

**USP**

**Campus de São Carlos**

**AValiação GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA DE  
TERRENOS SUJEITOS A PROBLEMAS CÁRSTICOS**

**AUTOR: KURT JOÃO ALBRECHT**

**ORIENTADOR: PROF. DR. LÁZARO VALENTIN ZUQUETTE**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**



**ESCOLA DE ENGENHARIA  
DE SÃO CARLOS**

70175198

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA**



***AVALIAÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA  
DE TERRENOS SUJEITOS  
A PROBLEMAS CÂRSTICOS***

**KURT JOÃO ALBRECHT**

DEDALUS - Acervo - EESC



31100013470

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

Orientador: Prof. Dr. LÁZARO V. ZUQUETTE

SÃO CARLOS  
1998

Class.	TESE
Cutl.	0206
Totale	T0175198

st 0979187

Albrecht, Kurt João

A341a Avaliação geológica-geotécnica de terrenos sujeitos a problemas cársticos. Kurt João Albrecht. São Carlos, SP. 1998

Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos  
Universidade de São Paulo, 1998

Orientador: Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette

1. Geologia de Engenharia 2. Mapeamento Geotécnico 3. Carste

*AO MEU PAI, ADOLFO  
A MINHA MÃE, ALVINE  
A MINHA ESPOSA, JOANA  
AOS NOSSOS FILHOS, TIAGO, CLARISSA E MARIA CECÍLIA*

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Lázaro Valentin Zuquette, expresso especial gratidão ao grande apoio, amizade, e ensinamentos recebidos durante a realização deste trabalho.

A Universidade Federal de Mato Grosso, através do Departamento de Geologia Geral pela oportunidade concedida.

A Universidade de São Paulo, através do Departamento de Geotecnia pela participação no Programa de Pós-graduação, bem como aos Professores pelos conhecimentos transmitidos.

Ao programa CAPES/PICD pela concessão da bolsa de estudos.

A Prefeitura Municipal de Nobres, estado de Mato Grosso pelo apoio logístico em uma das etapas de campo.

Ao geólogo Valter Alves dos Santos, pela colaboração e que muito contribui no desenvolvimento dos trabalhos de campo.

Ao técnico Alexandrino Leite do Nascimento, bem como aos então alunos do curso de Geologia/UFMT: Jacques Pereira Arantes, João Broggi, Franco Weber, Celso Maciel e Ricardo Albernaz e Wilson Tibes Pisani que constituíram a equipe de apoio durante os trabalhos do levantamento gravimétrico.

Ao Técnico Dr. Herivelto Moreira dos Santos, pelo constante apoio e dedicação ao suporte de hardware e software.

Aos colegas do curso de Pós-graduação em Geotecnia que compartilharam esta etapa na vida, em especial: Ronaldo Lima Gomes, Luis Nishiyama, Rosana Cristina Grecchi, Eduardo Collares, Berenice Bitencourt, Maria Leticia Bachion, Abdelmajidi Hach Hach, Rene Levi Aguiar, Marcos Malta, Benedito Imbiriba Carneiro, Paulo Cesar Burgos e Wilson Conciani.

A UNESP, na pessoa do Prof. Dr. Walter Mallagutti Filho, pelo apoio à interpretação dos dados gravimétricos.

## SUMÁRIO

### LISTA DE FIGURAS

### LISTA DE TABELAS

### RESUMO

### ABSTRACT

## I – INTRODUÇÃO

- |                          |    |
|--------------------------|----|
| 1.1 Considerações gerais | 01 |
| 1.2 Objetivos            | 02 |

## II – CARSTE: CONCEITOS, FEIÇÕES E FORMAS DE RELEVO

- |   |    |
|---|----|
| 2.1 A Origem do Termo <i>karst</i>                    | 04 |
| 2.2 Definição de Carste                               | 06 |
| 2.3 Terminