^2}{4} \times r_p \quad 2.44$$

A partir da semelhança dos ensaios SPT e CPT, é possível definir também a razão de atrito (R_f), como o número que relaciona a resistência unitária lateral externa (r_ℓ) com a resistência unitária de ponta (r_p) atuantes no amostrador SPT.

$$R_f = \frac{r_\ell}{r_p} = \frac{r_{li}}{a \times r_p} \quad 2.45$$

Combinando as equações 2.42 e 2.44, e substituindo na Equação 2.45, se obtém:

$$R_f = \frac{D_{int}}{4 \times a \times L_a} \quad 2.46$$

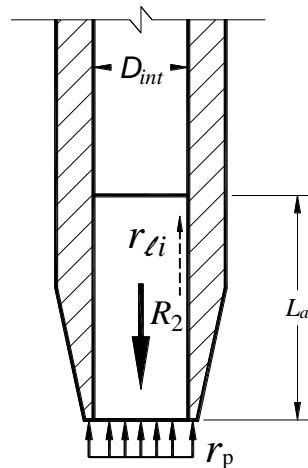


Figura 2. 16 – Forças atuantes na ponta aberta do amostrador (modificado de Zapata, 2015)

As forças de reação R_3 e R_4 podem ser estimadas a partir das seguintes equações:

$$R_3 = \frac{\pi}{4} \times (D_p^2 - D_{int}^2) \times \frac{r_\ell}{R_f} \quad 2.47$$

$$R_4 = r_\ell \times \left(S_L \times \frac{L_p}{L} \right) \quad 2.48$$

onde,

$$S_L = \frac{\pi \times L \times (D_{ext} + D_p)}{2} \quad 2.49$$

$$L = \left\{ L_p^2 + \left[\frac{D_{ext} - D_p}{2} \right]^2 \right\}^{0,5} \quad 2.50$$

Substituindo as equações 2. 41, 2. 43, 2. 47 e 2. 48 na equação 2. 40 que representa o equilíbrio das forças verticais não conservativas atuantes no amostrador durante a sua cravação, se obtém a equação 2. 51, para calcular a resistência unitária de atrito na parede externa e no chanfro do amostrador.

$$r_\ell = \frac{R_D + W_h}{\pi \times D_{ext} (L_{ext} - L_p) + \pi \times D_{int} \times a \times L_a + \frac{\pi}{4} \times \frac{(D_p^2 - D_{int}^2)}{R_f} + S_L \times \frac{L_p}{L}} \quad 2.51$$

2.9 A revolução da energia crescente

O ensaio SPT com instrumentação nas hastes representa uma prova de carga dinâmica no amostrador padrão, podendo ser considerados alguns conceitos que são aplicados na cravação de estacas e nas provas de carga dinâmicas realizadas nesses elementos de fundação. Aoki

(1989) apresenta a inovação da utilização de energia crescente nos sucessivos golpes propiciados em uma prova de carga dinâmica em estacas. O procedimento consiste em deixar cair o martelo de alturas crescentes, geralmente intervaladas de 10 centímetros ou 20 centímetros.

Na prova de carga dinâmica tradicional com energia constante, se obtém a resistência à cravação e o deslocamento máximo correspondente. Com a hipótese de estar na condição de ruptura, essa resistência é considerada R_u , e comparável à capacidade de carga de uma prova de carga estática. O valor de R_u para a aplicação de determinada energia pode estar bem longe da ruptura e representar apenas a resistência estática mobilizada para essa energia. A energia crescente passou a ser utilizada cada vez mais no Brasil, tendo sido incluída na revisão da NBR 13208 (ABNT, 2007) (Tsuha, Aoki e Cintra, 2013).

A prova de carga com energia constante fornece apenas um ponto da curva resistência estática mobilizada *versus* deslocamento (Figura 2. 17a), enquanto que a prova de carga com energia crescente provê uma serie de pontos que permitem plotar a curva resistência estática mobilizada *versus* deslocamento (Figura 2. 17b), que se assemelha a uma curva carga *versus* recalque de uma prova de carga estática.

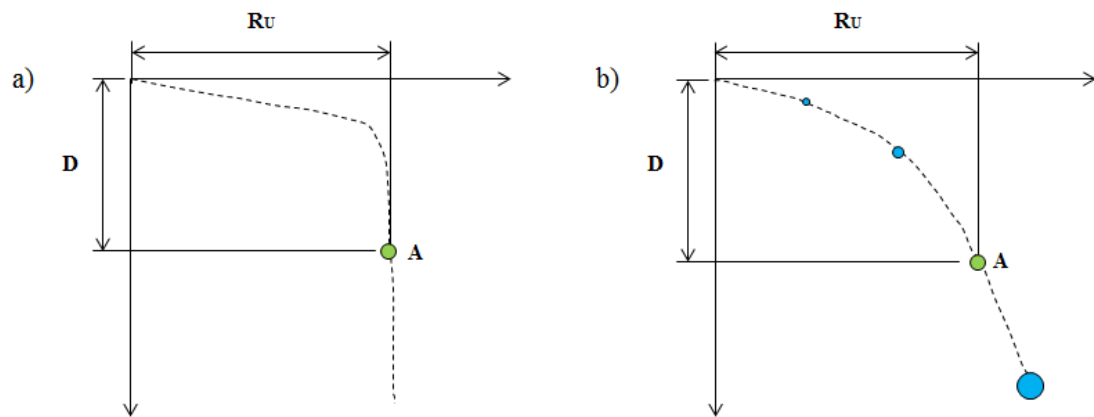


Figura 2. 17 - Curva de resistência estática mobilizada *versus* deslocamento: prova de carga com (a) energia constante e (b) energia crescente (Tsuha, Aoki e Cintra, 2013).



Capítulo 3

ÁREA DE ESTUDO

3 AREA DE ESTUDO

Para realizar as simulações numéricas da cravação do amostrador padrão SPT, foram considerados os perfis de solo correspondentes ao Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI) da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) em Campinas, São Paulo e ao Campo Experimental de Fundações da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP) em São Carlos, São Paulo. A escolha destes locais para a realização das simulações numéricas foi fundamentada na grande base de dados geotécnicos da área e também devido ao fato de que nesses locais foram realizados ensaios SPT com medida de energia, permitindo comparações de resultados.

3.1 Campo Experimental da FEAGRI - Unicamp

O Campo Experimental de Mecânica dos Solos e Fundações da FEAGRI faz parte do campus da Unicamp em Campinas, São Paulo. A área que conforma o campo experimental é utilizada somente para estudos geotécnicos. Há mais de 30 anos desde sua criação, já se fizeram diferentes estudos do solo da área e análises do comportamento de elementos de fundação nesse tipo de solos (Morais, 2014).

3.1.1 Aspectos Geológicos

O subsolo da região é composto por Migmatitos básicos, havendo rochas intrusivas básicas (Diabásios) da Formação Serra Geral, que pertence ao Grupo São Bento. Esse tipo de formação aflora em três áreas da cidade que perfazem 98 km² ocupando 14% da área total de Campinas (Cavalcante et al., 2006).

Nos Diabásios existentes nos afloramentos, pode se observar que eles estão bastante fraturados; essas fraturas formam blocos de menor tamanho, e normalmente estão abertas ou estão preenchidas com alguns materiais argilosos (Giacheti, 2001).

Giacheti (2001) descreve o perfil geotécnico como uma área constituída por duas camadas de solo muito diferentes. Inicialmente e até 6 m de profundidade, ocorre uma argila areno-siltosa, porosa, com comportamento laterítico e colapsível. Logo após, surge uma zona de transição com alguma presença de crostas lateríticas e a seguir uma camada de silte argiloso (solo residual maduro de Diabásio) de comportamento não laterítico, até uma profundidade aproximada de 20 m (Giacheti, 2001). Para maiores profundidades, existem solos residuais

jovens, com presença muito comum de núcleos de rocha apresentando menos alteração. Na profundidade aproximada de 18 m é encontrado o nível freático.

3.1.2 Caracterização Geotécnica

Nesse campo experimental já foi realizada um extensivo programa de ensaios geotécnicos. Na Figura 3. 1 se mostram alguns resultados de ensaios de laboratório realizados com os solos presentes no campo experimental da FEAGRI.

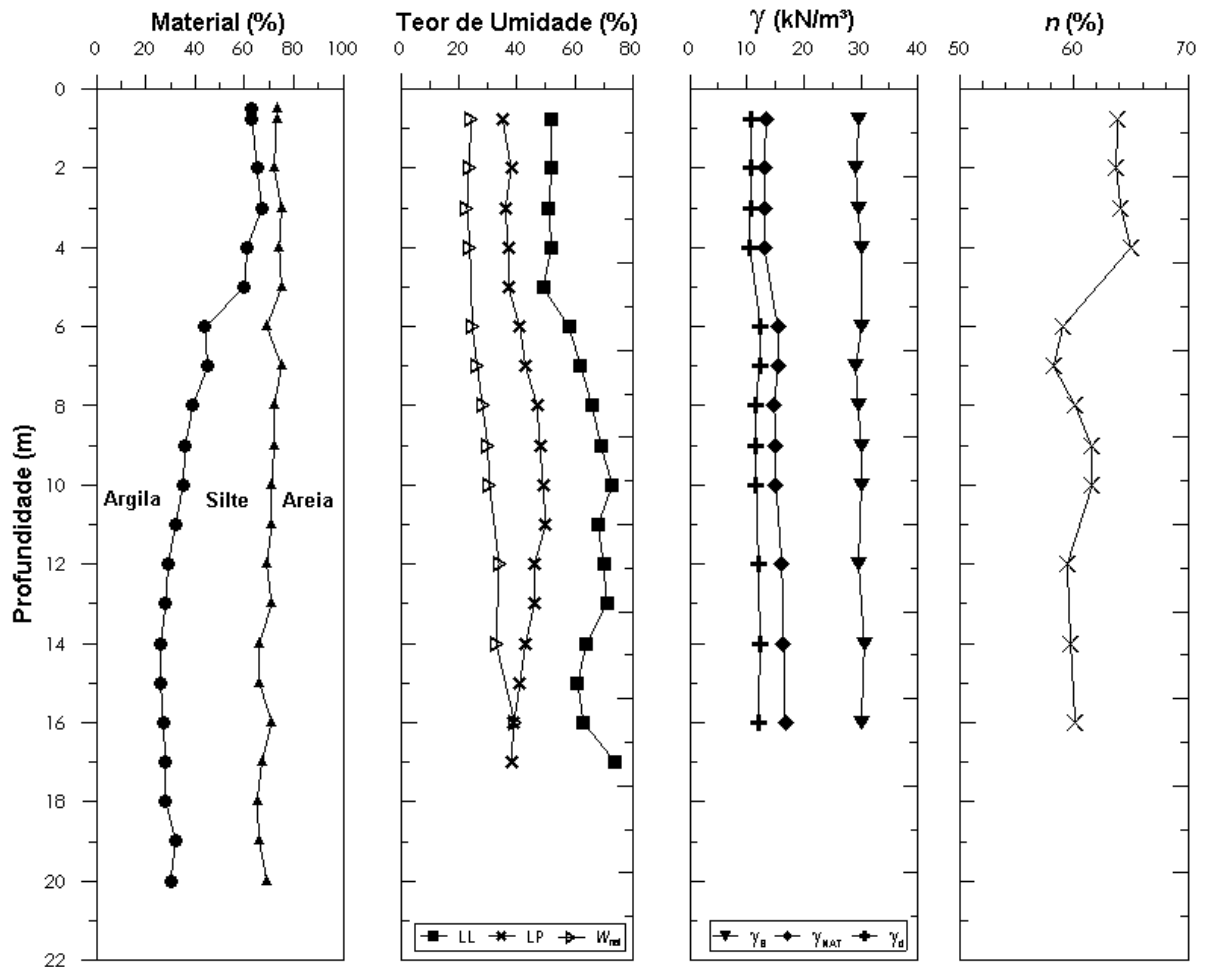


Figura 3. 1 - Resultados de ensaios de laboratório FEAGRI-Unicamp (Peixoto, 2001).

Alguns dos ensaios de campo realizados na área são nomeados a seguir: sondagens de simples reconhecimento do solo (SPT), SPT com medida de torque (SPT-T), ensaios de cone (CPT), Dilatômetro de Marchetti (DMT), Pressiômetro de Ménard (PMT), sondagem elétrica vertical e ensaios sísmicos (cross-hole, SCPT e S-SPT). A Figura 3. 2 mostra até 9 m de profundidade uma grande dispersão nos resultados de resistência de ponta (q_c) obtidos a partir de resultados de ensaios CPT, essa dispersão indica uma grande variabilidade nos parâmetros do solo para essas profundidades (Giacheti e De Mio, 2008).

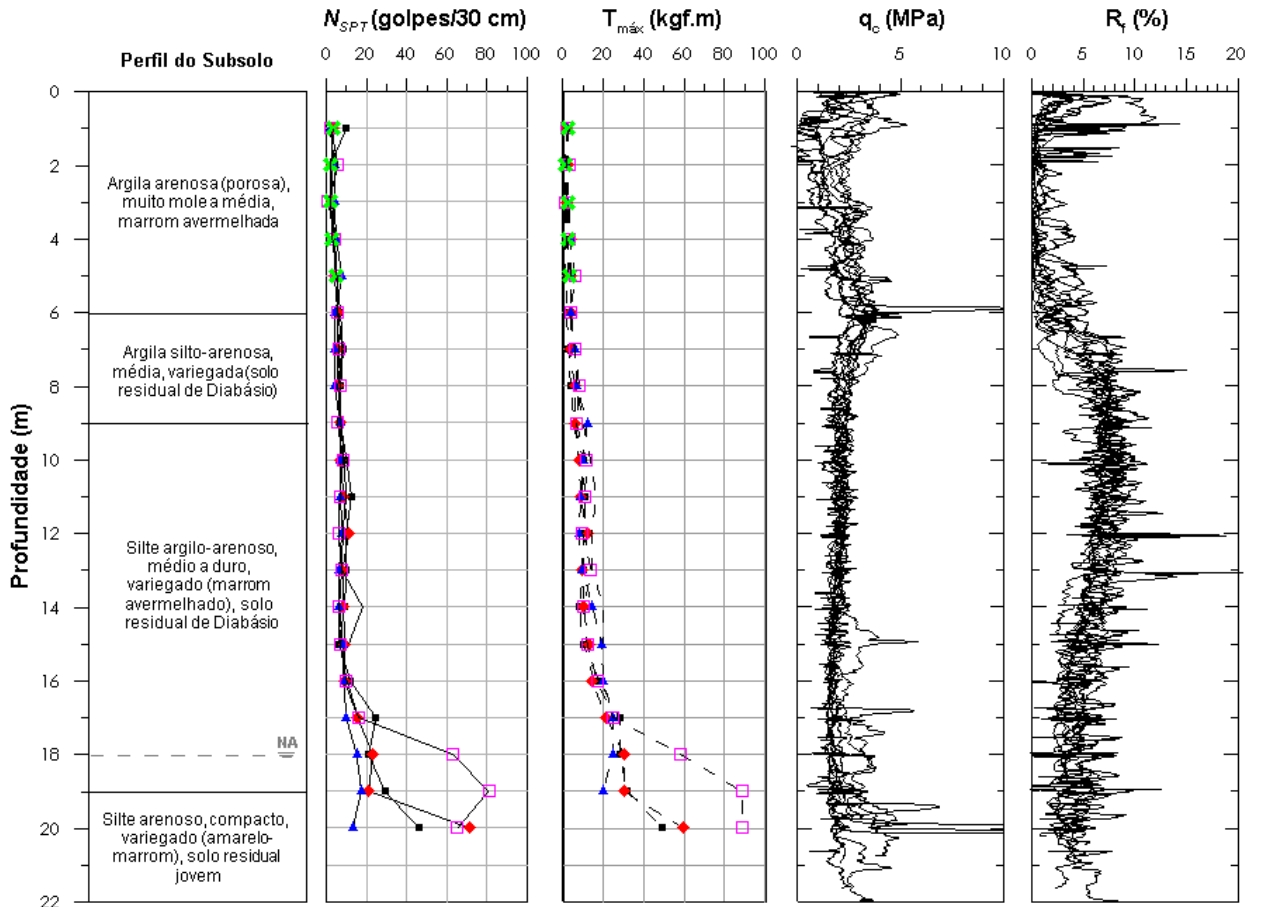


Figura 3. 2 - Resultados de ensaios de campo FEAGRI-Unicamp (Giacheti e De Mío, 2008).

3.1.3 Ensaios de Campo

Nos meses de outubro e novembro de 2013, Morais (2014) realizou no campo experimental da Unicamp ensaios SPT com medida de energia, utilizando o equipamento com acionamento manual e seguindo a norma NBR 6484 (ABNT, 2001). Foram executados três ensaios SPT (SP01 a SP03) no total, todos realizados até uma profundidade de 20 m. Porém, as medidas de energia somente foram conseguidas nos ensaios SP02 e SP03, utilizando uma instrumentação composta por dois acelerômetros e uma célula de carga, instalados nos segmentos da haste localizados logo acima do amostrador (base do conjunto de hastes) e logo abaixo da cabeça de bater (topo do conjunto de hastes). Para a sondagem SP02 foi utilizada uma configuração de luvas convencionais para a conexão entre os segmentos de haste, e para a sondagem SP03 foram utilizadas luvas bipartidas. A sondagem SP01, foi executada obtendo a medida de energia somente no topo do conjunto de hastes e foi realizada também a medida do torque após a penetração total do amostrador no solo (ensaio SPT-T).

As sondagens SPT foram executadas com 1 m de espaçamento entre elas, evitando variabilidade nos tipos de solo investigados em todas os ensaios (Figura 3. 3).

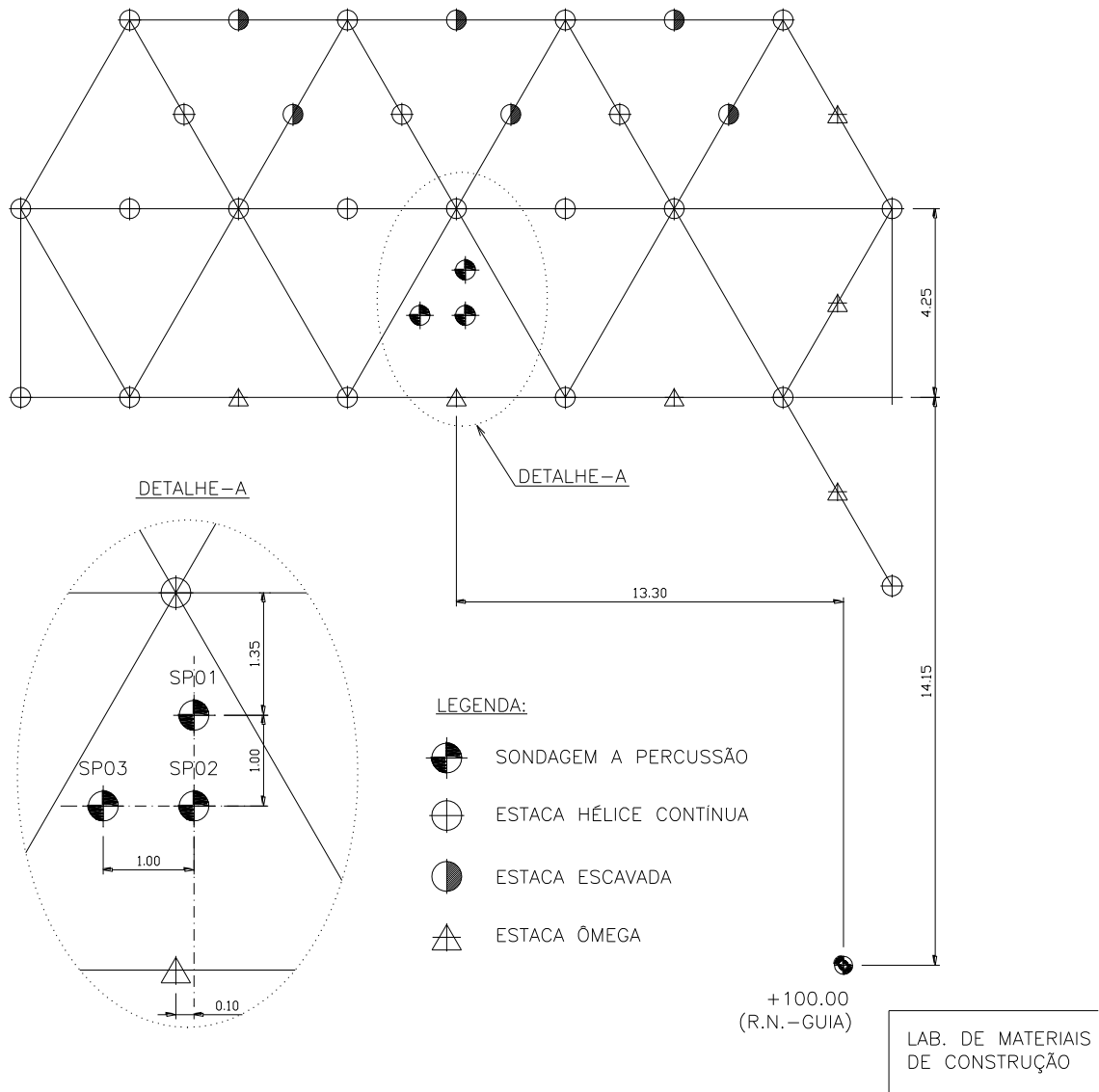


Figura 3.3 - Localização dos ensaios no campo experimental da FEAGRI/Unicamp. (Morais, 2014).

3.2 Campo Experimental da EESC - USP

O Campo Experimental de fundações está situado no Campus I da EESC-USP em São Carlos, São Paulo, ao lado da creche da Universidade e perto do Observatório. Neste local já foram realizados distintos ensaios de laboratório e de campo para o desenvolvimento das diferentes pesquisas do Departamento de Geotecnia.

3.2.1 Aspectos geológicos

O subsolo da região está composto por arenitos das Formações Botucatu e Pirambóia, e pelos derrames de rochas efusivas basálticas da Formação Serra Geral, que pertencem ao Grupo São Bento. Sobre estas rochas, se encontram arenitos e conglomerados do Grupo Bauru.

Cobrimdo superficialmente toda a região surgem os Sedimentos colapsáveis da era cenozoica (Peixoto, 2001). Um perfil geológico da região da cidade de São Carlos onde está localizado o campo experimental da ESSC é mostrado na Figura 3. 4

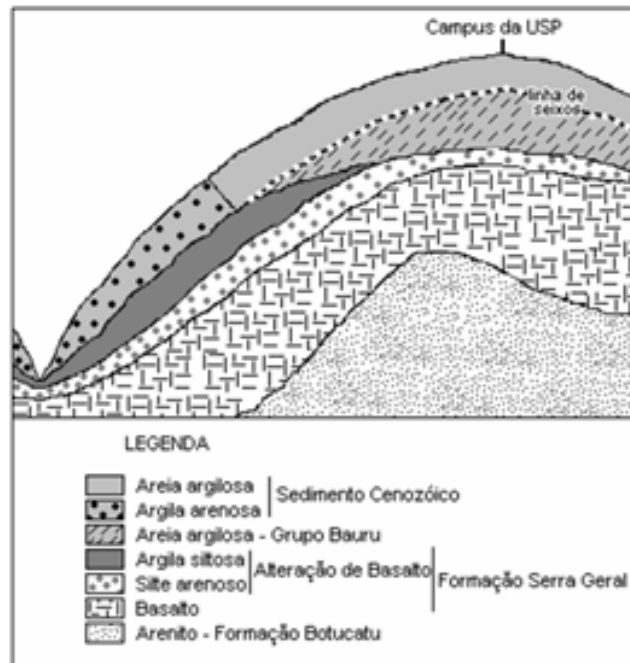


Figura 3. 4 - Seção esquemática da geologia de pequena profundidade em São Carlos (Bortoluci, 1983).

O perfil geotécnico da área que compõe o Campo Experimental da EESC-USP é constituído basicamente por duas camadas de areia fina e media, argilosa, pouco siltosa, que estão separadas a uma distância aproximada de 6.5 metros da superfície por uma linha-de-seixos (Peixoto, 2001). A primeira camada é identificada como Sedimento Cenozóico, muito porosa, pouco compacta e colapsável e a segunda como residual do Arenito do Grupo Bauru (Moraes, 2005). O nível freático varia de 7 a 10 m de profundidade, para os períodos mais úmidos e mais secos durante o ano.

3.2.2 Caracterização geotécnica

Ensaio de caracterização no laboratório para a obtenção de índices físicos foram realizados em trabalhos anteriores (Tabela 3. 1). A Figura 3. 5 apresenta os resultados de ensaios SPT e CPTu, realizados no Campo Experimental de fundações da EESC-USP.

Tabela 3. 1 - Resultados dos ensaios de caracterização. (Peixoto, 2001).

Prof. (m)	Limites de consistência		Granulometria			
	LL	LP	argila	silte	areia fina	areia média
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1.3	24	17	26	11	51	12
2.3	26	18	21	14	55	10
3.3	27	20	31	8	51	10
4.3	28	18	28	11	56	5
5.3	30	10	20	17	54	9
6.3	31	22	22	16	54	8
7.3	31	22	19	14	57	10
8.3	34	20	21	9	54	16
9.3	30	10	17	10	56	17
10.3	32	10	20	8	56	16

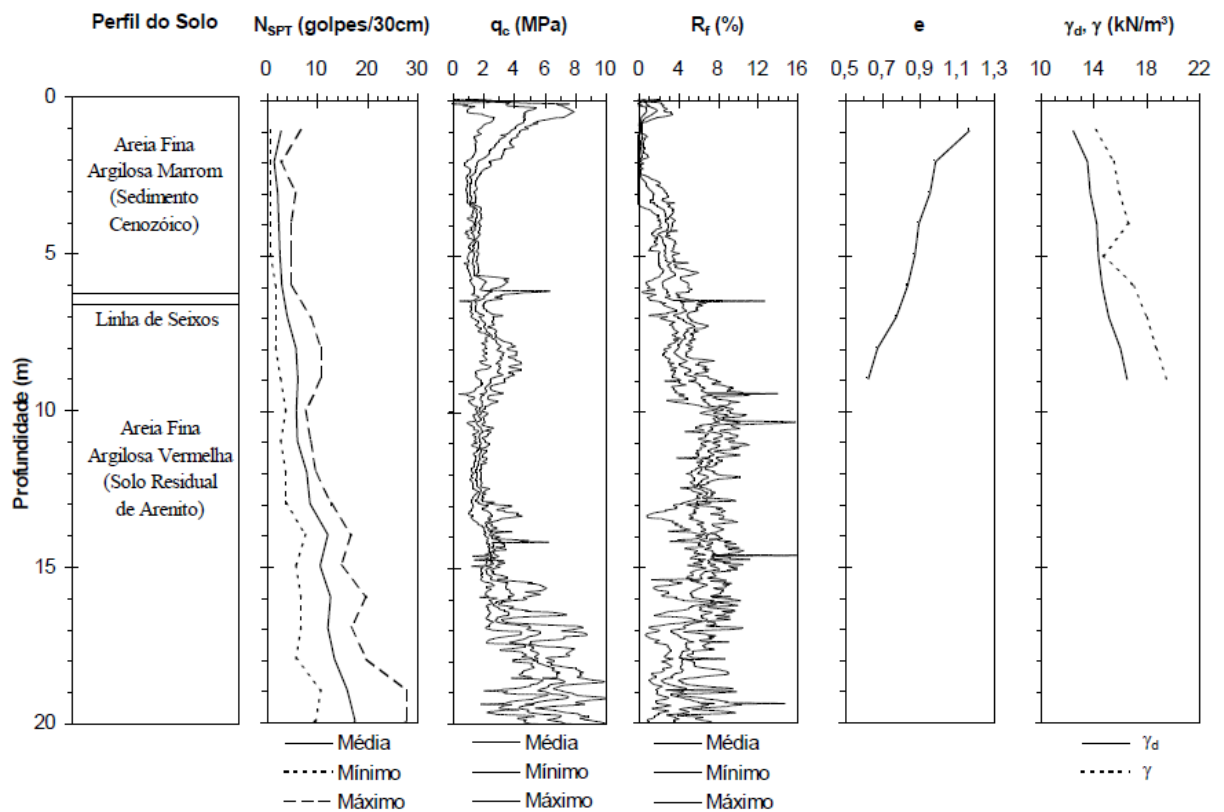


Figura 3. 5 - Resultados de ensaios penetrométricos de SPT e CPTu (Machado, 1998).

3.2.3 Ensaio de campo

Nesse local, foi realizada uma única sondagem SPT com medida de energia e com sucesso. O ensaio foi realizado com equipamento com acionamento manual e seguindo a NBR 6484 (ABNT, 2001). Esse ensaio foi realizado até uma profundidade de 10 m utilizando uma instrumentação composta por dois acelerômetros e uma célula de carga, instalados no

segmento da haste localizado logo acima do amostrador, adequada para avaliar as quantidades de energia para cada metro de profundidade. A sondagem SPT foi realizada em fevereiro de 2015, no local mostrado na Figura 3. 6.

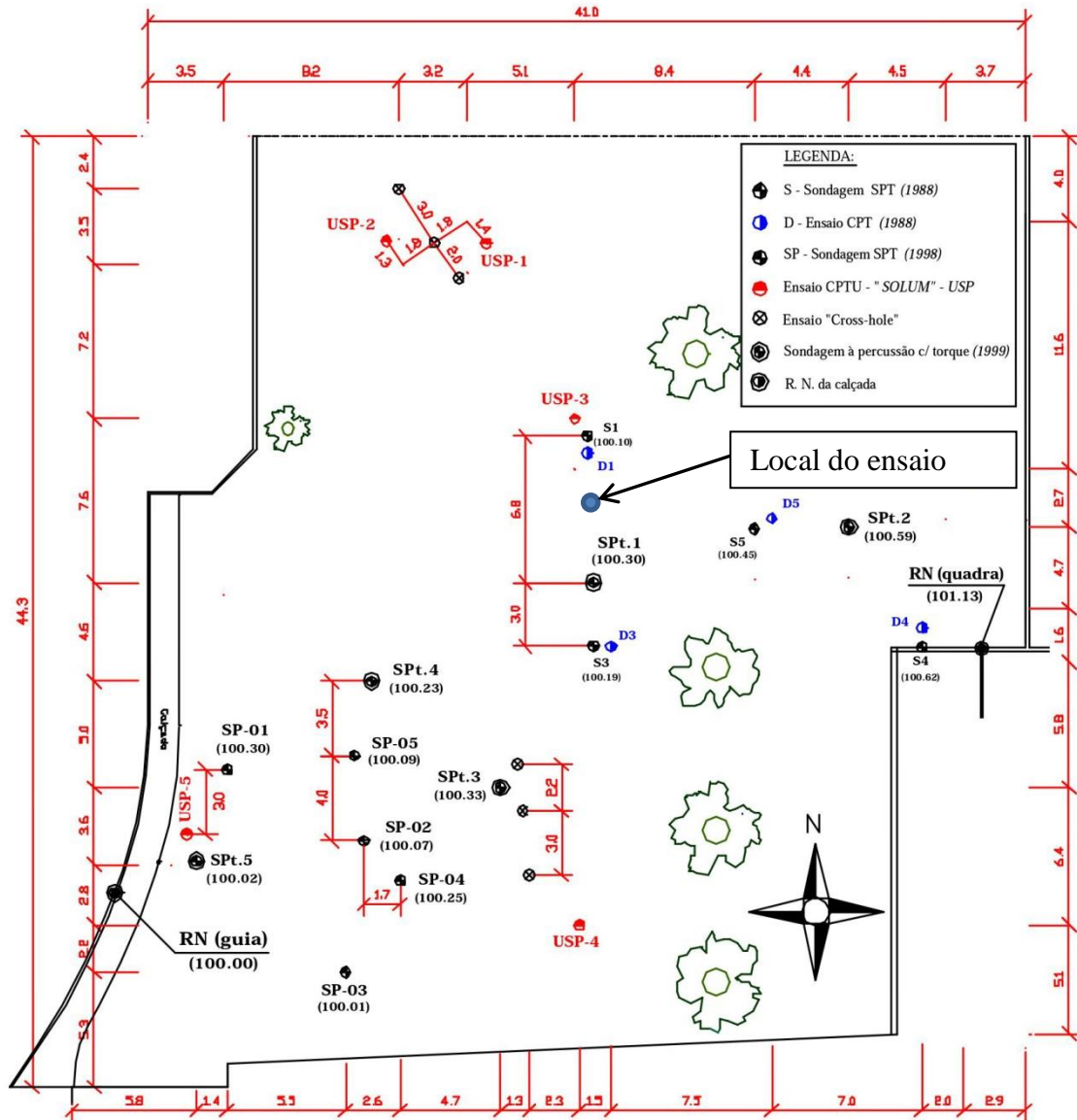


Figura 3. 6 - Localização do ensaio no campo experimental da EESC-USP (Zapata, 2015).



Capítulo 4

MODELAGEM NUMÉRICA DA CRAVAÇÃO DO AMOSTRADOR SPT

4 MODELAGEM NUMERICA DA CRAVAÇÃO DO AMOSTRADOR SPT

Ao longo das últimas décadas tem sido verificada uma grande evolução da capacidade de cálculo das ferramentas computacionais. Velocidades de processamento cada vez mais elevadas e maior capacidade de armazenamento de grandes volumes de informação têm incentivado o desenvolvimento de métodos de análise cada vez mais potentes e mais confiáveis, entre os quais se destacam os métodos baseados em formulações de elementos finitos (MEF). MEF tornou-se a ferramenta padrão para análises no âmbito da Mecânica dos Sólidos. No entanto, devido à sua dependência de uma malha, os programas usuais de MEF não são adequados para o tratamento de problemas com grandes deformações (Jassim, Coetzee e Vermeer, 2013). A simulação de grandes deformações do solo muitas vezes causa problemas numéricos de contorno em muitas aplicações geotécnicas, tais como processos de instalação de estacas, melhoria de solos ou cravação do amostrador do ensaio SPT no solo. Essas grandes deformações, em combinação com o comportamento complexo do solo, frequentemente tornam complexas as soluções numéricas. Essas dificuldades estão relacionadas a grandes distorções de malha e problemas numéricos, devido às condições de contato complexas. Uma possibilidade para superar estas dificuldades é a utilização de técnicas numéricas especiais que foram especificamente criadas para simulações de grandes deformações (Grabe, et al., 2013).

Assim, para executar as simulações numéricas desse trabalho, foi utilizado o programa Abaqus/Explicit®. Este software é um produto de análise de elementos finitos que é particularmente bem adequado para simular eventos dinâmicos transitórios de curta duração. Abaqus/Explicit® é capaz de lidar de forma eficiente com o comportamento altamente não linear, como contato entre duas superfícies, que o torna muito adequado para a simulação de ensaios geotécnicos. Abaqus/Explicit® é computacionalmente eficiente para analisar modelos dinâmicos com tempos de resposta relativamente curtos e analisar eventos ou processos extremamente descontínuos. Este tipo de análise permite a definição de condições de contato muito gerais e utiliza modelos teóricos consistentes para grandes deformações (Dassault Systèmes, 2014). Os procedimentos adotados na modelagem numérica são descritos a seguir neste capítulo.

4.1 Abaqus/Explicit® para análises dinâmicas

O procedimento que usa o programa Abaqus/Explicit para tratar as análises dinâmicas consiste em dividir o tempo total do evento em um grande número de pequenos incrementos de tempo de forma eficiente. O procedimento explícito baseia-se na aplicação de uma regra de

integração explícita em conjunto com o uso de matrizes de massa concentradas. As equações de movimento para o corpo são integradas utilizando a regra de integração explícita de diferença central mostrada nas equações 4. 1 e 4. 2.

$$\dot{u}_{(i+1/2)}^N = \dot{u}_{(i-1/2)}^N + \frac{\Delta t_{(i+1)} + \Delta t_{(i)}}{2} \ddot{u}_{(i)} \quad 4. 1$$

$$u_{(i+1)}^N = u_{(i)}^N + \Delta t_{(i+1)} \dot{u}_{(i+1/2)}^N \quad 4. 2$$

onde:

u^N = um grau de liberdade (um componente de deslocamento ou rotação)

i = número de incremento

Δt = incremento de tempo

A regra integração explícita é bastante simples, mas por si só não fornece a eficiência computacional associada ao procedimento dinâmico explícito. A chave para a eficiência computacional do processo explícito é a utilização das matrizes de massa concentradas porque as acelerações no início do incremento são calculadas pela equação 4. 3 (Dassault Systèmes, 2014).

$$\ddot{u}_{(i)}^N = (M^{NJ})^{-1} (P_{(i)}^J - I_{(i)}^J) \quad 4. 3$$

onde,

M^{NJ} = matriz de massa

P^J = vetor de carga aplicado

I^J = vetor de forças internas

Uma matriz de massa concentrada é usada porque a sua inversa é simples de calcular e porque a multiplicação vetorial da inversa da matriz de massa pela força de inércia requer somente n operações, onde n é o número de graus de liberdade do modelo. O processo explícito não requer iterações e nem a matriz de rigidez tangente. O vetor de forças internas (I^J) é montado a partir de contribuições dos elementos individuais, de tal forma que uma matriz de rigidez global não precisa ser formada (Dassault Systèmes, 2014).

O procedimento explícito requer de uma condição de estabilidade que impõe um incremento de tempo pequeno de tal modo que a solução se altera apenas ligeiramente em qualquer incremento de tempo, o que simplifica os cálculos incrementais (Dassault Systèmes, 2014). O limite de estabilidade é dado em termos do autovalor mais elevado do sistema (w_{max}) como mostra a equação 4. 4 (Susila e Hryciw, 2003).

$$\Delta t \leq \frac{2}{w_{max}} \quad 4. 4$$

O uso de pequenos incrementos (ditados pelo limite de estabilidade) é vantajoso porque simplifica o tratamento de contato. Não é incomum para o Abaqus/Explicit® fazer mais de 100 incrementos para uma análise. Apesar da análise considerar um número extremamente grande de incrementos, o custo computacional de cada incremento é relativamente baixo, resultando em uma solução com baixo custo computacional. O método é, por conseguinte, computacionalmente atraente para os problemas, nos quais o tempo total de resposta dinâmica é apenas algumas ordens de grandeza maior do que o limite de estabilidade (pequeno tempo total da análise).

4.2 Grandes deformações - Técnica de atualização da malha no programa Abaqus/Explicit®

Abaqus/Explicit® oferece uma técnica de atualização de malha para manter a qualidade da malha durante a análise. Deste modo, a acurácia é mantida nos cálculos e a sua convergência é garantida, mesmo no caso da penetração do amostrador SPT no solo em que ocorrem grandes deformações. A técnica de atualização de malha permite a malha se mover independentemente do material, realocando os nós sem adição ou eliminação de graus de liberdade. A técnica de atualização de malha em Abaqus/Explicit® combina a formulação Lagrangeana e Euleriana. Este tipo de técnica é muitas vezes referida como formulação arbitrária Lagrangeana-Euleriana (ALE). Esta técnica é utilizada no presente estudo, e consiste em aperfeiçoar automaticamente a malha deformada a cada determinado intervalo de tempo e transferir as variáveis de saída para cada nova malha gerada (Dassault Systèmes, 2014). Partindo de uma malha inicial bem refinada, a técnica ALE evita grandes distorções, mantendo a geometria da malha durante toda a análise (Dassault Systèmes, 2014). Abaqus/Explicit® requer uma pequena diferença entre a geometria da antiga e nova malha para manter a estabilidade numérica. Assim, é muito importante que cada incremento de tempo seja suficientemente pequeno (Susila e Hryciw, 2003).

4.3 Considerações do modelo de elementos finitos

A simulação do ensaio SPT foi realizada através de um modelo axissimétrico onde o eixo de simetria é o eixo vertical central do amostrador padrão. Na Figura 4. 1, a parte delimitada por uma linha pontilhada é que foi modelada.

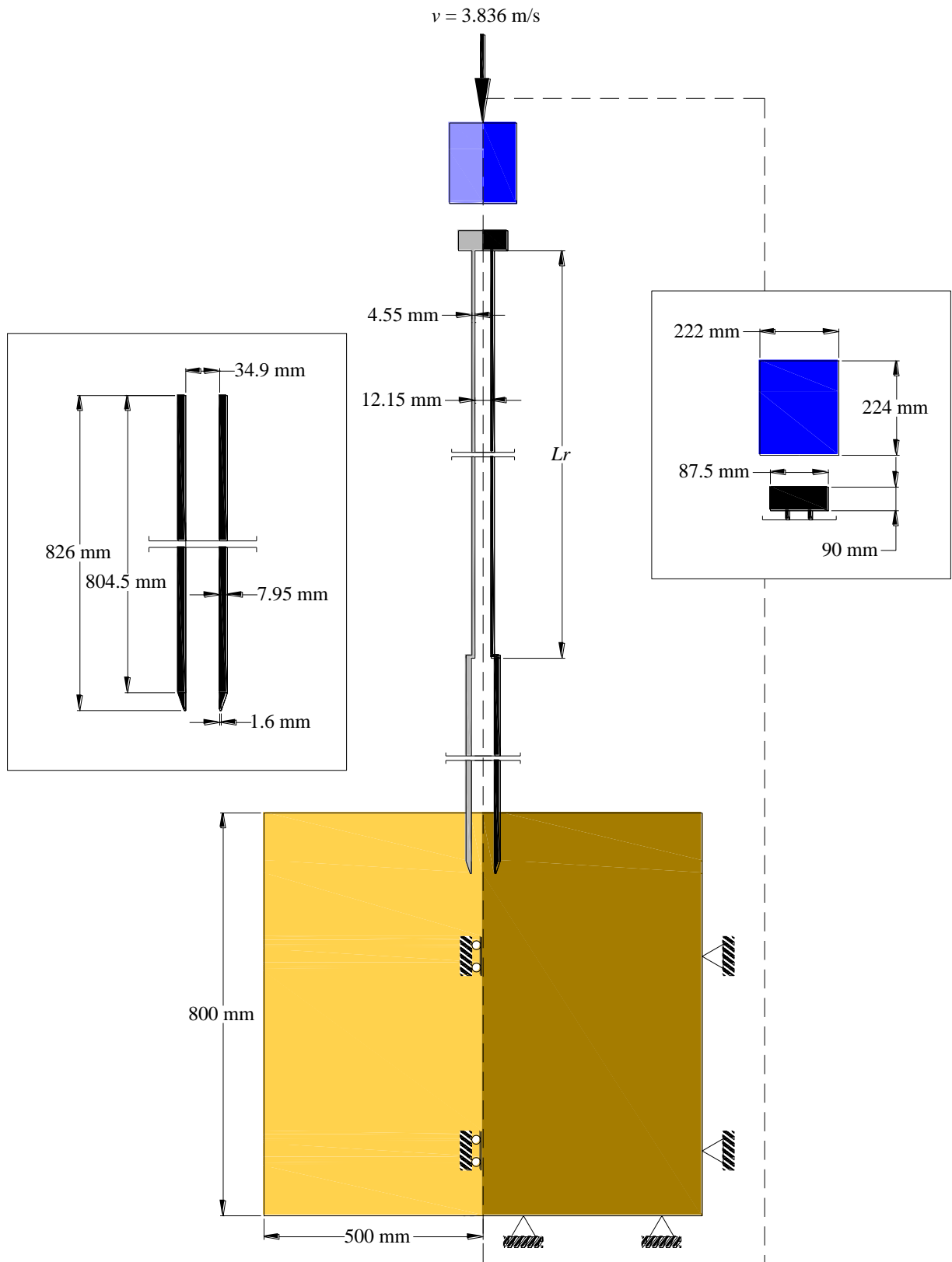


Figura 4. 1 - Geometria e condições de contorno do modelo numérico criado.

Na Figura 4. 1 é mostrada a geometria do modelo para a posição inicial, e as condições de contorno impostas na simulação. Para todos os modelos realizados foram consideradas as mesmas dimensões do maciço de solo, mas variando as tensões iniciais e o comprimento das hastes para as diferentes profundidades. Em nenhuma simulação numérica foram consideradas as luvas que são utilizadas no ensaio experimental para unir os segmentos de haste com o intuito de simplificar a geometria dos modelos numéricos. No Apêndice A é apresentado um roteiro de utilização do programa Abaqus/Explicit para simular numericamente o processo de cravação do amostrador SPT no solo.

Sempre foi simulada a cravação do amostrador padrão no solo somente para o evento de um golpe, para diferentes profundidades do solo. A simulação de um evento se inicia quando é imposta uma velocidade ao martelo (representado de cor azul na Figura 4. 1), posicionado logo acima da cabeça de bater. Assim a energia do impacto do martelo na cabeça de bater é conduzida pelas hastes até o amostrador, fazendo com que o mesmo penetre no solo.

O método usado para simular a queda livre do martelo desde uma altura de 750 milímetros consiste em colocar o martelo em uma posição inicial muito perto da superfície da cabeça de bater e especificar uma velocidade inicial calculada a partir da energia potencial inicial disponível no sistema ($EP_T = M_m \times g \times H = 65 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s} \times 0.75 \text{ m} = 478.2 \text{ J}$) antes de deixar o martelo cair livremente e a energia cinética (Equação 4. 5) no momento imediatamente antes de impactar com a cabeça de bater. Nesse instante, a energia cinética é máxima adquirindo o valor da energia potencial inicial. A velocidade calculada e imposta no modelo foi de 3.836 m/s. Para o cálculo do valor da velocidade não se considerou as perdas de energia que podem ocorrer durante a queda do martelo.

$$E_C = \frac{1}{2} M_m v^2 \quad 4. 5$$

onde,

E_C = energia cinética máxima

M_m = massa do martelo

v = velocidade do martelo imediatamente antes de impactar a cabeça de bater

Outro método que poderia ser utilizado seria deixar o martelo com velocidade inicial zero, e deixá-lo cair de uma altura de 750 milímetros, como realmente acontece no ensaio. Entretanto, essa opção foi descartada porque aumentaria o tempo total do evento, aumentando o custo computacional dos cálculos e não representando nenhuma vantagem para a análise.

Neste trabalho, decidiu-se analisar a influência das dimensões adotadas. Mantendo os parâmetros do modelo constantes, variaram-se as dimensões do maciço de solo. Inicialmente,

se fez o estudo do tamanho da largura do modelo com a realização de cinco modelos, mantendo a dimensão vertical constante, e variando a dimensão lateral. A dimensão vertical utilizada foi 1.5 metros, porque é suficientemente grande para garantir uma boa resposta do teste realizado. As dimensões analisadas estão representadas na Figura 4. 2.

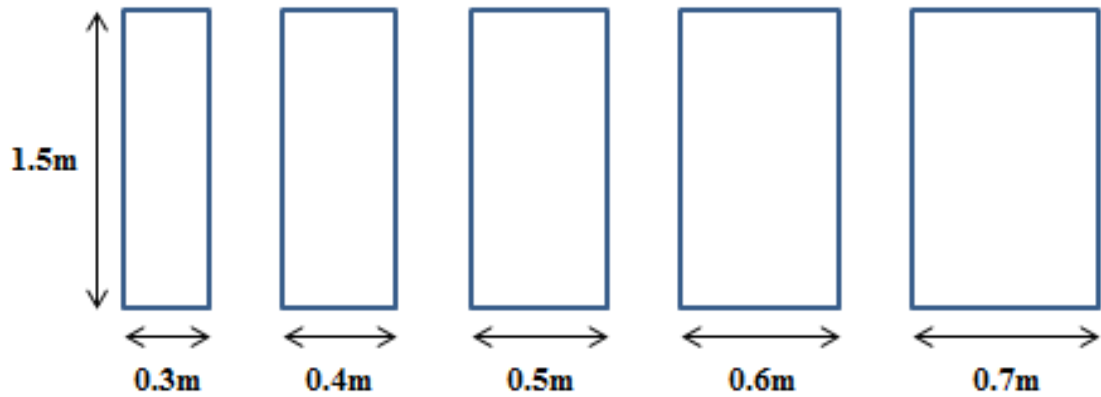


Figura 4. 2 - Tamanho (sem escala) dos modelos analisados para determinar a dimensão lateral do maciço de solo.

A Figura 4. 3 mostra os deslocamentos do amostrador no interior do solo, em função do tempo, para cada modelo analisado. A dimensão lateral escolhida para a realização das simulações numéricas foi de 0.5 metros, pois com essas dimensões os resultados não são afetados pelas condições de contorno do modelo.

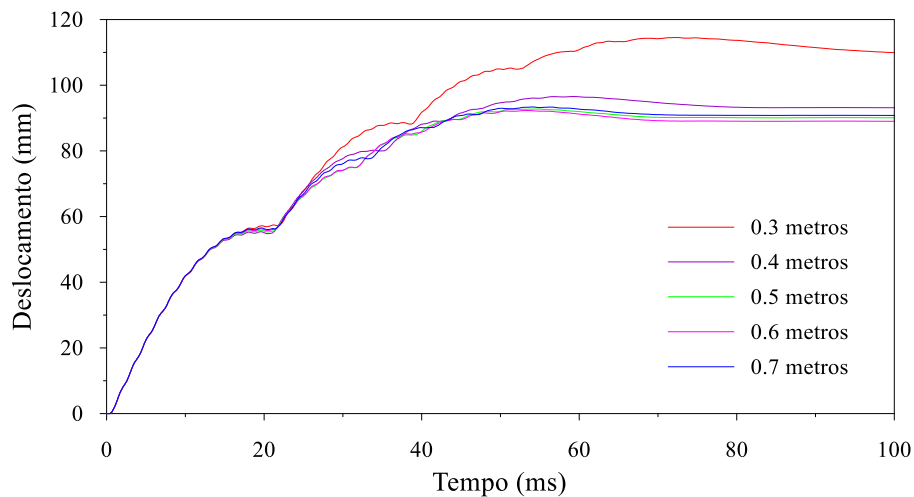


Figura 4. 3 - Deslocamentos do amostrador para diferentes larguras no maciço de solo (Profundidade: 1.5m).

Após determinar a largura do modelo, foi realizado um segundo teste para determinar a dimensão vertical do maciço do solo em estudo. Para obter a profundidade do solo foram realizados mais cinco modelos, variando a dimensão vertical e deixando constante a horizontal de 0.5 metros como já foi determinado anteriormente. A Figura 4. 4 mostra as dimensões

analisadas nesse teste. Foi escolhida uma profundidade de 0.8 metros, notando que para essa dimensão o deslocamento do amostrador não se vê afetado pelas condições de contorno assim como mostra a Figura 4. 5.

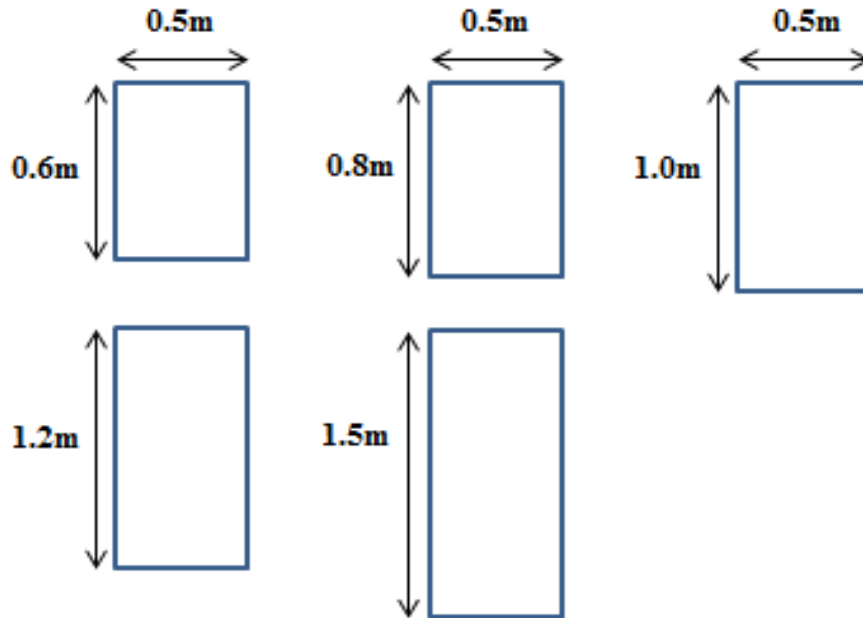


Figura 4. 4 - Tamanho (sem escala) dos modelos analisados para determinar a dimensão vertical do maciço de solo.

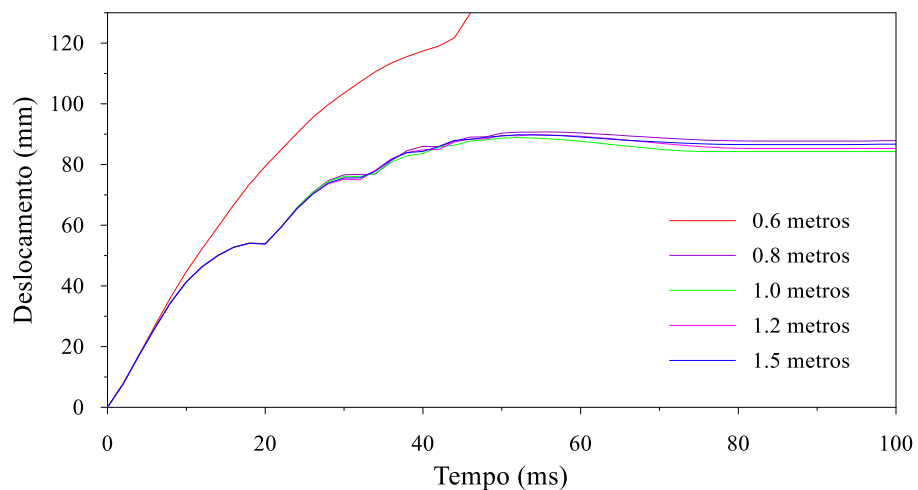


Figura 4. 5 - Deslocamentos do amostrador para diferentes profundidades no maciço de solo (Largura: 0.5m).

Como mencionado no Capítulo 3 do presente trabalho, a modelagem numérica da cravação do amostrador padrão do ensaio SPT no solo foi realizada considerando algumas características com base no perfil geotécnico típico dos campos experimentais da Faculdade de Engenharia Agrícola – Unicamp – Campinas (SP) e da Escola de Engenharia de São

Carlos – USP – São Carlos (SP), de onde se tem resultados de ensaios realizados com a medida da energia nesses locais permitindo a validação dos modelos numéricos estudados.

Para o caso da FEAGRI-Unicamp se fizeram modelos para quatro profundidades do perfil do terreno analisando números de golpes diferentes (Tabela 4. 1). Para isso, se considerou uma penetração inicial ($\Delta\rho_{inicial}$) correspondente à penetração do amostrador antes do golpe analisado. Na Tabela 4. 1 é especificado qual golpe foi analisado para cada profundidade, a penetração inicial do amostrador ($\Delta\rho_{inicial}$) que foi representada no modelo, assim como o comprimento das hastes (L_h) para cada caso. Os valores experimentais constantes da Tabela 4. 1 foram obtidos de Moraes (2014).

Tabela 4. 1 - Golpe analisado em cada profundidade, penetração inicial do amostrador e comprimento das hastes (FEAGRI-Unicamp).

Prof. (m)	Golpe N°	$\Delta\rho_{inicial}$ (m)	L_h (m)
1	3	0.240	1.9
2	4	0.358	2.8
4	5	0.277	4.8
8	10	0.399	8.8

Para o caso da EESC-USP se fizeram cinco modelos, para profundidades diferentes, analisando também números de golpes variados. Na Tabela 4. 2 é mostrada a penetração inicial do amostrador ($\Delta\rho_{inicial}$) para cada profundidade e o respectivo comprimento das hastes (L_h) para cada caso. Esses dados foram obtidos de Zapata (2015).

Tabela 4. 2 - Golpe analisado em cada profundidade, penetração inicial do amostrador e comprimento das hastes (EESC-USP).

Prof. (m)	Golpe N°	$\Delta\rho_{inicial}$ (m)	L_h (m)
1	3	0.280	1.28
2	3	0.319	2.28
4	4	0.385	4.28
5	3	0.228	5.28
7	5	0.336	7.28

Depois de realizados os testes para definir as dimensões do modelo, adotou-se para todas as simulações modelos com dimensões lateral de 0.5 metros e vertical de 0.8 metros, conforme mostrado na Figura 4. 1.

4.4 Refinamento do modelo

Após definir as dimensões do modelo para a simulação da cravação do amostrador SPT no solo faz-se o estudo da sensibilidade ao refinamento da malha. Para isso, foram realizadas simulações com quatro diferentes refinamentos representados na Tabela 4. 3, com seus respectivos números de elementos e nós.

Tabela 4. 3 - Refinamento do modelo.

Refinamento	Tamanho aproximado dos elementos finitos (mm)	Nº de elementos	Nº de nós
1	2	224540	225709
2	3	100271	101052
3	4	56451	57036
4	5	35908	36376

Tanto o solo como o amostrador foram modelados utilizando elementos axissimétricos de quatro nós com um ponto de integração reduzida (elemento CAX4R do Abaqus/Explicit®). Os deslocamentos resultantes para as quatro simulações são mostrados na Figura 4. 6. Em função dessas análises, foi adotado o refinamento de número 2 (três milímetros) para fazer todas as simulações numéricas posteriores.

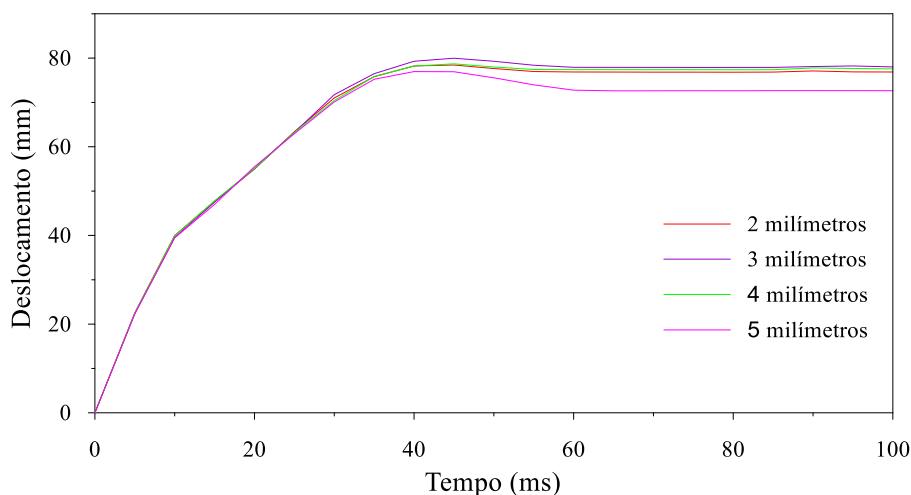


Figura 4. 6 - Deslocamentos do amostrador para diferentes tamanhos de elementos finitos.

Na Figura 4. 6 pode se observar que uma malha com elementos finitos com tamanho aproximado de 4 milímetros tem os mesmos deslocamentos que a malha com elementos finitos de 3 milímetros. Foram utilizados elementos finitos com tamanho de 3 milímetros devido a que um elemento menor permite um cálculo mais eficiente no contato entre o amostrador e o solo, e o tempo de análise não é muito elevado comparado com aquele resultante quando é utilizada uma malha com elementos finitos com tamanho de 4 milímetros. A Figura 4. 7 mostra a malha

de elementos finitos utilizada nos modelos numéricos, permitindo observar o tipo de elemento e a densidade da malha.

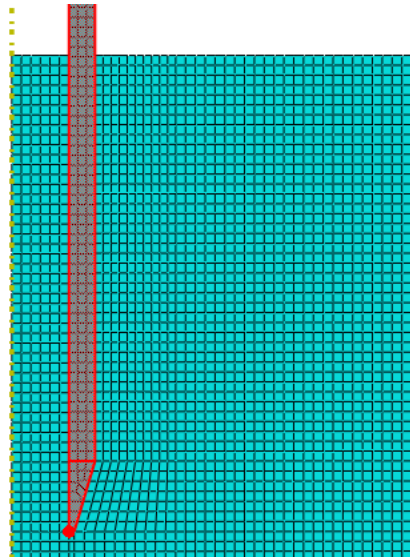


Figura 4. 7 - Malha de elementos finitos no programa Abaqus/Explicit®.

Referente à técnica de atualização da malha, se adotou uma frequência igual a 1, que indica que a atualização da malha é realizada para todos os intervalos de tempo. Para conseguir uma convergência nos cálculos da análise utilizando este valor de frequência, encontrou-se necessário um incremento de tempo mínimo igual a 7×10^{-8} segundos.

A etapa final na atualização de malha para cada incremento de tempo consiste no remapeamento das variáveis da anterior malha para a nova malha, esse processo é chamado de *Advection sweep*. Baseando-se em Van (1997), o método de advecção escolhido foi o de segunda ordem.

4.5 Parâmetros usados nos modelos

No programa Abaqus/Explicit®, para criar o material correspondente ao solo é preciso informar a massa específica e os parâmetros de resistência e deformabilidade. Foi assumido que o solo apresenta um comportamento elasto-plástico, sendo adotado o modelo constitutivo de Mohr-Coulomb.

Como a velocidade de aplicação de tensões ou deformações no solo conduz a importantes divergências entre a dinâmica dos solos e a mecânica dos solos (que trata de problemas estáticos), Giacheti (1991) propôs parâmetros de deformabilidade dinâmicos para os solos, os quais foram usados nas análises realizadas.

A Tabela 4. 4 apresenta os parâmetros do solo da FEAGRI-Unicamp utilizados nos modelos. Os pesos específicos foram obtidos por Peixoto (2001) e Giacheti (1991), os parâmetros de resistência por Peixoto (2001) e os parâmetros de deformabilidade foram obtidos por Giacheti (1991). A

Tabela 4. 5 mostra os parâmetros usados nas simulações numéricas dos ensaios SPT realizados na EESC-USP. Foram usados os pesos específicos obtidos por Zapata (2015), e os parâmetros de resistência e deformabilidade obtidos por Giacheti (1991).

Tabela 4. 4 - Parâmetros do solo utilizados nos modelos numéricos (FEAGRI-Unicamp).

Prof. (m)	γ (kN/m ³)	ϕ (°)	c (kPa)	E (Mpa)	ν	σ_{v1} (kPa)	σ_{v2} (kPa)
1	13.0	31.5	11	131.1	0.05	13.4	23.8
2	13.0	30.5	2	167.2	0.06	26.4	36.8
4	12.8	28.5	18	177.2	0.02	52.4	62.6
8	15.0	22.8	78	155.0	0.01	110.8	122.8

Tabela 4. 5 - Parâmetros do solo utilizados nos modelos numéricos (EESC-USP).

Prof. (m)	γ (kN/m ³)	ϕ (°)	c (kPa)	E (Mpa)	ν	σ_{v1} (kPa)	σ_{v2} (kPa)
1	18.3	23.5	6	120.4	0.05	18.3	33.0
2	14.1	23.5	6	159.0	0.02	36.7	47.9
4	14.9	18.5	17	240.5	0.01	66.8	78.7
5	16.1	18.5	17	303.3	0.03	81.7	94.6
7	17.3	18.5	30	357.8	0.03	114.9	128.7

Os modelos foram concebidos para representar diferentes profundidades do maciço de solo. Por isso foi necessário variar as tensões iniciais para cada profundidade nos modelos. Na Tabela 4. 4 e 4. 5 são mostradas as tensões verticais iniciais para o caso da FEAGRI-Unicamp e da EESC-USP respectivamente. A tensão vertical na parte superior do maciço de solo é representada por σ_{v1} , e na parte inferior por σ_{v2} .

Um segundo material foi criado para representar o aço que constitui o conjunto de hastes, cabeça de bater, amostrador e martelo. Esse material apresenta uma massa específica de 7500 kg/m³, módulo de elasticidade (E_h) de 210 GPa e coeficiente de Poisson (ν) de 0.3. Esse material foi utilizado em todos os modelos, tanto para o caso da FEAGRI-Unicamp como da EESC-USP.

4.6 Interface de contato

No módulo de interações do Abaqus/Explicit® foi escolhida a interação *Surface-to-surface contact (Explicit)* que permite definir as partes do modelo que entrarão em contato e atribuir algumas propriedades nesses contatos. Criou-se uma interação entre o martelo e a cabeça de bater escolhendo a propriedade *Hard contact* que não permite as superfícies de contato penetrar uma na outra.

Abaqus/Explicit® usa dois métodos para impor as restrições de contato. O primeiro, que é o algoritmo *Kinematic contact* cumpre rigorosamente as restrições de contato. Entretanto, as penetrações não são permitidas nesse método, motivo pelo qual não foi usado para o contato entre o solo e o amostrador. O segundo, que é o algoritmo *Penalty contact*, pelo contrário oferece um tratamento com restrições de contato menos rigorosas, permitindo tratar tipos de contato mais gerais (Dassault Systèmes, 2014).

O programa Abaqus/Explicit® foi desenvolvido para simular eventos ou processos altamente não-lineares. Para que um nó de uma superfície possa contatar qualquer uma das facetas na superfície oposta, o programa deve utilizar sofisticados algoritmos de busca para acompanhar os movimentos das superfícies. O algoritmo de busca de contato é concebido para ser robusto, mas computacionalmente eficiente. A abordagem *Finite sliding*, que é a mais geral e permite qualquer movimento arbitrário das superfícies (Dassault Systèmes, 2014), foi a abordagem escolhida para os presentes modelos. Com essa abordagem é garantido o emparelhamento correto de nós e elementos das superfícies em contato. Essa abordagem pode garantir melhores resultados de qualidade em comparação que *Small sliding*, porque *Finite sliding* emparelha os nós e elementos até o final do cálculo. Em contrapartida, o *Small sliding* emparelha os nós apenas no início do primeiro incremento (Susila e Hryciw, 2003). O algoritmo de busca usa uma pesquisa global no início de cada etapa, e um algoritmo de busca hierárquica local/global é usado para os outros incrementos. O algoritmo de busca *Finite sliding* pode lidar com a maioria das situações de contato típicas.

Para a direção tangencial ao movimento, foi escolhido o modelo de atrito clássico isotrópico de Coulomb. O coeficiente de atrito de interface é mantido constante durante a análise. Durgunoglu e Mitchell (1975) sugeriram que para a maioria dos penetrômetros usados na prática, a relação entre o ângulo de atrito da interface (δ) e o ângulo de atrito interno do solo (ϕ) seja igual a 0.5. Foi adotada a relação proposta por Durgunoglu e Mitchell (1975) atribuindo no comportamento tangencial ao movimento um *Friction Coeff* de 0.5 como propriedade de contato entre o amostrador e o solo.

4.7 Prova de carga dinâmica com energia crescente no amostrador SPT

Além das simulações dos ensaios SPT executados por Moraes (2014) e Zapata (2015), também foram criados sete modelos para simular provas de carga dinâmicas com energia crescente. Nesses modelos variou-se a energia inicial disponível no sistema para possibilitar a geração de curvas *resistência estática mobilizada versus deslocamento resultante*. Com o programa Abaqus/Explicit® é possível variar a energia inicial, fornecendo diferentes velocidades iniciais do martelo em cada modelo, calculadas a partir de alturas de queda do martelo crescentes. A Tabela 4. 6 apresenta as alturas de queda do martelo simuladas, as velocidades iniciais impostas no modelo, assim como a energia potencial inicial que representa cada altura de queda.

Tabela 4. 6 - Velocidades usadas nas simulações da prova de carga dinâmicas com energia crescente.

H (m)	v (m/s)	EP_T (J)
0.01	0.443	6.4
0.03	0.767	19.1
0.06	1.085	38.3
0.10	1.401	63.8
0.30	2.426	191.3
0.50	3.132	318.8
0.75	3.836	478.2

Para fazer as simulações da prova de carga dinâmica com energia crescente foi escolhido o modelo do ensaio SPT realizado no quarto metro de profundidade na FEAGRI- Unicamp.



Capítulo 5

RESULTADOS E ANÁLISES

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos modelos, comparando-os com os resultados dos ensaios SPT realizados na FEAGRI-Unicamp e na EESC-USP. Da simulação numérica são obtidos os deslocamentos do amostrador no solo para as diferentes profundidades, força de reação dinâmica do solo (R_D), e a força de atrito externa e interna (R_1 e R_2) geradas no amostrador SPT. A partir dos dados coletados das simulações também foi estimada a eficiência (η), bem como as resistências unitárias de atrito e de ponta desenvolvidas no amostrador no momento da sua penetração no solo, obtidas por meio da proposta de Aoki et. al. (2007) e Aoki (2013).

5.1 Faculdade de Engenharia Agrícola - Unicamp

Para validar os resultados dos modelos, foram tomados os resultados do ensaio SP02 realizado por Moraes (2014). Esse ensaio foi realizado com equipamento manual e com instrumentação instalada tanto no topo, como na base da composição das hastes. A instrumentação permitiu obter sinais de força e aceleração e com eles a energia e a eficiência do equipamento. Moraes (2014) também fez a medida do torque após o ensaio SPT, com o intuito de obter a tensão de cisalhamento na parede externa do amostrador e assim as outras resistências resultantes.

5.1.1 Penetração do amostrador

A Tabela 5. 1 apresenta a penetração do amostrador no solo para as quatro simulações realizadas. Cada modelo foi realizado representando uma profundidade diferente do ensaio. Os resultados do deslocamento do amostrador determinados com modelos foram comparados com os deslocamentos no topo e na base da composição das hastes determinados a partir dos resultados da instrumentação, assim como o deslocamento medido em campo.

Tabela 5. 1 - Penetração do amostrador para diferentes profundidades (FEAGRI-Unicamp).

Prof. (m)	Golpe N°	$\Delta\rho_{experimental}$ (m)	$\Delta\rho_{numérico}$ (m)
1	3	0.097	0.090
2	4	0.098	0.093
4	5	0.063	0.056
8	10	0.027	0.025

As Figuras 5. 1 a 5. 4 mostram comparações dos deslocamentos obtidos com a modelagem numérica com aqueles determinados através de resultados da instrumentação

utilizada por Morais (2014), bem como com o deslocamento final medido em campo. Através da instrumentação, foram obtidos os deslocamentos da haste instrumentada instalada no topo da composição de hastes e da haste instrumentada instalada logo acima do amostrador.

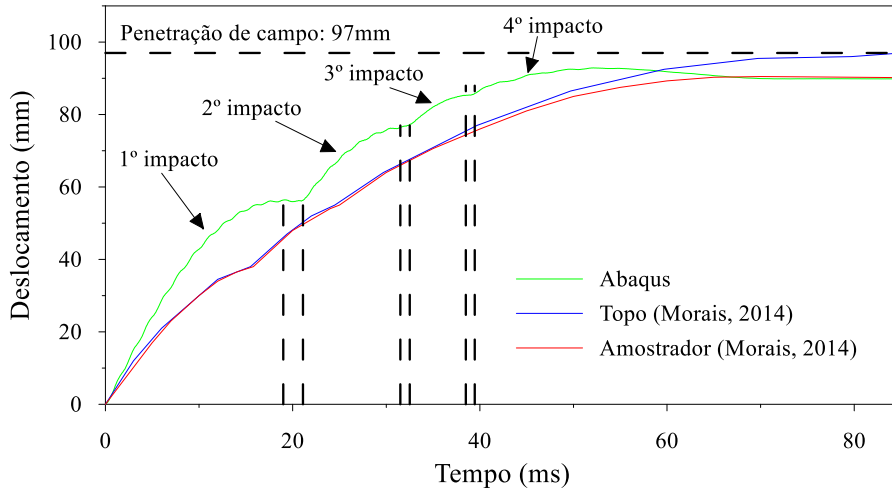


Figura 5.1 - Deslocamento - Prof. 1m – 3º golpe (FEAGRI-Unicamp).

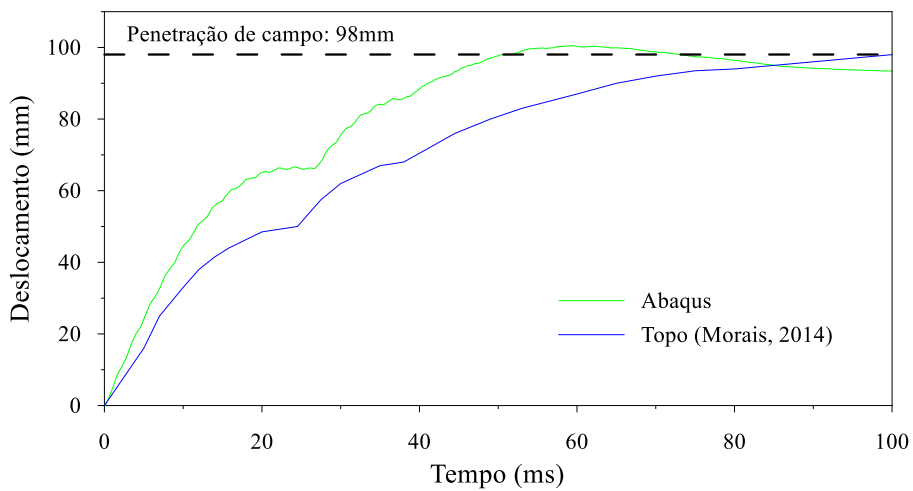


Figura 5.2 - Deslocamento – Prof. 2m – 4º golpe (FEAGRI-Unicamp).

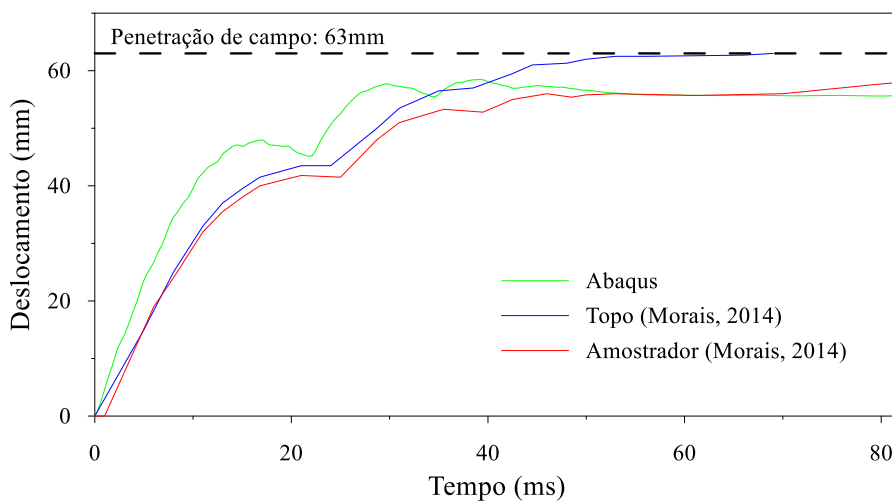


Figura 5.3 - Deslocamento - Prof. 4m – 5º golpe (FEAGRI-Unicamp).

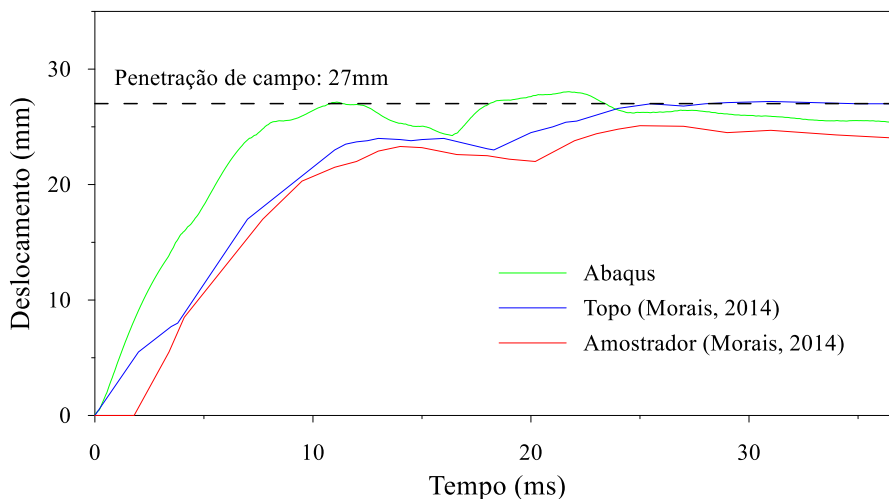


Figura 5. 4 - Deslocamento - Prof. 8m – 10º golpe (FEAGRI-Unicamp).

Para o quarto golpe do segundo metro, Morais (2014) não apresenta sinais de deslocamentos para a haste instrumentada logo acima do amostrador. Por isso a Figura 5. 2 só mostra a comparação com deslocamentos no topo da composição das hastes. Observando os resultados obtidos com a modelagem numérica, pode-se afirmar que as simulações numéricas fornecem resultados de deslocamento compatíveis com aqueles determinados com os ensaios realizados nesse perfil de solo.

Para as quatro profundidades analisadas, pode-se observar que o deslocamento total fornecido pelas simulações numéricas representa melhor o deslocamento obtido a partir dos sinais registrados pela instrumentação instalada logo acima do amostrador.

Também pode-se notar que para todos os casos, o número de impactos totais do evento é o mesmo que o observado nos ensaios de campo. Apesar de que com a modelagem numérica se consiga chegar razoavelmente no mesmo deslocamento final do amostrador, é possível observar que os deslocamentos ao longo do tempo são ligeiramente diferentes daqueles encontrados experimentalmente. Esse comportamento pode-se atribuir ao modelo constitutivo escolhido para as simulações.

Na Figura 5. 1 é mostrado como foram identificados os distintos impactos ao longo do tempo. Nos resultados da simulação numérica também é possível observar uma animação da cravação do amostrador no solo junto com o movimento do martelo, permitindo conferir o número de impactos do martelo na cabeça de bater, assim como os instantes quando eles ocorreram. Assim todos os impactos foram identificados para as outras profundidades.

5.1.2 Resistência dinâmica do solo (R_D)

O programa Abaqus/Explicit® permite obter gráficos da força vertical total gerada no contato solo-amostrador durante a penetração. Os valores de R_D foram determinados como sendo a média da força de reação observada para o primeiro impacto do martelo devido a que é nesse impacto onde a maior parte da penetração ocorre. Além disso, deve ser descontado desse valor o peso do conjunto cabeça de bater-hastes-amostrador para atender à equação de equilíbrio (Equação 2. 40). Na Tabela 5. 2 esses valores foram comparados com os valores obtidos experimentalmente a partir da instrumentação instalada logo acima do amostrador. Nessa tabela também são mostrados os valores da força de reação dinâmica teórica (F_d), proposta por Schnaid et al. (2009) e apresentada na equação 2. 26 do presente trabalho. As Figuras 5. 5 a 5. 8 mostram os sinais de força obtidos a partir da análise numérica.

Tabela 5. 2 - Comparações forças de reação dinâmica do solo (FEAGRI-Unicamp).

Prof. (m)	Golpe N°	R_D (kN)		F_d (kN)
		Numérico	Experimental	
1	3	2.6	2.8	4.3
2	4	3.5	3.5	4.3
4	5	4.9	5.2	6.3
8	10	11.8	10.9	13.8

A alta frequência de flutuação observada nas Figuras 5. 5 a 5. 8 é devido ao algoritmo utilizado pelo programa Abaqus/Explicit®, pelo tamanho da malha, a interface de contato e os parâmetros do solo e o aço (Susila e Hryciw, 2003). Porém, é possível obter uma média da força de reação dinâmica para o primeiro impacto do martelo em cada golpe analisado como mostrado nessas figuras.

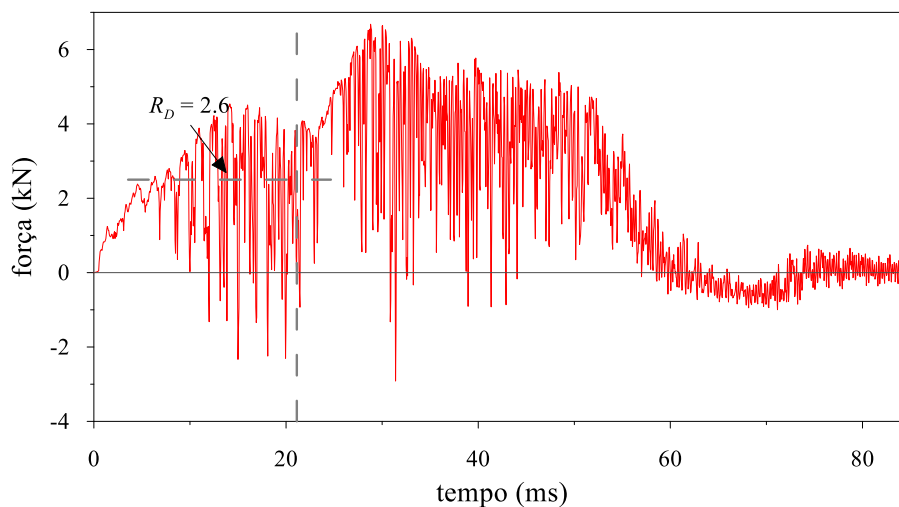


Figura 5. 5 - Resistência dinâmica do solo - Prof. 1m – 3º golpe (FEAGRI-Unicamp).

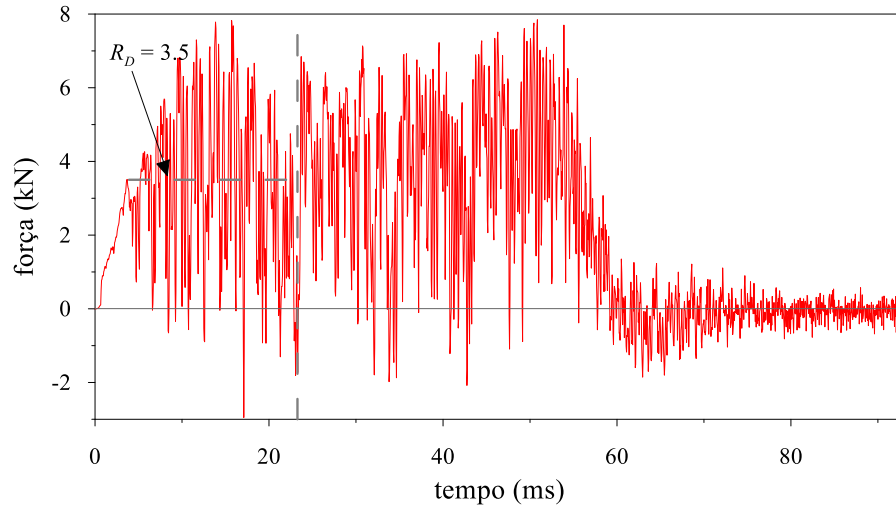


Figura 5. 6 - Resistência dinâmica do solo - Prof. 2m – 4º golpe (FEAGRI-Unicamp).

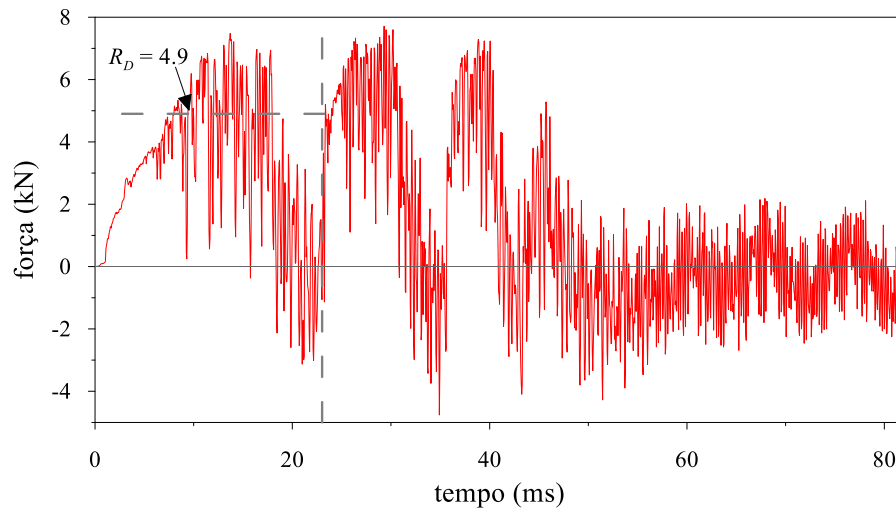


Figura 5. 7 - Resistência dinâmica do solo - Prof. 4m – 5º golpe (FEAGRI-Unicamp).

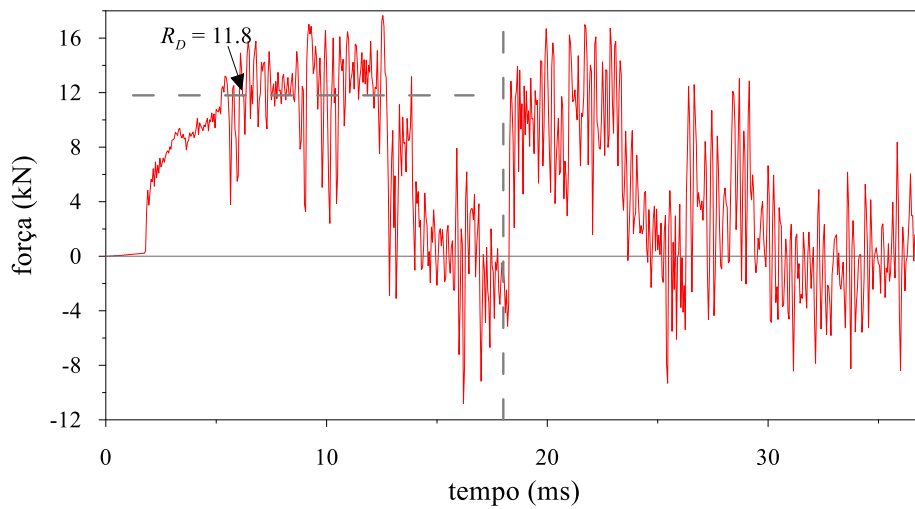


Figura 5. 8 - Resistência dinâmica do solo - Prof. 8m – 10º golpe (FEAGRI-Unicamp).

A partir dos resultados apresentados na Tabela 5. 2 pode-se observar que os valores obtidos com a simulação numérica, são similares que aqueles determinados experimentalmente, com a instrumentação posicionada logo acima do amostrador. Também pode-se notar que esses valores são menores que os valores da força de reação dinâmica teórica. Uma comparação entre R_D experimental, R_D do modelo numérico e F_d teórica é apresentada na Figura 5. 9.

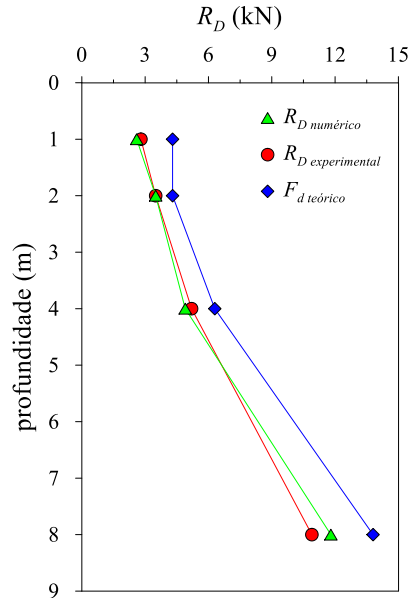


Figura 5. 9 - Perfil de resistência dinâmica experimental, teórica e numérica (FEAGRI-Unicamp).

Na Figura 5. 10 são mostrados os valores das forças dinâmicas de reação obtidas com os modelos numéricos, as obtidas experimentalmente e os valores teóricos, em função do índice N_{SPT} . Os valores do índice N_{SPT} foram obtidos de Moraes (2014). Todas as retas ajustadas mostram a mesma tendência.

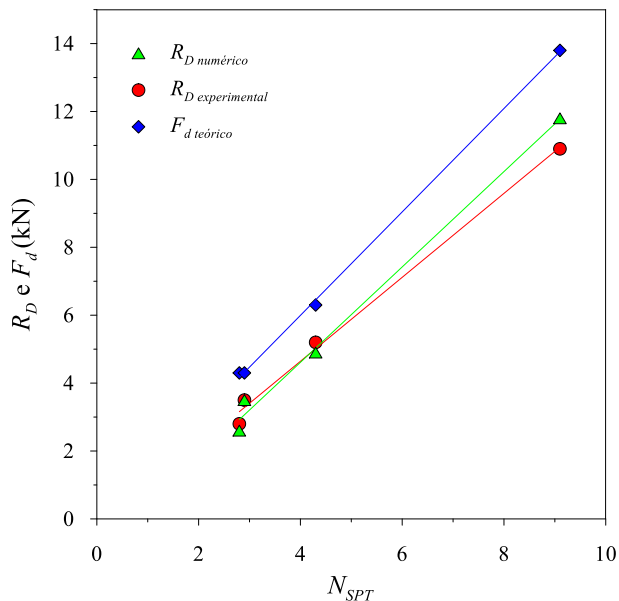


Figura 5. 10 - R_D e F_d versus N_{SPT} (FEAGRI-Unicamp).

A Figura 5. 11 mostra uma comparação entre valores experimentais das forças de reação dinâmica com os valores das forças de reação obtidas com as simulações numéricas. Os valores de resistência dinâmica obtidos a partir dos modelos numéricos foram similares aos valores medidos nos ensaios de campo (Figura 5. 9). Essa diferença entre R_D dos modelos e R_D experimental apresentou tendência de aumento com o aumento da resistência do solo, como observado na Figura 5. 11.

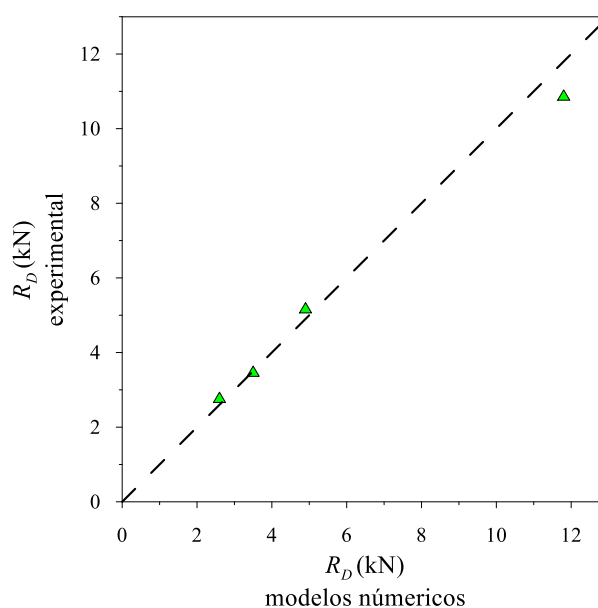


Figura 5. 11 – Comparação entre forças dinâmicas numérica e experimental (FEAGRI-Unicamp).

5.1.3 Eficiência do equipamento

A Tabela 5. 3 apresenta os valores de eficiência (η) do ensaio SPT, para cada profundidade. Esses valores foram determinados através da equação 2. 39, que já leva em conta a energia potencial do sistema. Para calcular a eficiência a partir desta equação é preciso conhecer o valor da massa do martelo, da massa da composição de hastes, da resistência dinâmica do solo à penetração e o índice de resistência N_{SPT} . A equação 2. 39 foi proposta para calcular a força de reação dinâmica do solo a partir da eficiência do equipamento obtida com instrumentação no equipamento. Como no caso dos modelos numéricos obtém-se diretamente a força de reação dinâmica, faz-se o processo inverso para calcular a eficiência. Neves (2004) demonstrou que a única parcela de reação do solo com a cravação do amostrador é a parcela de resistência estática R_s , independentemente do tipo de esforço aplicado sobre a cabeça de bater. Por isso é possível usar a força dinâmica de reação para calcular a eficiência do equipamento SPT.

Tabela 5.3 - Comparação da eficiência a partir dos resultados numéricos e experimentais (FEAGRI-Unicamp).

Prof. (m)	R_D numérico (kN)	N_{SPT}	η numérico (%)	η experimental (%)
1	2.6	2.8	49	65
2	3.5	2.9	64	64
4	4.9	4.3	63	69
8	11.8	9.1	76	66

O valor médio da eficiência calculada a partir das simulações numéricas é de 63% apresentando um desvio padrão de 11%, resultando num coeficiente de variação de 17%. A eficiência do equipamento encontrada experimentalmente foi de 65%, com um desvio padrão de 3% e um coeficiente de variação de 4% (Morais, 2014). Para o primeiro metro de profundidade, o valor da eficiência obtido a partir do modelo numérico é inferior àqueles correspondentes às outras profundidades e também inferior àqueles determinados experimentalmente.

A Figura 5.12 mostra os valores de eficiência em função do comprimento da composição de hastes. Pode-se observar nessa figura que a eficiência praticamente não depende do comprimento da composição de hastes. Também é perceptível que a eficiência calculada a partir dos modelos numéricos, quando comparada com a eficiência determinada experimentalmente, é maior em todos os casos exceto para o primeiro metro ($L_h=1.9\text{m}$).

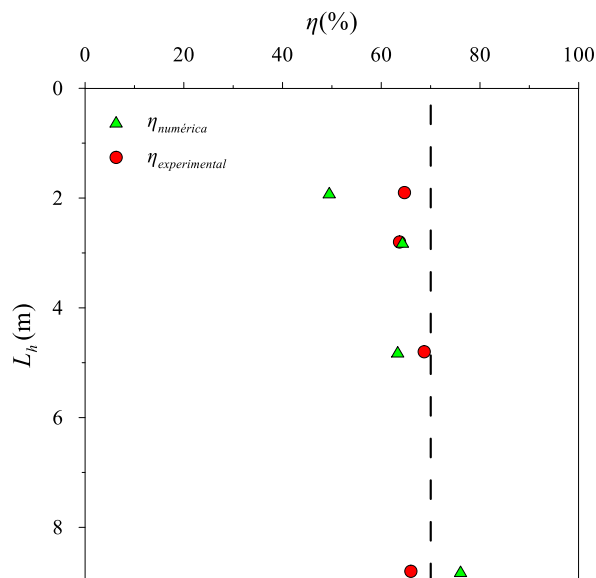


Figura 5.12 - Eficiência versus comprimento da composição de hastes (FEAGRI-Unicamp).

5.1.4 Comprimento da amostra

Apesar de ter sido simulado somente um golpe para cada profundidade, o modelo também permitiu observar a ocorrência de embuchamento, para todas as profundidades modeladas,

como mostrado na Figura 5. 13. Vale lembrar, que o embuchamento do amostrador ocorre quando cessa a penetração do material no interior do amostrador, passando a se deslocar em conjunto com o amostrador, agindo como se fosse parte do amostrador. Portanto, as amostras recuperadas apresentam um comprimento menor do que a penetração total do amostrador. No caso da ocorrência de embuchamento a amostra recuperada dentro do amostrador é chamada de bucha (Pirani, 2005).

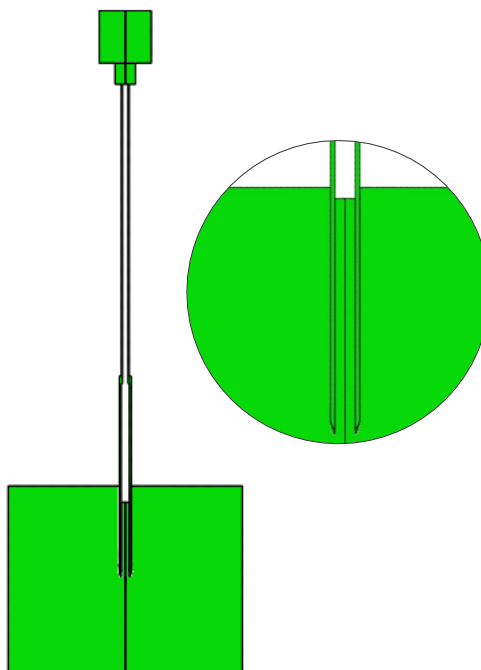


Figura 5. 13 - Fenômeno de embuchamento nos modelos numéricos.

Para cada profundidade foi chamado $\Delta\rho_{acumulado}$ à soma da penetração inicial do amostrador ($\Delta\rho_{inicial}$) e o deslocamento total do amostrador ($\Delta\rho$) para o golpe analisado nas simulações numéricas. O valor do comprimento da amostra (L_a) foi também obtido dos modelos numéricos. A Tabela 5. 4 mostra os valores de $\Delta\rho_{acumulado}$ e L_a , assim como o cálculo da relação entre eles para todas as profundidades.

Tabela 5. 4 - Relação $L_a/\Delta\rho_{acumulado}$ para análise do embuchamento (FEAGRI-Unicamp).

Prof. (m)	Golpe N°	$\Delta\rho_{acumulado}$ (m)	L_a (m)	$L_a / \Delta\rho_{acumulado}$
1	3	0.330	0.291	0.88
2	4	0.451	0.412	0.92
4	5	0.333	0.302	0.91
8	10	0.424	0.406	0.96

A Tabela 5. 4 permite observar que para valores menores de N_{SPT} há uma maior tendência de embuchamento, e pelo contrário para os maiores valores a tendência é menor. Entende-se

que quando a relação $L_a / \Delta\rho_{acumulado}$ for menor que a unidade, ocorre o fenômeno de embuchamento. Assim a Figura 5. 14 apresenta os valores dessas relações para todas as profundidades, mostrando todos eles menores que um, admitindo a ocorrência do embuchamento a partir dos modelos numéricos.

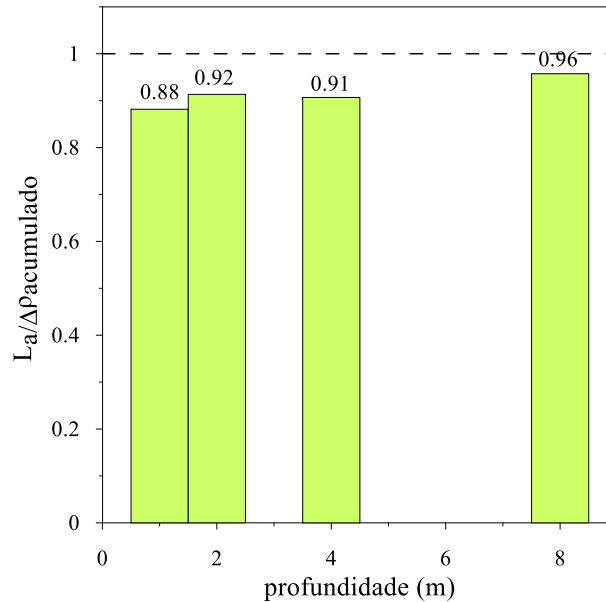


Figura 5. 14 - Relação entre o comprimento da amostra L_a e a penetração acumulada do amostrador $\Delta\rho_{acumulado}$ (FEAGRI-Unicamp).

Pelo fato de que foi modelado somente um golpe para cada profundidade, foi obtido somente um embuchamento parcial, de modo que não se pode comparar com o embuchamento total obtido experimentalmente. Entretanto, a partir dos resultados das simulações pode-se prever a existência de embuchamento no final do evento, confirmando os resultados experimentais que indicam que ocorreu o fenômeno do embuchamento da amostra de solo no interior do amostrador principalmente nas camadas superficiais, até 9 m de profundidade aproximadamente. O subsolo até esta profundidade está composto por duas camadas argilosas, argila arenosa até 6 m e silte argiloso na camada subsequente.

5.1.5 Resistências unitárias de atrito externa e interna

Abaqus/Explicit® permite determinar as forças resultantes do atrito, tanto na parede externa (R_1) como na parede interna (R_2) do amostrador, durante a cravação. As Figuras 5. 15 a 5. 22 mostram os sinais dessas forças correspondentes ao primeiro impacto, obtidos das simulações numéricas para as diferentes profundidades.

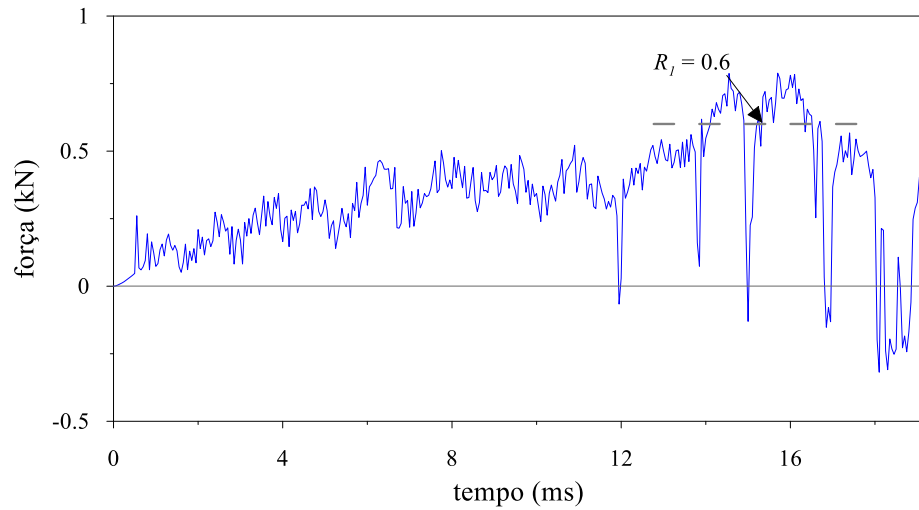


Figura 5. 15 - Força de atrito na parede externa do amostrador R_1 – Prof. 1m – 3º golpe (FEAGRI-Unicamp).

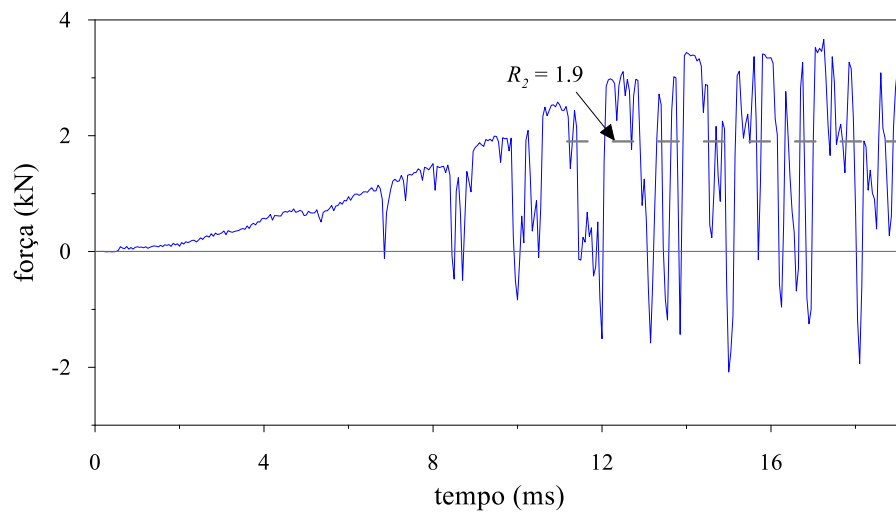


Figura 5. 16 - Força de atrito na parede interna do amostrador R_2 – Prof. 1m – 3º golpe (FEAGRI-Unicamp).

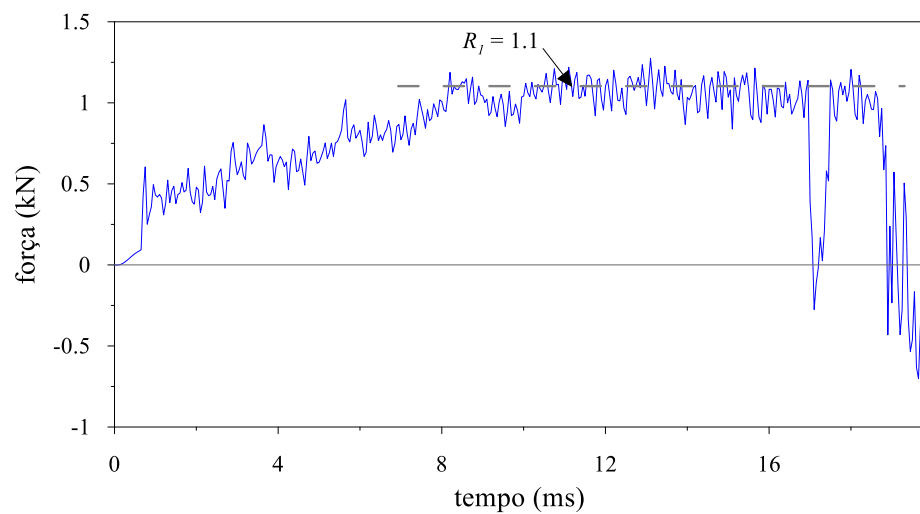


Figura 5. 17 - Força de atrito na parede externa do amostrador R_1 – Prof. 2m – 4º golpe (FEAGRI-Unicamp).

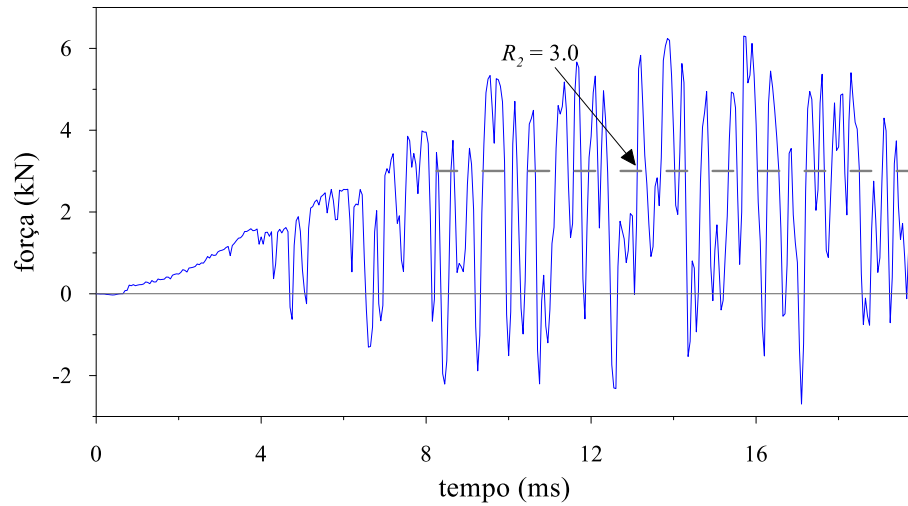


Figura 5. 18 - Força de atrito na parede interna do amostrador R_2 – Prof. 2m – 4º golpe (FEAGRI-Unicamp).

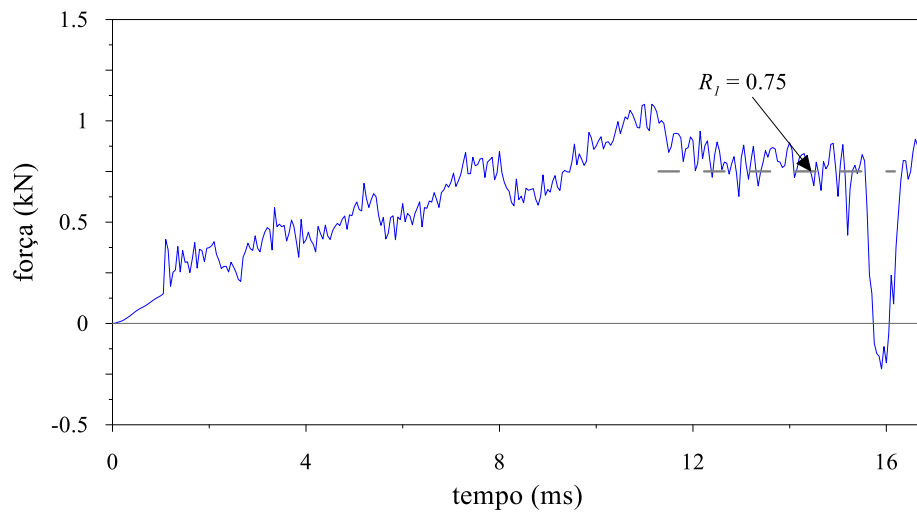


Figura 5. 19 - Força de atrito na parede externa do amostrador R_1 – Prof. 4m – 5º golpe (FEAGRI-Unicamp).

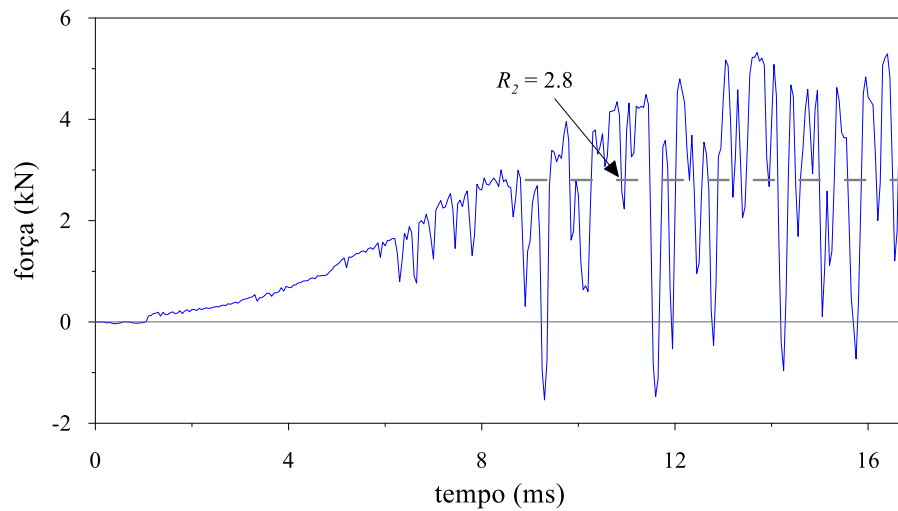


Figura 5. 20 - Força de atrito na parede interna do amostrador R_2 – Prof. 4m – 5º golpe (FEAGRI-Unicamp).

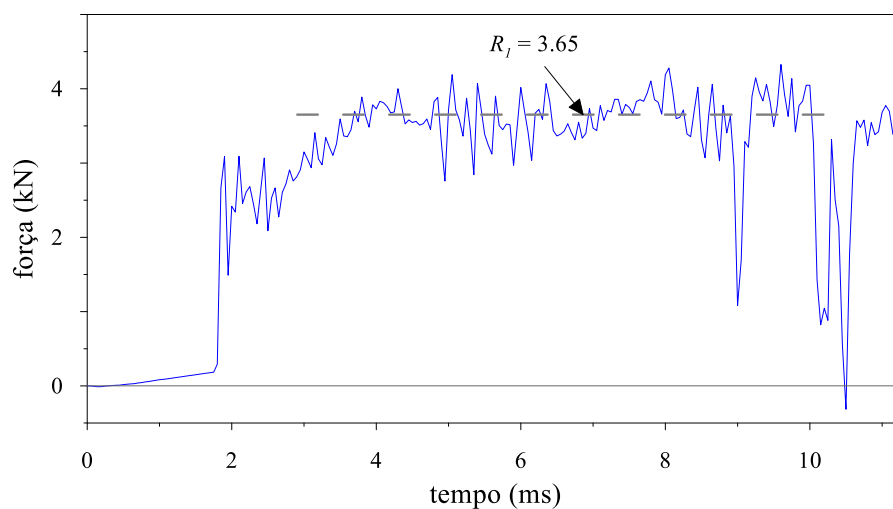


Figura 5. 21 - Força de atrito na parede externa do amostrador R_1 – Prof. 8m – 10º golpe (FEAGRI-Unicamp).

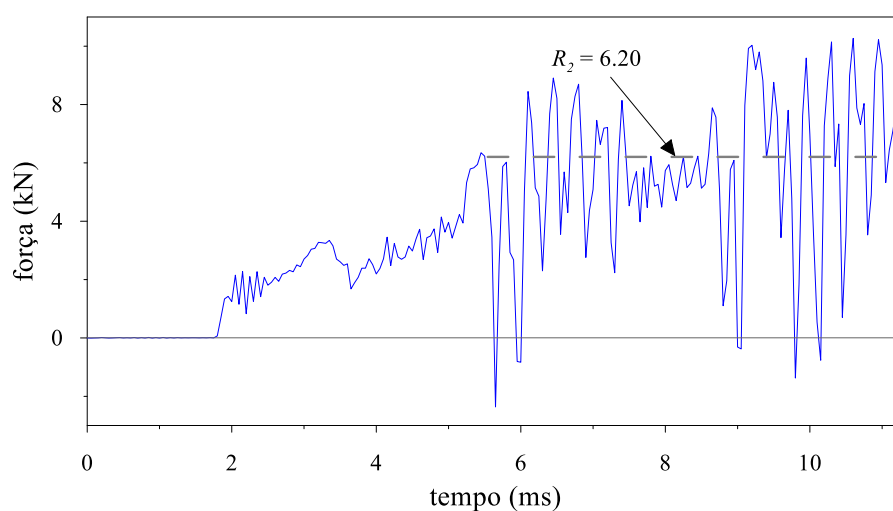


Figura 5. 22 - Força de atrito na parede interna do amostrador R_2 – Prof. 8m – 10º golpe (FEAGRI-Unicamp).

A Tabela 5. 5 apresenta os valores das forças de reação para as profundidades estudadas. Com base no equilíbrio de forças de reação no amostrador (item 2.8.4) e nos resultados de força lateral externa e interna, foram estimados os valores das resistências unitárias de ponta e lateral no sistema solo-amostrador. Para tanto, foram utilizadas as formulações propostas por Aoki (2013), como mostrado no item 2.8.4. Com as equações 2. 41 e 2. 42 foi possível calcular a resistência unitária lateral nas duas paredes do amostrador. A resistência unitária de ponta foi determinada por meio da equação 2. 44 e os valores estão mostrados na Tabela 5. 5. Essa mesma tabela mostra uma comparação com as resistências unitárias obtidas experimentalmente por Morais (2014).

Tabela 5. 5 - Tensões unitárias de atrito e ponta no sistema solo amostrador (FEAGRI-Unicamp).

Prof. (m)	Numérico					Experimental		
	R_1 (kN)	R_2 (kN)	r_ℓ (kPa)	$r_{\ell i}$ (kPa)	r_p (Mpa)	r_ℓ (kPa)	$r_{\ell i}$ (kPa)	r_p (MPa)
1	0.60	1.90	12.19	59.55	1.99	13.51	97.37	2.12
2	1.10	3.00	16.05	66.41	3.14	14.18	160.18	2.20
4	0.75	2.80	15.09	84.56	2.93	22.76	153.55	2.99
8	3.65	6.20	56.82	139.28	6.48	51.98	119.19	5.60

A Figura 5. 23 apresenta esquematicamente a distribuição de resistências por atrito e de ponta ao longo da profundidade do perfil de solo investigado. Conforme mostrado na Figura 5. 23, as resistências de ponta e de atrito aumentam gradativamente com a profundidade. As resistências de atrito na parede externa e na ponta do amostrador são bastante próximas daquelas determinadas experimentalmente. Entretanto, os valores das resistências na parede interna do amostrador apresentam maior discrepância.

A resistência desenvolvida na parede interna do amostrador mostrou alta variabilidade, confirmando o encontrado por Moraes (2014) que encontrou maior variabilidade nas camadas superficiais do perfil do terreno, até aproximadamente 9 m de profundidade.

A partir dos valores de atrito nas paredes internas e externas do amostrador (r_ℓ e $r_{\ell i}$) foi estimado o fator de atrito (a), segundo a proposta de Aoki (2013). Os valores do fator de atrito são apresentados na Figura 5.23 e na Tabela 5. 6.

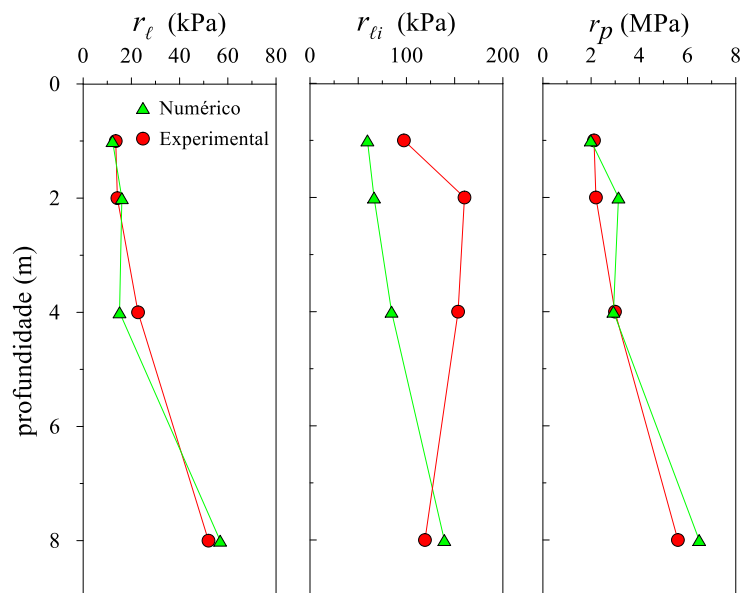
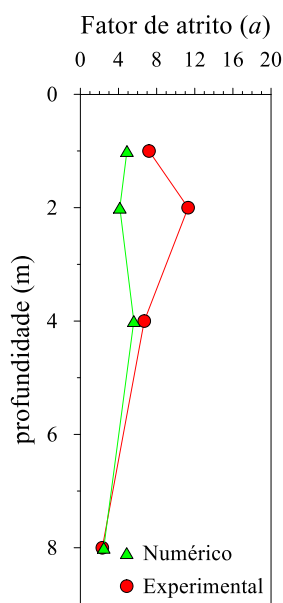


Figura 5. 23 - Perfil de resistências unitárias de ponta e atrito lateral no sistema solo-amostrador (FEAGRI-Unicamp).

Tabela 5. 6 - Fator de atrito (a) (FEAGRI-Unicamp).

Prof. (m)	a_{Abaqus}	a_{Morais}
1	4.89	7.20
2	4.14	11.3
4	5.61	6.70
8	2.45	2.30

**Figura 5. 24 - Fator de atrito (a) versus profundidade (FEAGRI-Unicamp).**

Todos os valores de a são maiores que um, do mesmo modo que aqueles encontrados experimentalmente, para as camadas superficiais de argila (até 9 m de profundidade). Este fato mostra que o embuchamento ocorre quando as resistências unitárias internas são maiores do que as externas.

Assim, para as duas camadas investigadas e que apresentaram o fenômeno do embuchamento, o valor médio dos fatores de atrito (a) obtidos para todas as profundidades estudadas foi de 4.9 para a camada de argila arenosa porosa que está presente até a profundidade de 6m e o valor médio para a camada subsequente de silte argiloso foi de 2.5. Esses valores são consistentes com aqueles encontrados por Morais (2014), que foram 7.3 e 3.9, para a primeira e segunda camada, respectivamente. Segundo Morais (2014) os solos com maior fração de argila apresentam valores do fator a maiores, quando comparados com solos arenosos.

5.2 Escola de Engenharia de São Carlos - USP

Para validar os resultados dos modelos, foram tomados os resultados do ensaio realizado por Zapata (2015). Esse ensaio foi realizado com equipamento manual, e com instrumentação na base da composição das hastes (topo do amostrador). A instrumentação permitiu obter sinais de força e aceleração e com eles a energia e a eficiência do equipamento. Zapata (2015) também estimou a força de reação R_2 na parede interna do amostrador após a realização do ensaio SPT, através de um dispositivo de extração do solo de dentro do amostrador. O intuito era obter as outras forças de reação e assim as tensões de resistência resultantes da cravação do amostrador SPT no solo.

5.2.1 Penetração do amostrador

A Tabela 5. 7 apresenta os valores do deslocamento do amostrador dentro do solo para as cinco simulações realizadas. Cada modelo foi criado para representar cada uma das diferentes profundidades do ensaio. Os valores obtidos da penetração foram comparados com os valores de deslocamento na base da composição das hastes (topo do amostrador), assim como o deslocamento medido em campo, determinados por Zapata (2015).

Tabela 5. 7 - Penetração do amostrador para diferentes profundidades (EESC-USP).

Prof. (m)	Golpe N°	$\Delta\rho_{\text{numérico}}$ (m)	$\Delta\rho_{\text{experimental}}$ (m)
1	3	0.106	0.108
2	3	0.151	0.150
4	4	0.095	0.096
5	3	0.109	0.105
7	5	0.049	0.048

Nas Figuras 5. 25 a 5. 29 são mostrados os gráficos, obtidos a partir dos modelos numéricos, da penetração do amostrador ao longo do tempo, bem como os deslocamentos da base da composição das hastes, determinados experimentalmente por Zapata (2015). Essa autora utilizou instrumentação colocada somente logo acima do amostrador. Portanto, foi o único sinal comparado com os resultados das simulações numéricas. Observando os resultados obtidos com o Abaqus/Explicit®, pode se afirmar que as simulações numéricas fornecem resultados de deslocamento compatíveis com aqueles determinados por meio dos ensaios realizados nesse perfil de solo.

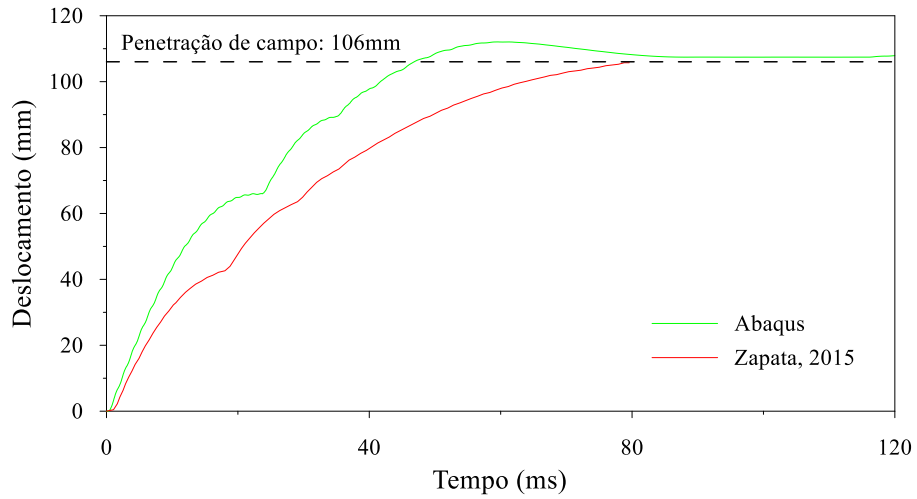


Figura 5. 25 - Deslocamento - Prof. 1m – 3º golpe (EESC-USP).

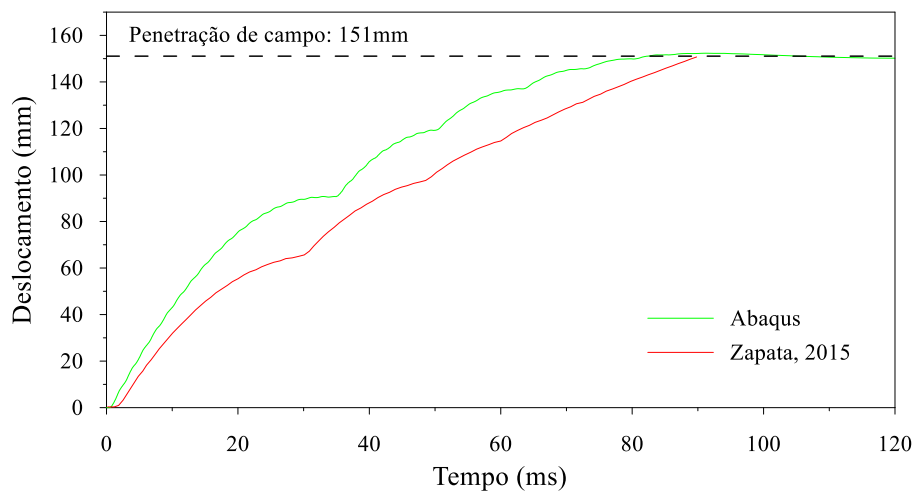


Figura 5. 26 - Deslocamento - Prof. 2m – 3º golpe (EESC-USP).

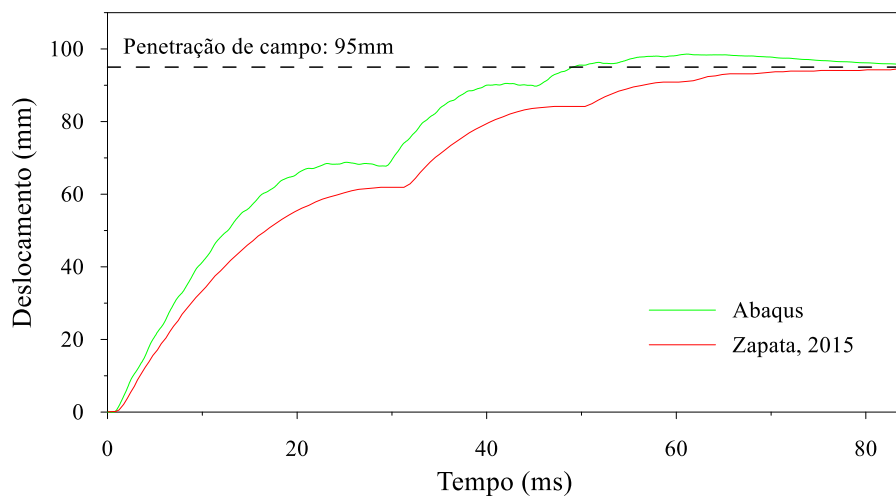


Figura 5. 27 - Deslocamento - Prof. 4m – 4º golpe (EESC-USP).

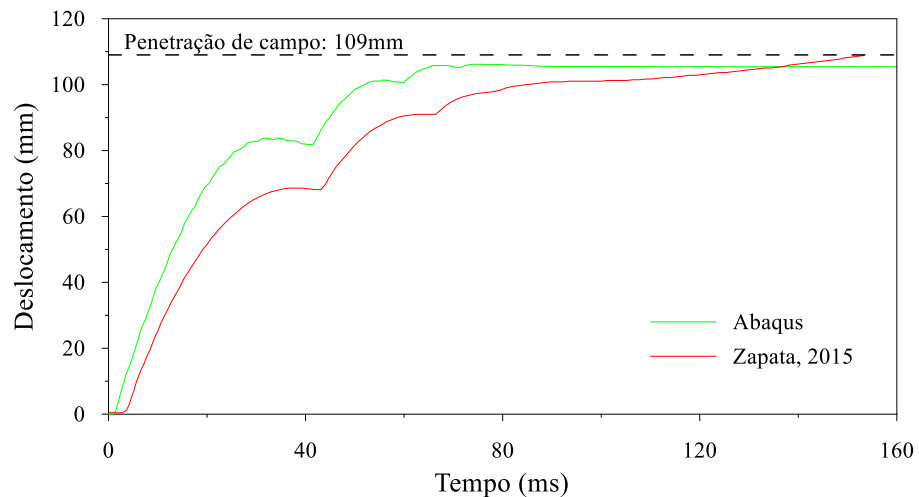


Figura 5. 28 - Deslocamento - Prof. 5m – 3º golpe (EESC-USP).

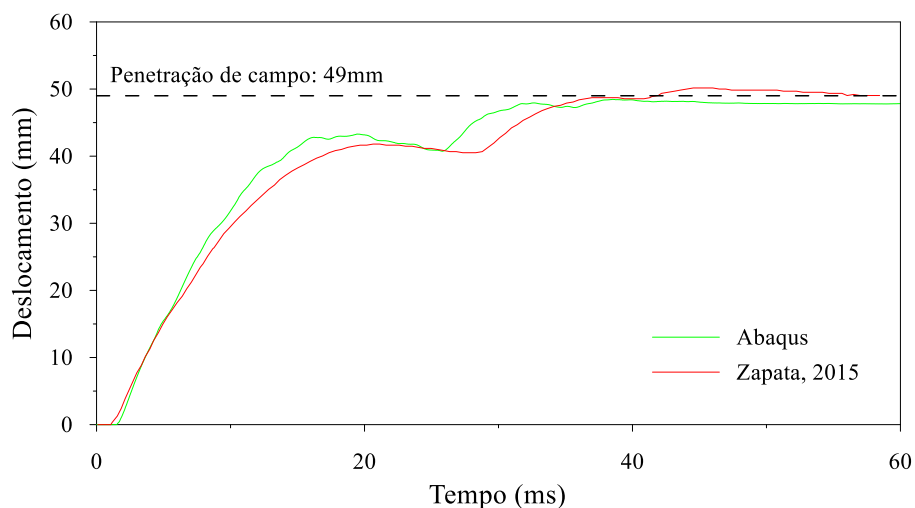


Figura 5. 29 - Deslocamento - Prof. 7m – 5º golpe (EESC-USP).

Também é perceptível que para todos os casos modelados numericamente, o número de impactos totais para o evento é o mesmo que o observado nos ensaios de campo. Apesar de que o deslocamento final do amostrador obtido com os modelos numéricos ser próximo daquele medido em campo, os valores dos deslocamentos ao longo do tempo são maiores do que aqueles determinados experimentalmente. Entretanto, o comportamento dos deslocamentos ao longo do tempo é similar com aqueles obtidos experimentalmente, mostrando claramente os diferentes impactos e o instante de suas ocorrências. A diferença de comportamento pode ser atribuída ao modelo constitutivo escolhido para as simulações.

5.2.2 Resistência dinâmica do solo (R_D)

Abaqus/Explicit® pode gerar gráficos da força vertical total desenvolvida no contato solo-amostrador, para cada instante durante a penetração do amostrador no solo. Os valores da resistência dinâmica do solo (R_D) foram determinados como a média da força de reação

observada para o primeiro (principal) impacto do martelo, pois é com esse impacto que ocorre a maior parte da penetração do amostrador. Desses valores deve ser subtraído o valor do peso do conjunto cabeça de bater-hastes-amostrador, para atender à equação de equilíbrio (Equação 2. 40). Na Tabela 5. 8 esses valores foram comparados com os valores obtidos experimentalmente, e também com a força de reação dinâmica teórica (F_d), proposta por Schnaid et al. (2009) (Equação 2. 26). Nas Figuras 5. 30 a 5. 34, são mostrados os sinais de força obtidos a partir das simulações numéricas.

Tabela 5. 8 - Comparações forças de reação dinâmica do solo (EESC-USP).

Prof. (m)	Golpe N°	R_D (kN)		F_d (kN)
		Numérico	Experimental	
1	3	2.75	2.95	4.07
2	3	2.26	2.46	2.91
4	4	3.12	3.37	4.64
5	3	2.72	3.47	3.66
7	5	6.10	5.30	7.38

A partir dos resultados apresentados na Tabela 5. 8 pode-se afirmar que os valores obtidos a partir da simulação numérica são menores do que aqueles determinados experimentalmente e que os valores da força de reação dinâmica teórica. A força de reação dinâmica nos modelos numéricos está mais próxima dos valores experimentais que dos valores teóricos.

A alta frequência de flutuação observada nas Figuras 5. 30 a 5. 34 é devido ao algoritmo utilizado pelo software Abaqus/Explicit®, pelo refinamento da malha, a interface de contato e os parâmetros do solo e do aço (Susila e Hryciw, 2003). Porém é possível obter uma média da força de reação dinâmica para o primeiro impacto do martelo em cada golpe analisado como mostrado nas figuras.

Uma comparação entre R_D experimental, R_D do modelo numérico e F_d teórico é apresentada na Figura 5. 35. Somente para a profundidade de 7 m o valor da força de reação dinâmica obtido a partir do modelo numérico foi maior que aquele determinado experimentalmente e menor que o valor da força de reação dinâmica teórica.

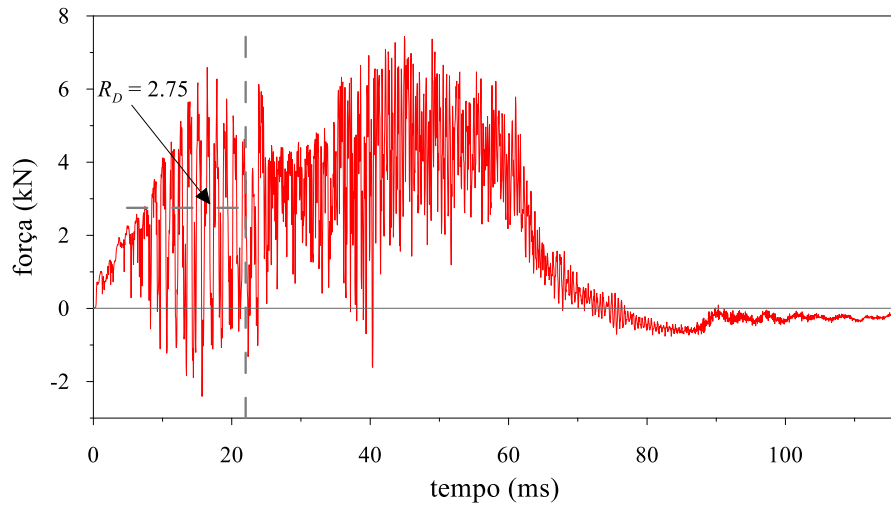


Figura 5.30 - Resistência dinâmica do solo - Prof. 1m – 3º golpe (EESC-USP).

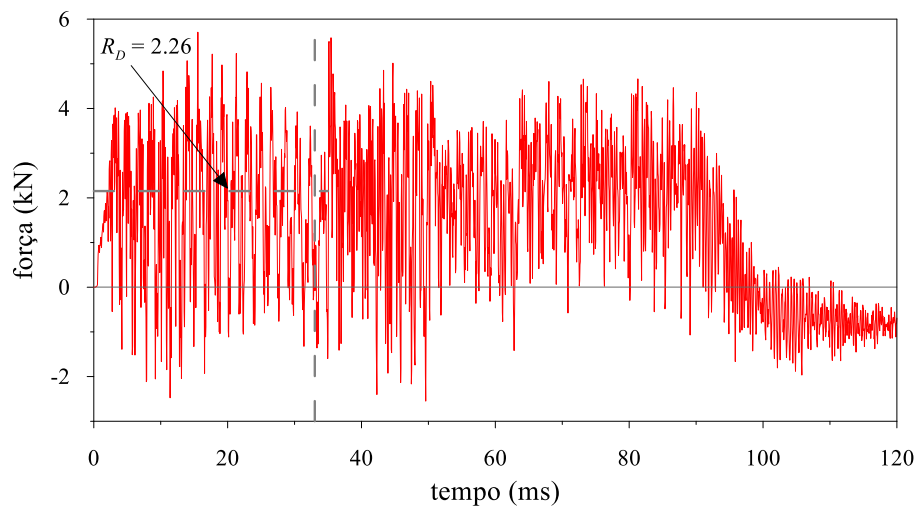


Figura 5.31 - Resistência dinâmica do solo - Prof. 2m – 3º golpe (EESC-USP).

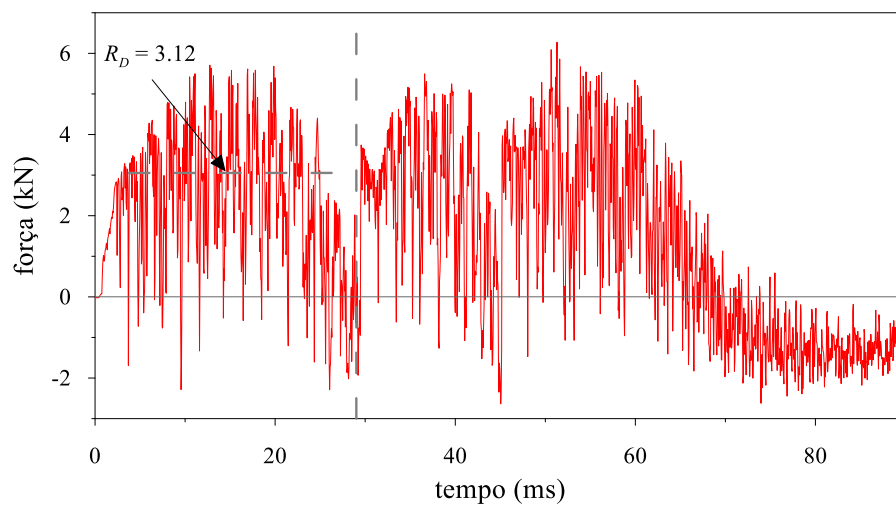


Figura 5.32 - Resistência dinâmica do solo - Prof. 4m – 4º golpe (EESC-USP).

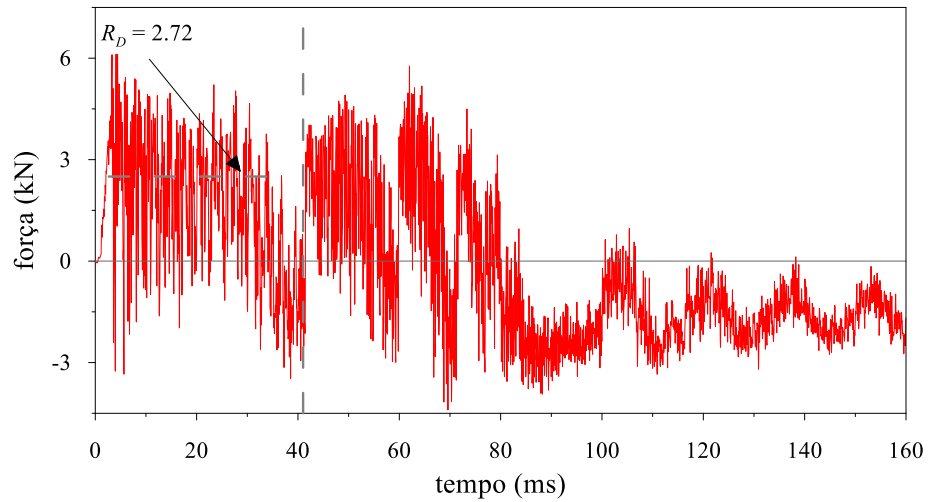


Figura 5.33 - Resistência dinâmica do solo - Prof. 5m – 3º golpe (EESC-USP).

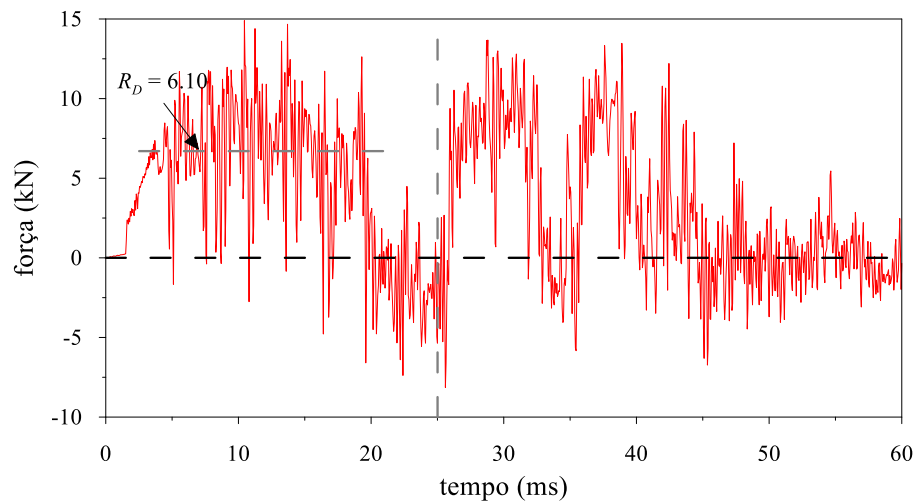


Figura 5.34 - Resistência dinâmica do solo - Prof. 7m – 5º golpe (EESC-USP).

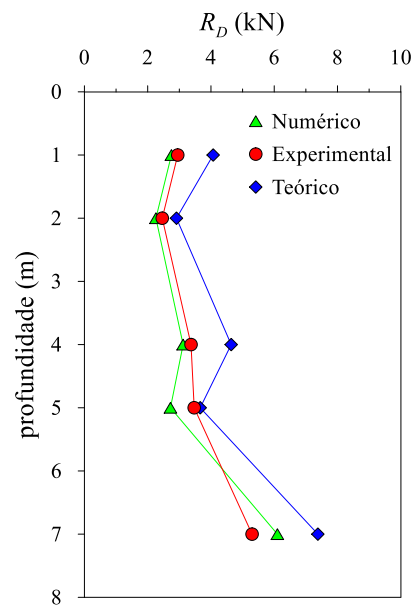


Figura 5.35 - Perfil de resistência dinâmica experimental, teórica e numérica (EESC-USP).

Na Figura 5. 36 são mostradas as relações entre índices de resistência N_{SPT} e as forças de reação dinâmicas. Os valores do índice N_{SPT} foram obtidos a partir dos ensaios experimentais. Todas as retas ajustadas mostram a mesma tendência.

A Figura 5. 37 mostra uma comparação entre valores da força de reação dinâmica experimental e valores da força de reação dinâmica determinados numericamente mostrando uma similaridade entre esses valores. Observa-se na mesma figura que a diferença entre R_D dos modelos e R_D experimental apresenta uma tendência de aumento com o aumento da resistência do solo.

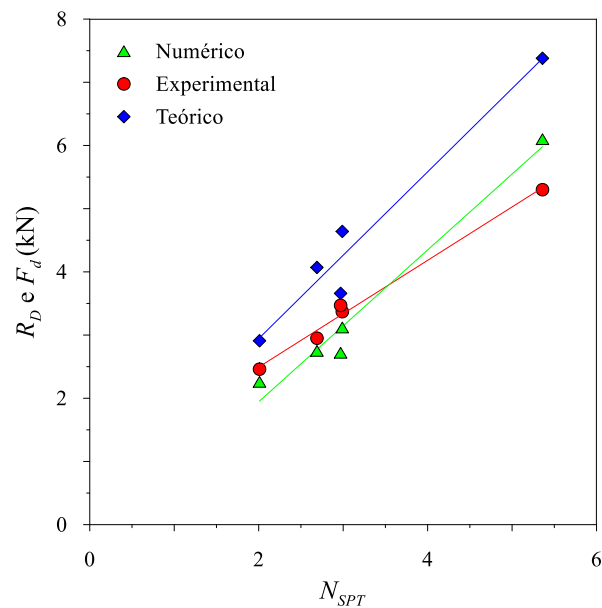


Figura 5. 36 – R_D e F_d versus N_{SPT} (EESC-USP).

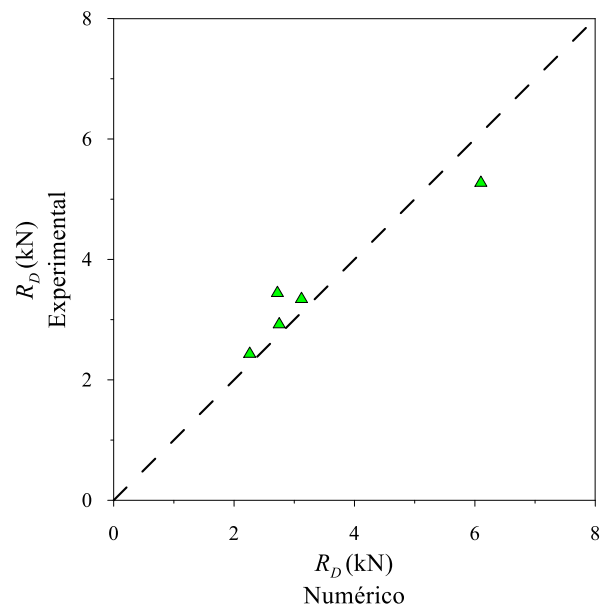


Figura 5. 37 - Comparação da força dinâmica numérica e experimental (EESC-USP).

5.2.3 Eficiência do equipamento

A Tabela 5. 9 apresenta os valores de eficiência (η) do equipamento SPT, estimados para cada profundidade através da equação 2. 39, levando em conta a energia potencial do sistema modificada. Para calcular a eficiência a partir desta equação são necessários os valores da massa do martelo, da massa do conjunto de hastes, da força de reação dinâmica do solo à penetração e do índice de resistência N_{SPT} . A equação 2. 39 foi originalmente proposta para calcular a força de reação dinâmica do solo a partir da eficiência do equipamento obtida com instrumentação no equipamento. Como para o caso dos modelos numéricos, as forças de reação dinâmica são obtidas diretamente, faz-se o processo inverso para calcular a eficiência. Neves (2004) demonstrou que a única parcela de reação do solo com a cravação do amostrador é a parcela de resistência estática R_s , independentemente do tipo de esforço aplicado sobre a cabeça de bater. Por isso é possível usar a força de reação dinâmica para calcular a eficiência do equipamento SPT.

Tabela 5. 9 - Comparação da eficiência a partir dos resultados numéricos e experimentais (EESC-USP).

Prof. (m)	R_D numérico (kN)	N_{SPT}	η numérico (%)	η experimental (%)
1	2.75	2.69	55	76
2	2.26	2.01	58	72
4	3.12	2.99	57	75
5	2.72	2.97	50	66
7	6.10	5.36	65	70

O valor médio da eficiência calculada a partir das simulações numéricas é de 57% com um desvio padrão de 6%, resultando num coeficiente de variação de 10%. A eficiência do equipamento encontrada experimentalmente foi de 71% com um desvio padrão de 2%, resultando num coeficiente de variação de 4%.

A Figura 5. 38 apresenta os valores de eficiência em função do comprimento da composição de hastes. A figura possibilita observar que a eficiência de fato não depende do comprimento do conjunto de hastes. Também é perceptível que a eficiência calculada a partir dos modelos numéricos é menor em todos os casos.

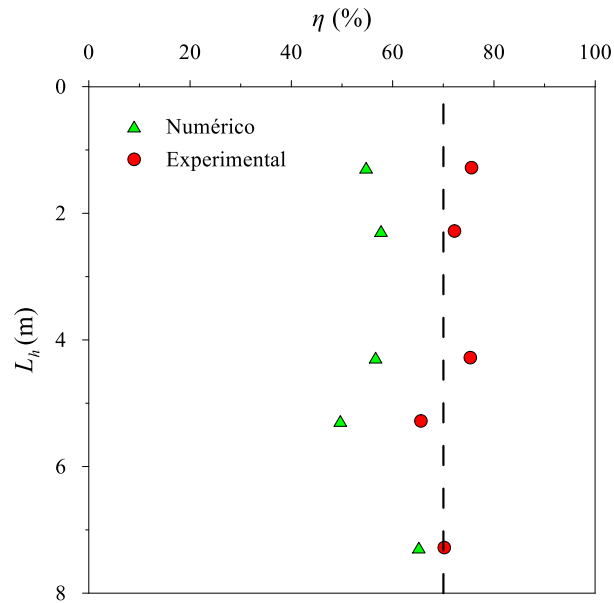


Figura 5. 38 - Eficiência *versus* comprimento da composição de hastes (EESC-USP).

5.2.4 Comprimento da amostra

Apesar de ter sido simulado somente um golpe para cada profundidade, o modelo permitiu observar a ocorrência de embuchamento, para todas as profundidades modeladas, conforme mostrado a Figura 5. 13. Para cada profundidade foi calculada a relação $L_a / \Delta\rho_{acumulado}$ a partir dos resultados das simulações numéricas, os seus valores são mostrados na Figura 5. 39 e Tabela 5. 10.

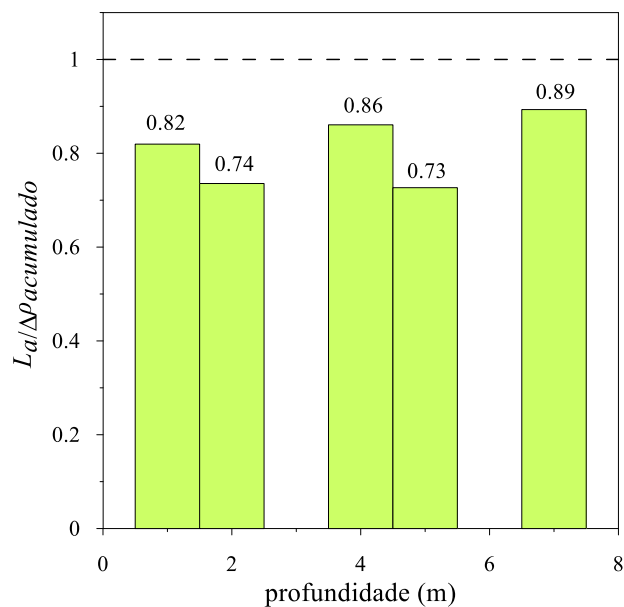


Figura 5. 39 - Relação entre o comprimento da amostra L_a e a penetração acumulada do amostrador $\Delta\rho_{acumulado}$ (EESC-USP).

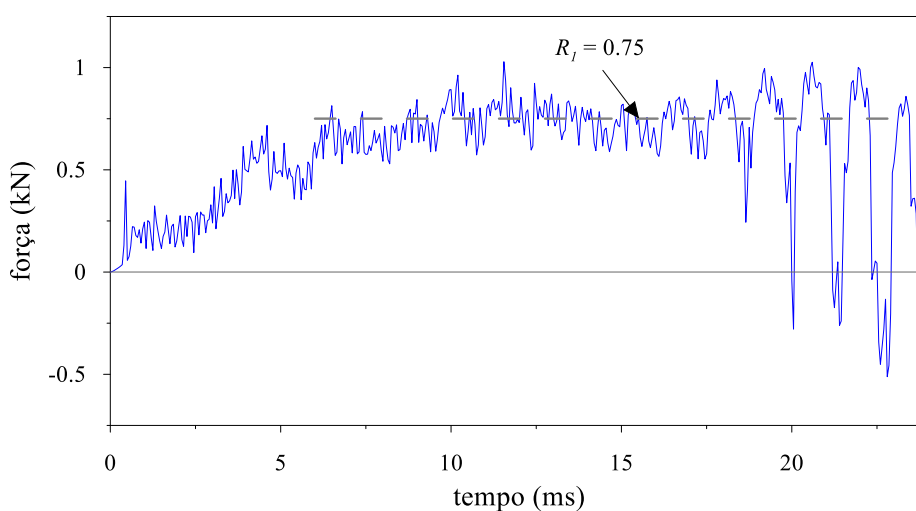
Tabela 5. 10 - Relação $L_a/\Delta\rho_{acumulado}$ para análise do embuchamento (EESC-USP).

Prof. (m)	Golpe N°	$\Delta\rho_{acumulado}$ (m)	L_a (m)	$L_a/\Delta\rho_{acumulad o}$
1	3	0.388	0.318	0.82
2	3	0.469	0.345	0.74
4	4	0.481	0.414	0.86
5	3	0.333	0.242	0.73
7	5	0.384	0.343	0.89

A Tabela 5. 10 permite observar que para valores menores de N_{SPT} há uma maior tendência de embuchamento, e pelo contrário para os maiores valores a tendência é menor. Devido a que os valores encontrados para a relação $L_a / \Delta\rho_{acumulado}$ foram menores que a unidade, se conclui que nos resultados das simulações numéricas ocorre o fenômeno de embuchamento. Pelo fato de que foi modelado somente um golpe para cada profundidade, foi obtido somente um embuchamento parcial, de modo que não se pode comparar com os resultados obtidos experimentalmente por Zapata (2015). Essa autora encontrou embuchamento somente para as profundidades de 5 a 7 metros, em discordância com os resultados das simulações numéricas.

5.2.5 Resistências unitárias de atrito externas e internas

As Figuras 5. 40 a 5. 49 mostram os sinais das resultantes das resistências unitárias (R_1 e R_2), atuantes nas paredes interna e externa do amostrador, obtidos pelas simulações numéricas. Foi considerado só o primeiro impacto para cada golpe analisado. Os valores das forças para todas as profundidades são apresentados na Tabela 5. 11.

**Figura 5. 40 - Força de atrito na parede externa do amostrador R_1 – Prof. 1m – 3° golpe (EESC-USP).**

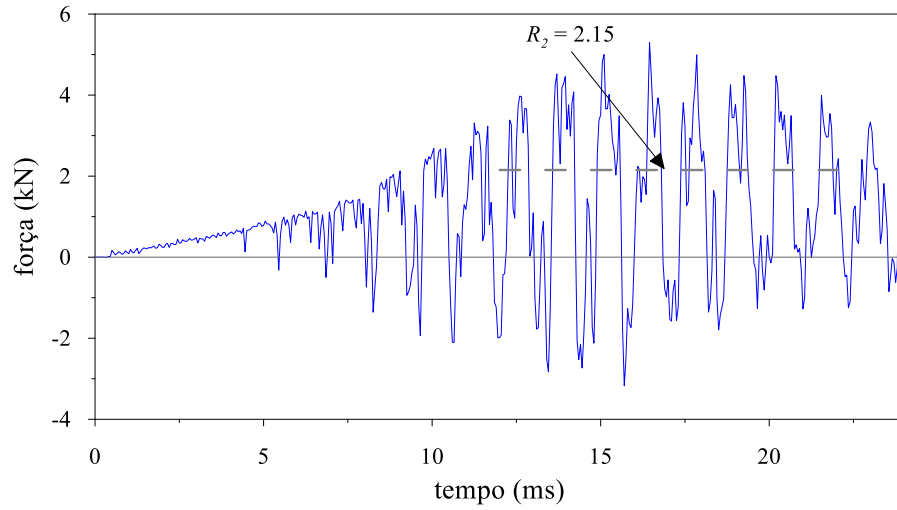


Figura 5. 41 - Força de atrito na parede interna do amostrador R_2 – Prof. 1m – 3º golpe (EESC-USP).

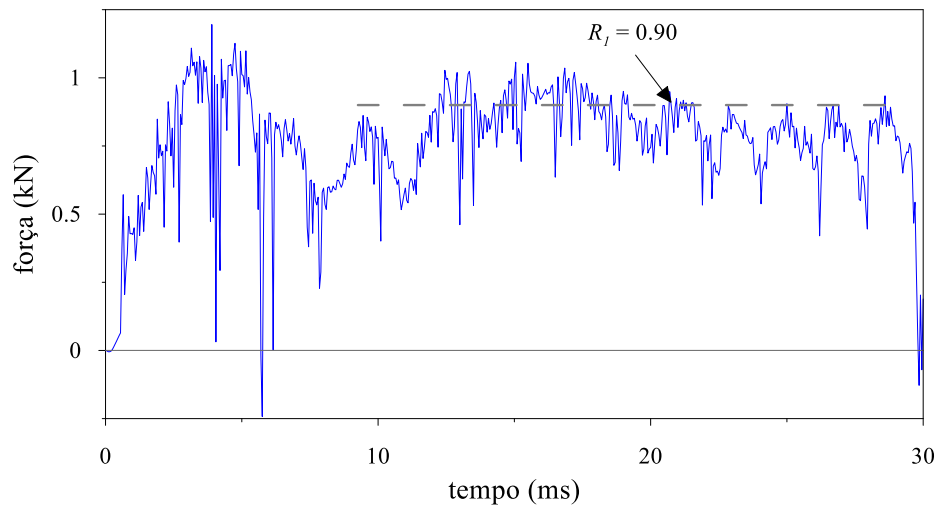


Figura 5. 42 - Força de atrito na parede externa do amostrador R_1 – Prof. 2m – 3º golpe (EESC-USP).

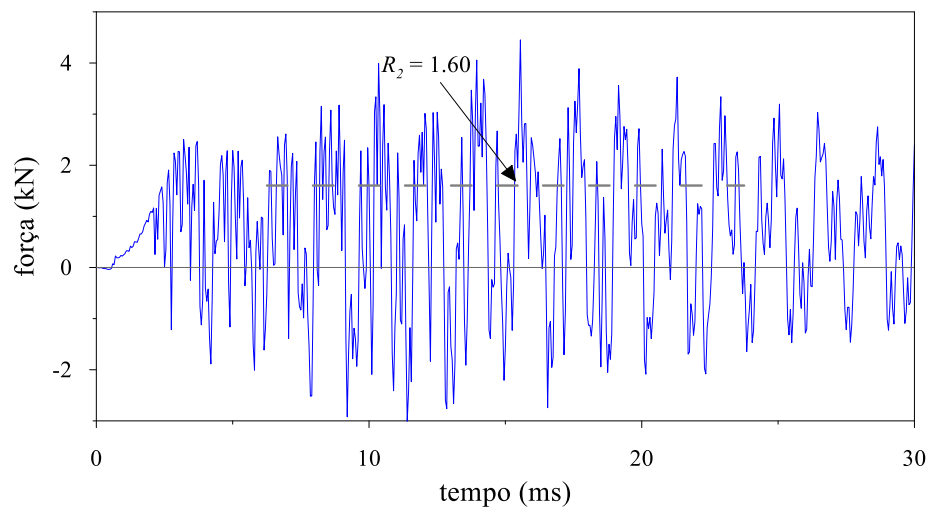


Figura 5. 43 - Força de atrito na parede interna do amostrador R_2 – Prof. 2m – 3º golpe (EESC-USP).

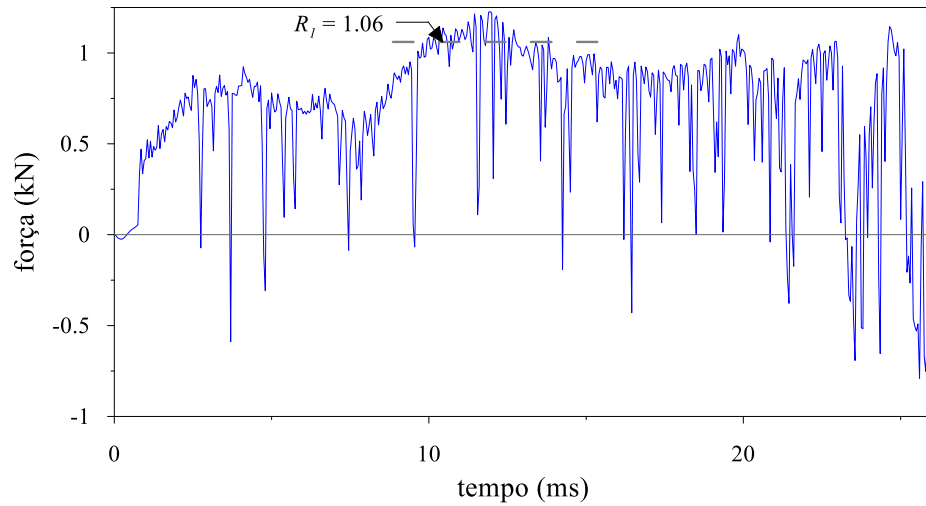


Figura 5. 44 - Força de atrito na parede externa do amostrador R_1 – Prof. 4m – 4º golpe (EESC-USP).

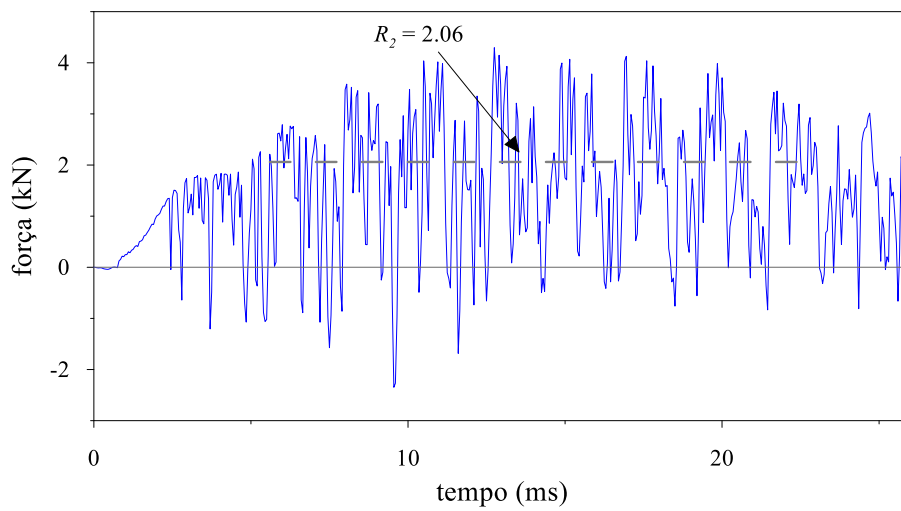


Figura 5. 45 - Força de atrito na parede interna do amostrador R_2 – Prof. 4m – 4º golpe (EESC-USP).

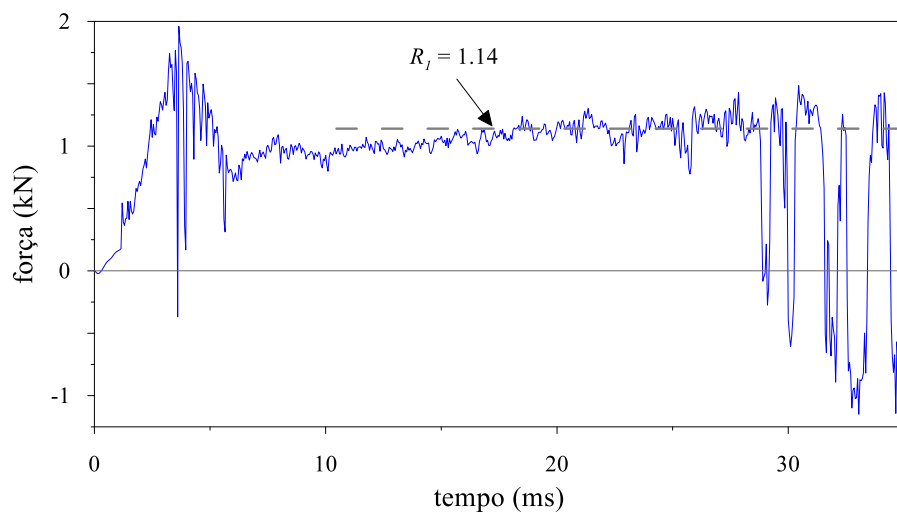


Figura 5. 46 - Força de atrito na parede externa do amostrador R_1 – Prof. 5m – 3º golpe (EESC-USP).

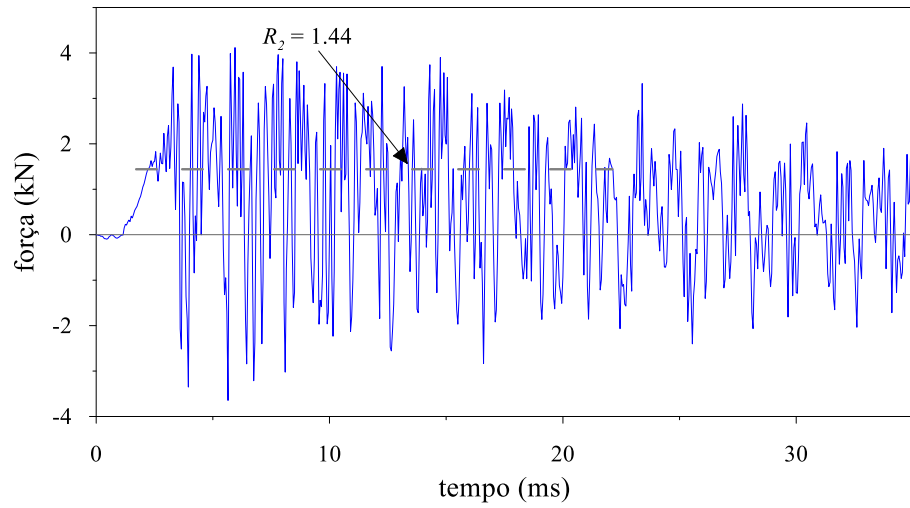


Figura 5. 47 - Força de atrito na parede interna do amostrador R_2 – Prof. 5m – 3º golpe (EESC-USP).

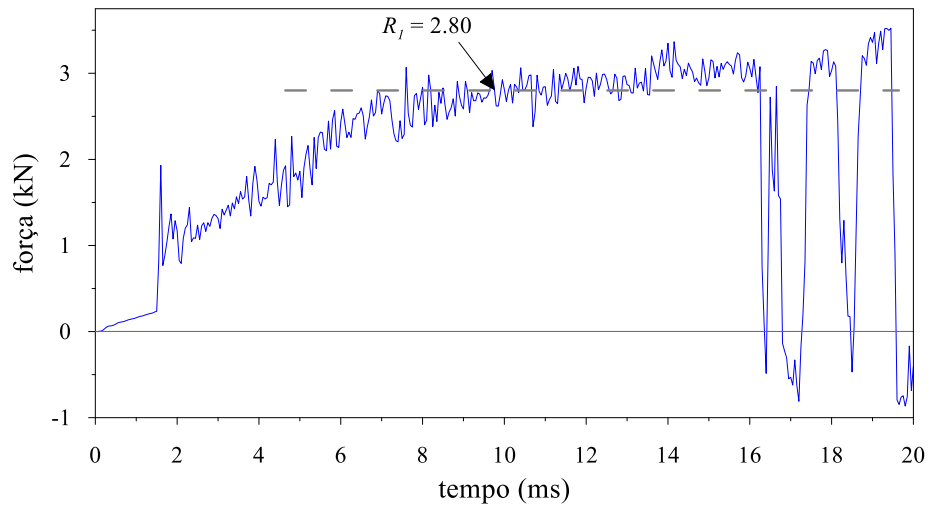


Figura 5. 48 - Força de atrito na parede externa do amostrador R_1 – Prof. 7m – 5 golpe (EESC-USP).

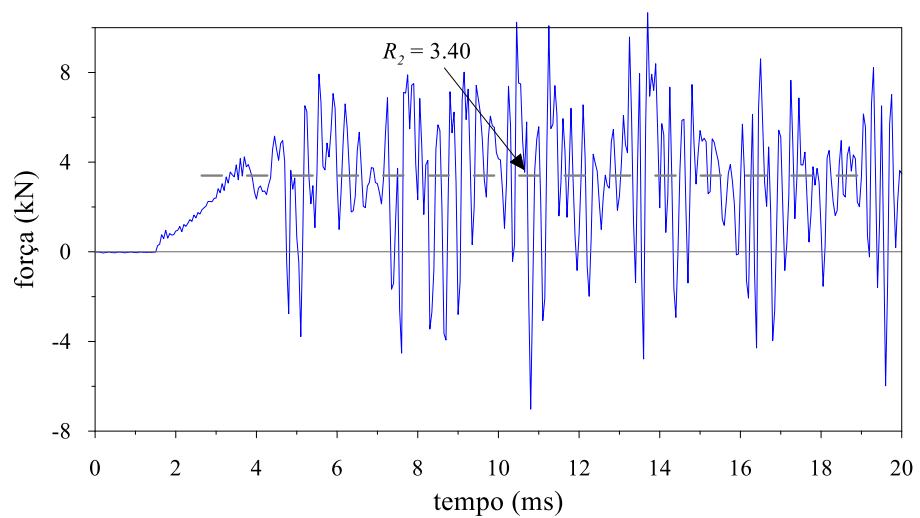


Figura 5. 49 - Força de atrito na parede interna do amostrador R_2 – Prof. 7m – 5º golpe (EESC-USP).

Tabela 5. 11 - Forças de reação na parede externa (R_1) e interna (R_2) do amostrador obtidas a partir dos modelos numéricos (EESC-USP).

Prof. (m)	R_1 (kN)	R_2 (kN)
1	0.75	2.15
2	0.90	1.60
4	1.06	2.06
5	1.14	1.44
7	2.80	3.40

Com base no equilíbrio de forças de reação no amostrador (item 2.8.4) e nos resultados de força lateral externa (R_1) e interna (R_2), foram estimados os valores das resistências unitárias de ponta e de atrito no sistema solo-amostrador (Tabela 5. 12). Essas resistências unitárias foram determinadas através das formulações propostas por Aoki (2013). Com as equações 2. 41 e 2. 42 foi possível calcular as resistências unitárias de atrito atuantes nas duas paredes do amostrador. A resistência unitária de ponta foi determinada por meio da equação 2. 44. Na Tabela 5. 12 se faz comparações com as resistências unitárias obtidas experimentalmente.

Os resultados das simulações numéricas foram também comparados com resultados de ensaios de torque realizados com ensaios SPT por Peixoto (2001), em diversos locais, incluindo o campo experimental da EESC-USP (Tabela 5. 12).

Tabela 5. 12 - Tensões unitárias de atrito e ponta no sistema solo amostrador (EESC-USP).

Prof. (m)	Numérico			Experimental			
				Zapata, 2015			Peixoto, 2001
	r_ℓ (kPa)	$r_{\ell i}$ (kPa)	r_p (Mpa)	r_ℓ (kPa)	$r_{\ell i}$ (kPa)	r_p (Mpa)	r_ℓ (kPa)
1	12.82	61.66	2.25	37.14	8.82	0.05	12.09
2	12.60	42.30	1.67	33.98	7.14	0.04	17.38
4	14.46	45.38	2.15	42.26	41.26	0.23	23.07
5	22.93	54.27	1.51	49.85	37.29	0.21	20.31
7	48.40	90.41	3.55	61.41	74.48	0.41	16.30

A Figura 5. 50 apresenta a distribuição das resistências unitárias de atrito e de ponta ao longo da profundidade do perfil de solo investigado. Conforme mostrado nessa figura, essas resistências aumentam gradativamente com a profundidade. As resistências de atrito na parede externa são comparáveis com aquelas correspondentes aos ensaios realizados por Peixoto (2001).

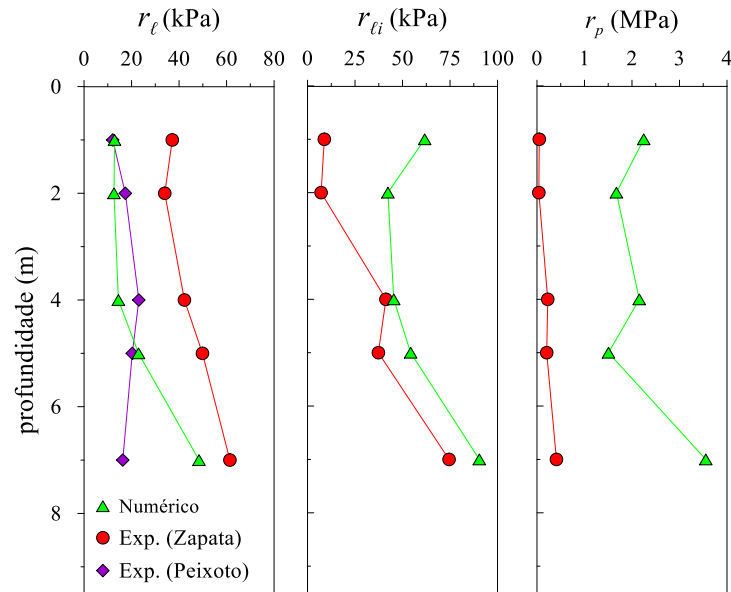


Figura 5. 50 - Perfil de resistências unitárias de ponta e atrito lateral no sistema solo-amostrador (EESC-USP).

Para as maiores profundidades as resistências unitárias de atrito na parede interna do amostrador se aproximam daquelas calculadas por Zapata (2015), a partir da medida da força de reação interna com um equipamento especificamente desenvolvido para o seu trabalho. Na resistência de ponta os valores apresentam grande discrepância. Não foi possível calcular as resistências unitárias atuantes na parede interna e na ponta do amostrador com os resultados de Peixoto (2001), pois no seu trabalho não foi realizada a medida do comprimento da amostra recuperada.

A partir dos valores das resistências unitárias de atrito nas paredes interna e externa do amostrador (r_t e r_{ti}), foi estimado o fator de atrito (a), segundo a proposta de Aoki (2013). Os valores do fator de atrito são apresentados na Tabela 5. 13 e na Figura 5. 51.

Todos os valores de a , determinados a partir das análises numéricas são maiores que a unidade. Esses valores são discrepantes daqueles encontrados por Zapata (2015), que para a maioria do perfil, são menores que um. Os resultados de Zapata (2015) concordam com os resultados de não embuchamento encontrados no seu mesmo trabalho.

Tabela 5. 13 - Fator de atrito (a) (EESC-USP).

Prof. (m)	$a_{numérico}$	$a_{experimental}$
1	4.81	0.24
2	3.36	0.21
4	3.14	0.98
5	2.37	0.75
7	1.87	1.21

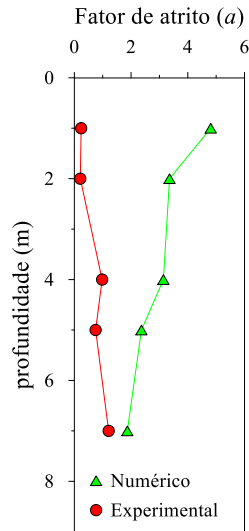


Figura 5. 51 - Fator de atrito (a) versus profundidade (EESC-USP).

5.3 Prova de carga dinâmica com energia crescente

Conforme mencionado no item 4.7, a partir da simulação do ensaio SPT realizado no quarto metro do campo experimental da FEAGRI-Unicamp, foram criados outros modelos nos quais se variou a altura de queda do martelo e por sua vez, a energia entregue ao sistema. Dos resultados desses modelos pode-se obter a resistência mobilizada do solo com seu respectivo deslocamento. As Figura 5. 52 a 5. 58 mostram os sinais de força de reação dinâmica para o primeiro impacto do martelo, correspondente a cada altura de queda do martelo.

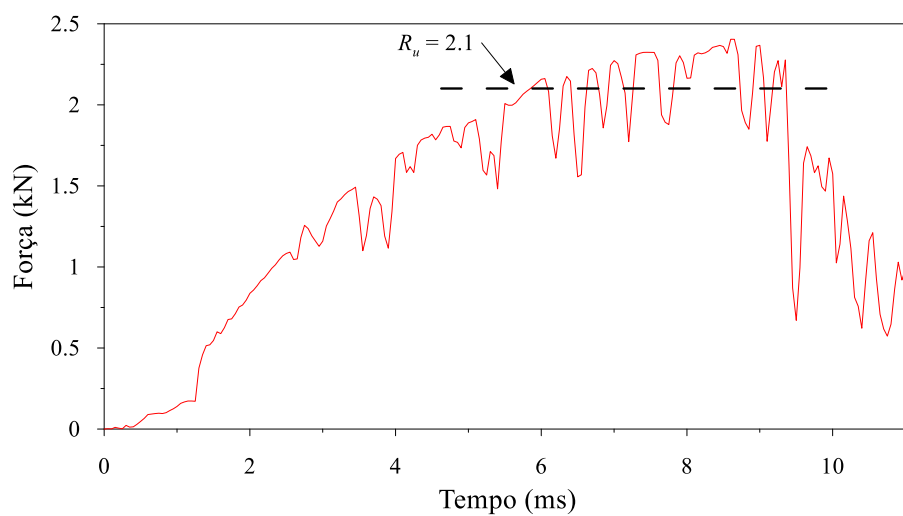


Figura 5. 52 – Resistência mobilizada do solo(H=0.01 m).

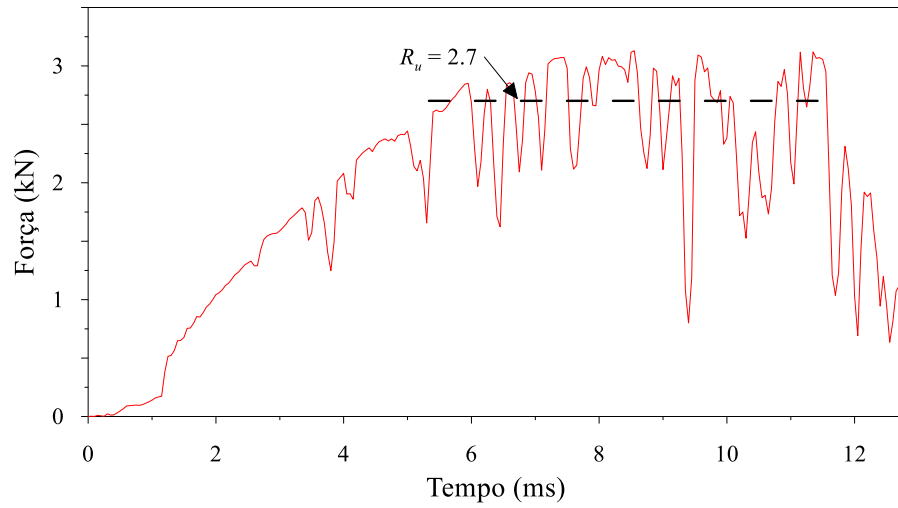


Figura 5. 53 - Resistência mobilizada do solo($H=0.03$ m).

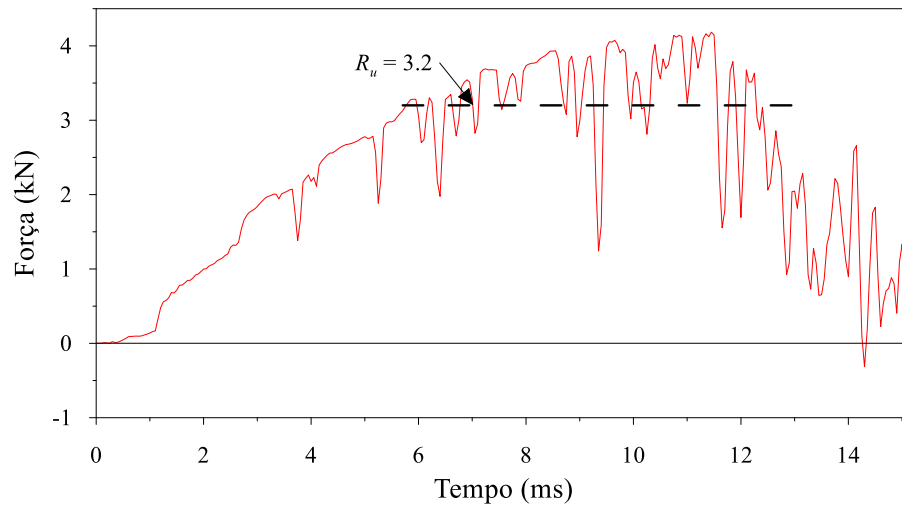


Figura 5. 54 - Resistência mobilizada do solo($H=0.06$ m).

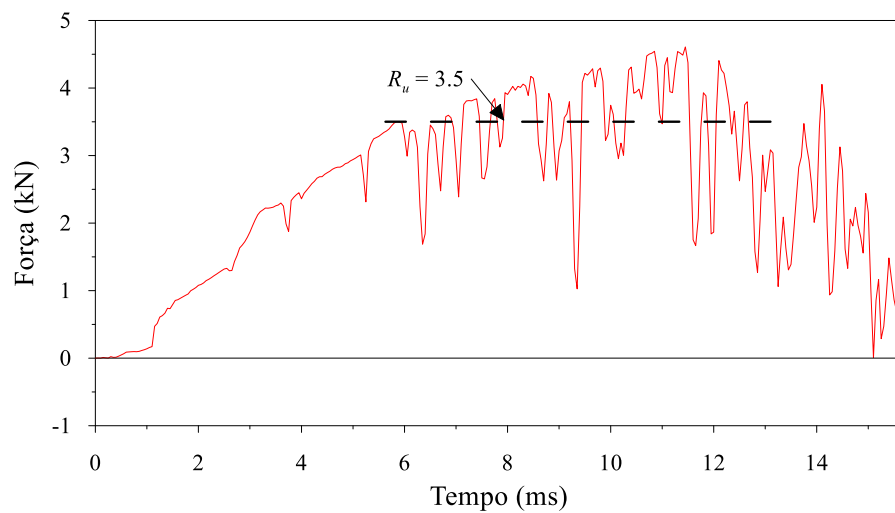


Figura 5. 55 - Resistência mobilizada do solo($H=0.10$ m).

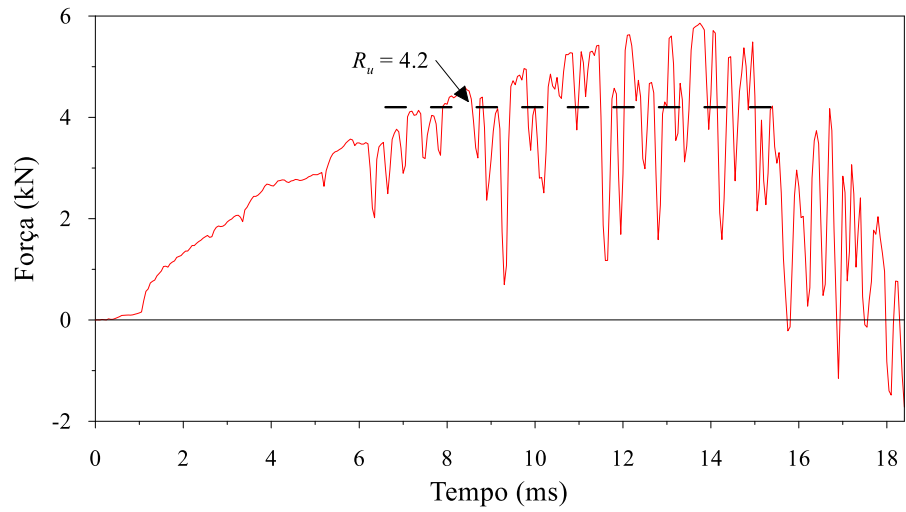


Figura 5. 56 - Resistência mobilizada do solo(H=0.30 m).

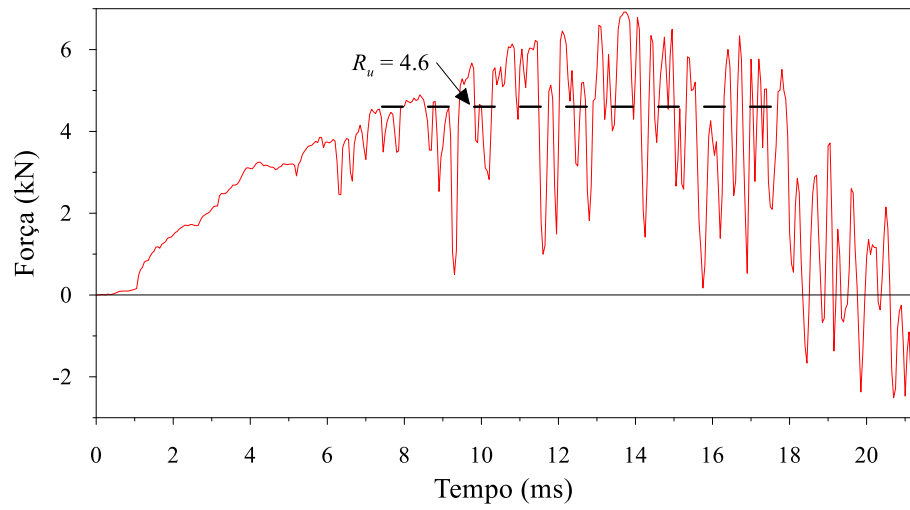


Figura 5. 57 - Resistência mobilizada do solo(H=0.50 m).

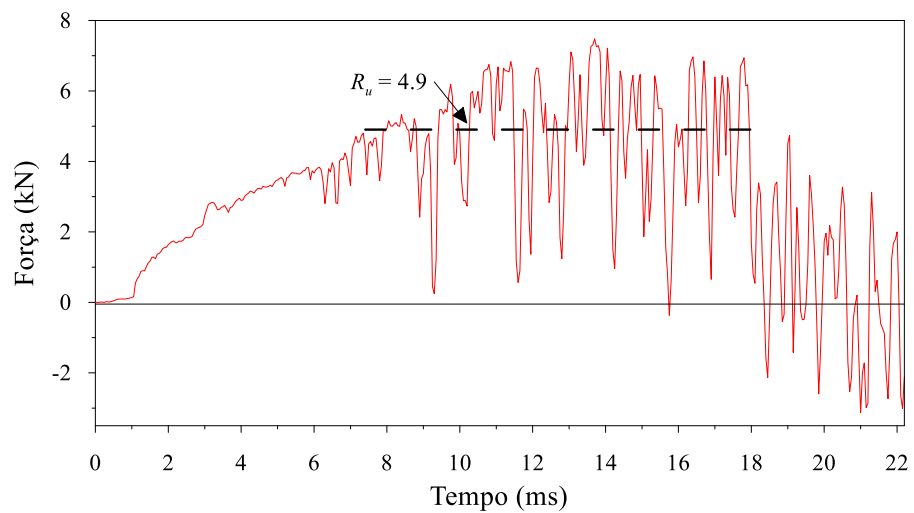


Figura 5. 58 - Resistência mobilizada do solo(H=0.75 m).

A Tabela 5. 14 apresenta a resistência mobilizada última do solo (R_u) para cada altura de queda do martelo, com o respectivo deslocamento do amostrador, resultando crescentes com o aumento da energia aplicada na simulação. A partir dos resultados de todas as simulações pode-se plotar a curva resistência mobilizada última (R_u) *versus* deslocamento do amostrador. A Figura 5. 59 apresenta a curva resultante de uma prova de carga dinâmica com energia crescente que seria similar à curva obtida a partir de uma prova de carga estática. Essa figura representa uma curva carga *versus* recalque do tipo aberta, sem caracterização de uma ruptura definida (Aoki, 2013).

O verdadeiro significado do ensaio com energia crescente é a obtenção da curva de resistência mobilizada *versus* deslocamento, que pode ser interpretada como uma prova de carga estática, com a possibilidade de extrapolação para determinação da ruptura. Devido ao fato de não se ter resultados experimentais de provas de carga dinâmica com energia crescente com o amostrador, no mesmo tipo de solo, não é possível mostrar uma comparação na Figura 5. 59. No entanto, é confirmada a teoria de Aoki (2013) de que a resistência mobilizada do solo, para certa energia aplicada, pode estar bem abaixo da ruptura e apenas representar um ponto na curva de resistência mobilizada *versus* deslocamento.

Aoki (1996) também propõe o ensaio de energia crescente para o registro da nega e repique. Os valores de repique aumentam com a energia aplicada, mas até certo nível, a partir do qual o valor do repique torna-se praticamente constante. A nega é quase nula para energias menores, mas, depois atinge valores cada vez maiores. A Figura 5. 60 mostra o deslocamento resultante das simulações numéricas realizadas com energia crescente confirmando o raciocínio anterior.

Tabela 5. 14 - Resistência mobilizada última e deslocamento para diferentes alturas de queda do martelo.

H (m)	$\Delta\rho$ (m)	R_u (kN)
0	0	0
0.01	0.004	2.1
0.03	0.007	2.7
0.06	0.011	3.2
0.10	0.015	3.5
0.30	0.030	4.2
0.50	0.043	4.6
0.75	0.056	4.9

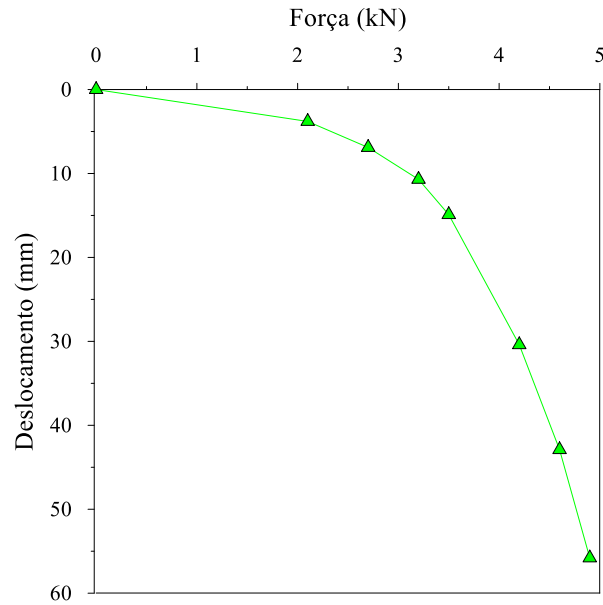


Figura 5. 59 – Resistência mobilizada *versus* deslocamento: prova de carga com energia crescente.

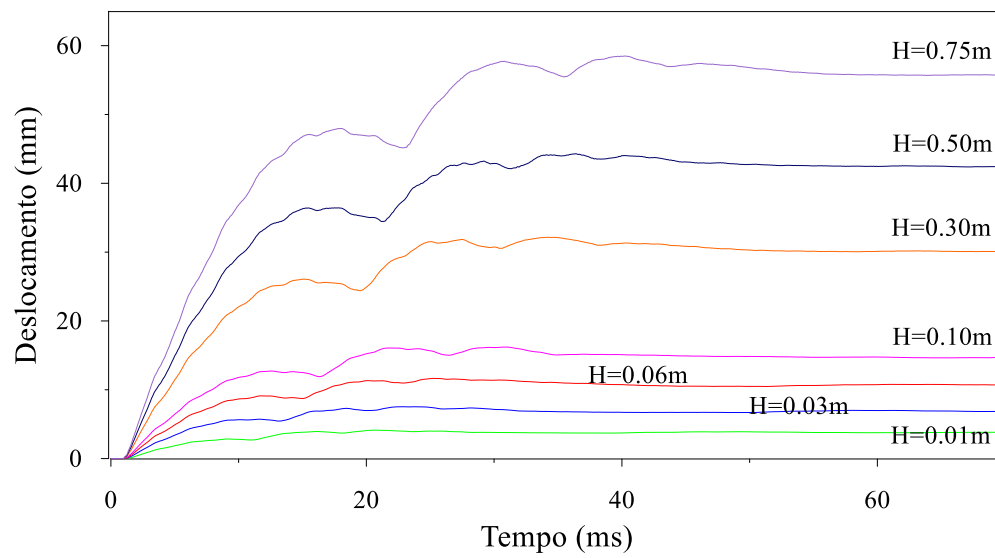


Figura 5. 60 - Deslocamento do amostrador para diferentes alturas de queda do martelo.



Capítulo 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho trata da interpretação racional de resultados do ensaio SPT com base em análises numéricas, utilizando o método de elementos finitos. Nestas análises foi utilizado o software Abaqus/Explicit®, pois é particularmente adequado para simular eventos dinâmicos transitórios de curta duração e com grandes deslocamentos relativos. Esse programa também é capaz de lidar de forma eficiente com problemas altamente não-lineares, como contato entre duas superfícies, que o torna muito adequado para a simulação de ensaios geotécnicos.

A partir das simulações numéricas realizadas, se encontraram resultados de deslocamento ($\Delta\rho$), força de reação dinâmica do solo (R_D), e as forças de reação na parede vertical externa (R_1) e interna (R_2) do amostrador padrão SPT. A partir dos dados coletados com os modelos numéricos, foi possível calcular a eficiência do equipamento (η), as resistências unitárias de atrito atuantes nas paredes e na ponta do amostrador, assim como a relação entre as resistências unitárias de atrito desenvolvidas no interior e exterior do amostrador (fator a).

6.1 Conclusões

Assim, com o desenvolvimento do presente trabalho, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- Os deslocamentos na base da composição de hastes, obtidos numericamente, apresentaram uma boa concordância com os deslocamentos obtidos a partir dos sinais obtidos experimentalmente por Moraes (2014) e Zapata (2015).
- O processo de transferência de energia em solos de alta resistência ocorre num intervalo de tempo menor, ocorrendo um menor número de impactos subsequentes para a cravação do amostrador no solo.
- O programa Abaqus/Explicit® fornece valores de resistência dinâmica do solo similares àqueles obtidos a partir da instrumentação na haste logo acima do amostrador.
- Os valores da força de reação dinâmica (R_D) obtida com os modelos numéricos sempre se apresentaram mais próximos dos valores experimentais do que dos valores teóricos.
- Os gráficos de comparação dos valores numéricos e experimentais das forças de reação dinâmica do solo (R_D) mostram uma boa concordância entre esses valores. Mostram também que ocorre um aumento gradual da diferença desses valores com a profundidade, ou seja, com o aumento da resistência do solo.
- A partir dos modelos numéricos, a eficiência foi calculada com Equação 2. 39, porém, utilizando a força de resistência dinâmica em vez da força de resistência estática.

- A eficiência média do equipamento calculada a partir dos modelos numéricos, apresentaram uma boa concordância com a eficiência determinada experimentalmente para o caso da FEAGRI-Unicamp. A eficiência média, determinada numericamente, foi de 63%, enquanto que a determinada experimentalmente foi de 65%. Já para o caso da EESC-USP, os valores encontrados não apresentaram uma boa concordância. A eficiência média, determinada numericamente, foi de 57%, enquanto que a determinada experimentalmente foi de 71%.
- Tal fato indica que, para o caso da FEAGRI-Unicamp, a resistência dinâmica experimental (R_D) é aproximadamente igual à resistência estática (R_S), visto que as forças atuantes no sistema solo-amostrador são não-conservativas (Aoki et al.,2007)
- Foi confirmado que a eficiência depende muito pouco do comprimento da composição de hastes, da mesma forma que concluíram Moraes (2014) e Zapata (2015).
- A correção da equação para a determinação de (R_S), incluindo a correção da energia proposta por Odebrecht (2003), se mostrou adequada para o caso da FEAGRI-Unicamp, encontrando valores de eficiência similares aos calculados com os dados experimentais.
- Os modelos numéricos mostraram o fenômeno de embuchamento para os solos de Campinas e São Carlos, para todas as profundidades. Moraes (2014) encontrou embuchamento na FEAGRI-Unicamp concordando o encontrado numericamente. Entretanto, Zapata (2015) somente encontrou ocorrência de embuchamento para as profundidades de 5 a 7 m.
- Os fatores de atrito (a) que relacionam as resistências unitárias de atrito interno e externo, obtidos com os modelos numéricos são todos maiores que a unidade, significando que resistências unitárias de atrito internas são maiores que as externas. Esse comportamento também foi observado por Moraes (2014) e Peixoto (2001) através de medições de torque no ensaio SPT. Zapata (2015) encontrou valores para os fatores de atrito muito próximos da unidade, e na maioria dos casos valores de resistências unitárias de atrito externas maiores que as internas. Os valores encontrados por Zapata (2015) foram obtidos a partir de um equipamento desenvolvido no seu trabalho.
- A interpretação do ensaio SPT com base no Princípio da Conservação de Energia (Princípio de Hamilton) e no equilíbrio das forças de reação no sistema solo-amostrador, possibilitaram a obtenção das resistências unitárias de atrito e ponta das camadas investigadas. Esta nova forma de interpretação, confere ao ensaio uma base científica, melhorando a sua credibilidade.

- A curva resultante da prova de carga dinâmica com energia crescente, modelada numericamente, é similar a uma curva de uma prova de carga estática com a possibilidade de extrapolação para determinação da ruptura. A curva é do tipo aberta sem caracterização de ruptura. Foi observado que a resistência mobilizada do solo para certa energia aplicada pode estar bem abaixo da ruptura e apenas representar um ponto na curva de resistência mobilizada *versus* deslocamento (Tsuha, Aoki e Cintra, 2013).
- Os valores de repique aumentam com a energia aplicada, mas somente até um certo nível, a partir do qual o valor do repique torna-se praticamente constante. A nega é quase nula para baixas energias, e aumenta com o aumento da energia, concordando com Aoki (1996).

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Aprimorar os modelos realizados com o programa Abaqus/Explicit®, utilizando ferramentas não usadas no presente trabalho. O software possui recursos adicionais de contato que estão disponíveis somente para modelos em três dimensões. Se recomenda a refazer as modelagens do presente trabalho, em três dimensões, utilizando esses recursos adicionais, e fazer comparações.
- Encontrar uma técnica numérica para permitir uma melhor atualização da malha de elementos finitos. Apesar de conseguir utilizar a ferramenta ALE oferecida por Abaqus/Explicit® para penetrações do amostrador excessivamente grandes, as deformações nos elementos finitos poderiam ser minimizadas, melhorando os resultados obtidos.
- Se poderia fazer uma melhor simulação do ensaio SPT, usando modelos em três dimensões, para talvez conseguir simular vários golpes na mesma profundidade e não só um como foi realizado no presente trabalho.
- Realizar simulações com diferentes modelos constitutivos e fazer comparações para definir qual se adequa melhor com o comportamento do solo no ensaio SPT.
- Realizar provas de carga dinâmicas com o amostrador SPT, com energia crescente, ou seja, variando a altura de queda do martelo para confirmar o comportamento da curva obtida a partir das simulações numéricas.
- Estimar resistências unitárias de atrito externas e/ou internas que se desenvolvem entre o solo e o amostrador durante sua cravação, a partir de diferentes metodologias como ensaios

SPT-T, ensaios de arrancamento do amostrador após a sua cravação no solo, etc., e comparar os resultados com resultados obtidos a partir de modelos numéricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society for Testing and Materials. (1958). D1586: *Standard Test Method for Penetration Test and Split-Barrel Sampling of Soils*. West Conshohocken, PA: Autor.
- American Society for Testing and Materials. (1963). D1586: *Standard Test Method for Penetration Test and Split-Barrel Sampling of Soils*. West Conshohocken, PA: Autor.
- American Society for Testing and Materials. (2010). *D4633: Standard test method for energy measurement for dynamic penetrometers*. West Conshohocken, PA: Autor.
- Aoki, N. (1989). A new dynamic load test concept. In *XII International conference on soil mechanics and foundation engineering* (Vol. 14, pp. 1-4). Rio de Janeiro.
- Aoki, N. (1996). *Provas de carga dinâmica em estacas*. Notas de aula, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
- Aoki, N. (2013). Inovação no SPT. In J. C. Cintra, N. Aoki, C. d. Tsuha, & H. L. Giacheti, *Fundações ensaios estáticos e dinâmicos* (pp. 25-38). São Paulo: Oficina de textos.
- Aoki, N., & Cintra, J. C. (2000). The application of energy conservation Hamilton's principle to the determination of energy efficiency in SPT test. In *International conference on the application of stress wave theory to piles* (Vol. 6, pp. 457-460). São Paulo.
- Aoki, N., Esquivel, E. R., Neves, L. F., & Cintra, J. C. (2007). The impact efficiency obtained from static load test performed on the SPT sampler. *Soils and Foundation*, 47, 1045-1052.
- Associação Brasileira de normas técnicas. (2001). *NBR 6484: Solo: Sondagem de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio*. Rio de Janeiro: Autor.
- Associação Brasileira de normas técnicas. (2007). *NBR 13208: Estacas, ensaio de carregamento dinâmico, método de ensaio*. Rio de Janeiro: Autor.
- Belincanta, A. (1985). *Energia dinâmica no SPT - Resultados de uma investigação teórico experimental*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Belincanta, A. (1998). *Avaliação de fatores intervenientes no índice de resistência à penetração do SPT*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
- Bortolucci, A. (1983). *Caracterização geológico-geotécnica da região urbana de São Carlos, a partir de sondagens de simples reconhecimento*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

- Cavalcante, E. H. (2002). *Investigação teórico-experimental sobre o SPT*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Cavalcante, E. H., Giacheti, H. L., Danzinger, F. A., & Coutinho, R. Q. (2006). Campos experimentais brasileiros. In *XIII Congresso Brasileiro de mecânica dos solos e engenharia geotécnica e III Congresso Luso-Brasileiro de geotecnia*. Curitiba.
- Dassault Systèmes. (2014). *Abaqus 6.14 Online Documentation*. Recuperado em 12 de outubro de 2015, de <http://129.97.46.200:2080/v6.14/books/usb/default.htm>
- Durgunoglu, H. T., & Mitchell, J. K. (1975). Static penetration resistance of soils: I. Analysis. In *Proceedings of the conference on In Situ measurement of soil properties* (Vol. 1, pp. 151-171). New York: ASCE.
- Fletcher, G. F. (1965). Standard penetration test: its uses and abuses. *Journal of soil mechanics and foundation division - ASCE*, 91(SM4), 67-75.
- Ghilardi, P. M. (2005). *Comparação entre desempenhos de estacas metálicas tubadas de ponta aberta e fechada na baixada santista*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Giacheti, H. L. (1991). *Estudos experimental de parâmetros dinâmicos de alguns solos tropicais do estado de São Paulo*. Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
- Giacheti, H. L. (2001). *Os ensaios de campo na investigação do subsolo: estudo e considerações quanto à aplicação em solos tropicais*. Tese de Livre Docência, Faculdade de Engenharia, Universidade estadual Paulista, Bauru, SP.
- Giacheti, H. L., & De Mio, G. (2008). Seismic cone penetration tests on tropical soils and the ratio G_0/q_c . In *3rd International conference on site characterization* (Vol. 3, pp. 1289-1295). Londres: Taylor e Francis Group.
- Grabe, J., Henke, S., Pucker, T., & Hamann, T. (2013). CEL: Simulations for soil plugging, screwed pile installation and deep vibration compaction. In *Proceedings of the International Conference on Installation Effects in Geotechnical Engineering* (pp. 118-127). Londres: Hicks et al.
- Hibbit, K., & Sorensen, I. (2000). *ABAQUS/Explicit User's Manual* (pp. 1-1306). Estados unidos.
- Jassim, I., Coetzee, C., & Vermeer, P. (2013). A dynamic material point method for geomechanics. In *Proceedings of the International Conference on Installation Effects in Geotechnical Engineering* (pp. 15-23). Londres: Hicks et al.

- Lobo, B. d. (2009). *Mecanismo de penetração dinâmica em solos granulares*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Lukiantchuki, J. A. (2012). *Interpretação de resultados do ensaio SPT com base em instrumentação dinâmica*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
- Lukiantchuki, J. A., Bernardes, G. P., & Esquivel, E. R. (2012). Experimental soil dynamic force: an improvement of standard penetration test (SPT) interpretation. In *4th International conference on geotechnical and geophysical site characterization* (pp. 865-872). Porto de Galinhas, PE: Coutinho & Mayne.
- Machado, S. (1998). *Aplicação de conceitos de elastoplasticidade a solos não saturados*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
- Mohr, H. A. (1966). Discussion of standard penetration test: its uses and abuses. *Journal of the soil mechanics and foundation division - ASCE*, Vol. 92 (SM1),196-199.
- Moraes, L. S. (2005). *Prova de carga dinâmica em placa*. Dissertação de Mestrado, Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
- Morais, T. d. (2014). *Interpretação racional de resultados de ensaios SPT com base em conceitos de energia*. Dissertação de Mestrado, Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
- Neves, L. F. (2004). *Metodologia para a determinação da eficiência do ensaio SPT através de prova de carga estática sobre o amostrador padrão*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidad de São Paulo, São Carlos, SP.
- Noreña, P. (2011). *Estimativa da eficiência do ensaio SPT através da execução da prova de carga estática sobre o amostrador*. Dissertação de Mestrado, Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
- Odebrecht, E. (2003). *Medidas de energia no ensaio SPT*. Tese de Doutorado, Universidade federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Odebrecht, E., Schnaid, F., Rocha, M. M., & Bernardes, G. P. (2004). Energy measurements for standard penetration tests and the effects of the length of rods. In *Proceedings of the International Conference on site characterization* (Vol. 1, pp. 351-358). Porto, Portugal.

- Odebrecht, E., Schnaid, F., Rocha, M. M., & Bernardes, G. P. (2005). Energy efficiency for standard penetration tests. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* - ASCE, 131(10), 1252-1263.
- Peixoto, A. S. (2001). *Estudo do ensaio SPT-T e sua aplicação na prática de engenharia de fundações*. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.
- Schnaid, F., & Odebrecht, E. (2012). SPT (Standard Penetration Test). In *Ensaaios de campo e suas aplicações à engenharia de Fundações* (pp.23-61). São Paulo: Oficina de Textos.
- Schnaid, F., Odebrecht, E., Rocha, M. M., & Bernardes, G. P. (2009). Prediction of soil properties from the concepts of energy transfer in dynamic penetration test. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering- ASCE*, 135(8), 1092-1100.
- Smith, E. (1960). Pile-driving analysis by the wave equation. *Journal of the soil mechanics and foundation division - ASCE*, 86 (SM4), 25-61.
- Susila, E., & Hryciw, R. (2003). Large displacement FEM modelling of the cone penetration test (CPT) in normally consolidated sand. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 27, 585-602. DOI: 10.1002/nag.287.
- Sy, A., & Campanella, R. G. (1991). Wave equation modelling of the SPT. In *Proceedings, ASCE Geotechnical Engineering Congress* (Vol. 1 (27), pp. 225-240). Boulder, CO.
- Tsuha, C. d., Aoki, N., & Cintra, J. C. (2013). Prova de carga dinâmica. In J. C. Cintra, N. Aoki, C. d. Tsuha, & H. L. Giacheti, *Fundações ensaios estáticos e dinâmicos* (1a ed., pp. 97-133). São Paulo: Oficina de Textos.
- Van, L. B. (1997). Towards the ultimate conservative difference scheme IV. A new approach to numerical convection. *Journal of Computational physics*, 23, 276-299.
- Zapata, J. (2015). *Estimativa das tensões internas e externas atuantes no amostrador SPT durante sua cravação*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

APÊNDICE A- Roteiro de utilização do programa Abaqus/Explicit para simular numericamente o processo de cravação do amostrador SPT no solo.



Desenhar as partes

O modelo numérico está constituído por três partes principais que deverão ser criadas no programa. Conforme mostrado na Figura 4.1, que indica a geometria do modelo, essas três partes são: o martelo, o conjunto cabeça de bater - composição de hastes - amostrador e o solo.

Para criar a primeira parte, selecione a opção *Create* no menu *Part*, que pertence ao módulo *Part*. Na caixa de diálogo, indique que a parte vai ser **axissimétrica** do tipo **deformável**. A parte será desenhada usando o recurso **shell**. Após clicar em continuar, se torna visível a janela de desenho, aqui, com ajuda do botão *Create lines: Connected* disponível na barra de ferramentas da esquerda, desenhar qualquer uma das partes, por exemplo, o martelo. Após concluir o desenho, clicar na parte inferior da janela no botão *Done*.

Repetir o procedimento anterior para as outras duas partes.



Criar os materiais

Devem ser criados dois materiais, um deles com as propriedades do aço e o outro com as do solo. Para isso, no módulo *Property*, selecione a opção *Create* no menu *Material*.

Para o caso do aço, atribua a densidade do material em *Mass Density*, disponível na opção *Density* do menu *General*. Atribua também o módulo de elasticidade em *Young's Modulus* e o coeficiente de Poisson em *Poisson's Ratio*. Esses parâmetros se encontram na opção *Elasticity (Elastic)* do menu *Mechanical*. Salvar o material, clicando no botão *OK*.

Para o caso do solo, além da densidade, módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, atribua também o ângulo de atrito em *Friction Angle* (na aba *Plasticity*) e a coesão em *Cohesion Yield Stress* (na aba *Cohesion*), disponível na opção *Plasticity (Mohr Coulomb Plasticity)* do menu *Mechanical*. Salvar o material, clicando no botão *OK*.



Criar as seções

Para atribuir os materiais às partes que fazem parte do modelo numérico, deve ser criada uma seção para cada um dos materiais.

Para isso, ainda no modulo *Property*, selecione a opção *Create* no menu *Section*. As seções devem ser **solidas** do tipo **homogêneas**. Depois de clicar no botão *Continue...* para o caso do aço escolher o material criado anteriormente com as suas propriedades. Clicar no botão *OK*.

Realizar o mesmo procedimento escolhendo como material aquele criado com as propriedades do solo para atribuir essa seção à parte que vai representa-lo.

Ainda no modulo *Property*, para cada uma das partes, selecione a opção *Section* no menu *Assign*. Clicar dentro da região da parte e aceitar no botão *Done* que aparece na parte inferior da tela. Na caixa de diálogo escolher a seção correspondente a essa parte e clicar no botão *OK*. Realizar o mesmo procedimento com as outras duas partes. Agora cada parte tem um material atribuído.



Malha

Agora, gere a malha de elementos finitos. Para isso, no modulo *Mesh*, selecione a opção *Part* no menu *Seed*. Na caixa de diálogo, escreva o tamanho aproximado dos elementos finitos em *Approximate global size*. Clique no botão *Apply* e a seguir no botão *OK*.

Selecione a opção *Part...* no menu *Mesh*, e na parte inferior da tela clique no botão *Yes*. Após uns segundos aparecerá a malha de elementos finitos na parte escolhida. Realizar o mesmo procedimento para as outras duas partes.



Criar o modelo

Já criadas as partes com as suas respectivas propriedades é necessário fazer uma montagem de todas elas para formar o modelo. No modulo *Assembly*, selecione a opção *Create...* no menu *Instance*. Na caixa de diálogo, ative a opção *Auto-offset from other instances*. Selecione uma das partes, e clique no botão *Apply*. Fazer o mesmo procedimento para as outras duas partes. Para sair da caixa de diálogo, clique no botão *Cancel*.


Na tela principal do programa, devem aparecer as três partes, agora elas devem ser colocadas no seu respectivo lugar. Inicialmente vai ser movimentada a parte que representa o solo. Selecione a opção *Translate* no menu *Instance*. Agora selecione o solo e clique do botão *Done* que aparece na barra inferior do programa. Escolha como ponto inicial, aquele na esquina inferior esquerda do solo, e como ponto final a coordenada 0, 0, 0. Clique no botão *OK* para aceitar a nova posição do solo.

Repetindo o procedimento anterior, deve ser movimentada a parte que contém o amostrador, fazendo coincidir os pontos pertencentes à ponta do amostrador, com os pontos do solo onde deve estar encostado o amostrador.


Finalmente o martelo deve ser posicionado muito próximo da cabeça de bater. Nos modelos usados nesse trabalho, o martelo sempre foi colocado a uma distância de 0.0001 metros acima da cabeça de bater.



Interações

No módulo *Interaction*, selecione a opção *Create...* no menu *Interaction*. Selecione o tipo de interação *Surface-to-surface contact (Explicit)*. Na caixa de diálogo, selecione como primeira superfície a linha que representa a parte inferior do martelo, e como segunda superfície a linha que representa a parte superior da cabeça de bater. Selecione *Kinematic contact method* e *Finite sliding* como método de formulação. Na opção *Contact interaction property*, clique no botão *Create interaction Property* .

Selecione *Contact* como tipo de interação. Na caixa de diálogo, selecione a opção *Normal Behavior* no menu *Mechanical*. Deixe selecionadas as opções que o programa tem como padrão, “*Hard*” *Contact, Default* e marcada a opção *Allow separation after contact*. Clique no botão *OK*. Confira que em *Contact interaction property* apareça a propriedade que criou anteriormente. Clique no botão *OK*.

Selecione novamente a opção *Create...* no menu *Interaction*. Selecione o tipo de interação *Surface-to-surface contact (Explicit)*. Na caixa de diálogo, selecione como primeira superfície as linhas que representam a superfície externa, a ponta e interna do amostrador, a qual vai fazer contato com o solo, e como segunda superfície as linhas do solo que estarão em contato com o amostrador. Selecione *Penalty contact method* e *Finite sliding* como método de formulação. Na opção *Contact interaction property*, clique no botão *Create interaction Property* .

Selecione *Contact* como tipo de interação. Na caixa de diálogo, selecione a opção *Normal Behavior* no menu *Mechanical*. Deixe selecionadas as opções que o programa tem como padrão, “*Hard*” *Contact, Default* e marcada a opção *Allow separation after contact*. Selecione a opção *Tangential Behavior* no menu *Mechanical*. Em *Friction formulation* selecione a opção *Penalty*. Atribua a relação entre o ângulo de atrito da interface (δ) e o ângulo de atrito interno do solo em *Friction Coeff*. Clique no botão *OK*. Confira que em *Contact interaction property* apareça a propriedade que criou anteriormente. Clique no botão *OK*.



Condições de contorno

No módulo *Load*, selecione a opção *Create...* no menu *BC*. Selecione *Displacement/Rotation* como tipo de condição. Clique na linha vertical esquerda da parte que representa o solo, e após no botão *Done*. Ative as opções *U1* e *UR3* para permitir deslocamentos só na direção vertical. Clique no botão *OK*.

De novo selecione a opção *Create...* no menu *BC*. Selecione *Displacement/Rotation* como tipo de condição. Clique na linha vertical direita e na linha inferior da parte que representa o solo, e após no botão *Done*. Para selecionar as duas linhas mantenha apertado o botão *Shift* do seu teclado. Ative as opções *U1*, *U2* e *UR3* para impedir deslocamentos em todas as direções. Clique no botão *OK*.



Condições iniciais

Ainda no módulo *Load*, selecione a opção *Create...* no menu *Predefined Field*. Selecione *Geostatic stress* como tipo de condição inicial, clique no botão *Continue...* Clique em cima da parte que representa o solo e depois no botão *Done*. Na caixa de texto, *Vertical coordinate 1* é a altura total da parte que representa o solo indicando a coordenada vertical na parte superior do solo, e *Vertical coordinate 2* é zero indicando a coordenada vertical na parte inferior do solo. *Stress magnitude 1* e *2* são as tensões verticais atuando no solo nas coordenadas 1 e 2 respectivamente. O coeficiente de empuxo em repouso é atribuído em *Lateral coefficient 1*. Clicar no botão *OK*.

De novo selecione a opção *Create...* no menu *Predefined Field*. Selecione *Velocity* como tipo de condição inicial, clique no botão *Continue...* Clique em cima da parte que representa o martelo e depois no botão *Done*. Na caixa de texto, atribua a velocidade com que o martelo impacta a cabeça de bater em *V2*. Essa velocidade deve ser negativa indicando o movimento na direção negativa do eixo vertical.



Criar Step

No módulo *Step*, selecione a opção *Create...* no menu *Step*. Selecione o tipo de procedimento como *General* e procure na lista inferior a análise *Dynamic, Explicit*, clique no botão *Continue...* Na caixa de diálogo, especifique o tempo total que vai ser simulado em *Time period*. Na aba *Incrementation* ativar o tipo de incremento *Fixed*. Especifique em *User-defined time increment* cada quanto tempo vai ser realizado um incremento pelo programa. Clique no botão *OK*.



Cargas

No módulo *Load*, selecione a opção *Create...* no menu *Load*. Confira que esteja selecionado o step que foi criado no procedimento anterior. Selecione da categoria *Mechanical*, a carga *Gravity*, clique no botão *Continue....* Em *Component 2* atribua o valor da força da gravidade (-9,81m/s). Clique no botão *OK*.

Selecione novamente a opção *Create...* no menu *Load*. Confira que esteja selecionado o Step que contém a análise dinâmica. Selecione da categoria *Mechanical*, a carga *Pressure*, clique no botão *Continue....* Clique na linha horizontal superior na parte que representa o solo no modelo e depois no botão *Done*. Em *Magnitude* atribua o valor da tensão vertical atuando no solo nessa profundidade, deve ser o mesmo valor atribuído nas condições iniciais em *Stress magnitude 1*. Clique no botão *OK*.

Atualização da malha

No módulo *Step*, selecione a opção *ALE Adaptive Mesh Controls (Create...)* no menu *Other*. De um nome para os controles de atualização de malha e clique no botão *Continue....* Na caixa de diálogo somente conferir que esteja ativada a opção *Preserve initial mesh grading* em *Priority* e também a opção *Second order* em *Advection*. Clique no botão *OK*.

Selecione a opção *ALE Adaptive Mesh Domain (Edit)* no menu *Other*. Ative a opção *Use the ALE adaptive mesh domain below*. Como região selecione a parte que representa o solo no modelo. Ative a opção *ALE Adaptive Mesh Controls*, deve aparecer os controles criados no procedimento anterior. Assumir a **frequência** como 1 para realizar atualização de malha em todos os intervalos de tempo. Clique no botão *OK*.



Calcular

No módulo *Job*, selecione a opção *Create...* no menu *Job*. Atribua um nome para a sua análise e clique no botão *Continue....* Só clicar no botão *OK*.

Selecione a opção *Manager...* no menu *Job*. Clicar no botão *Submit*. Quando finalizarem os cálculos, clicar no botão *Results*.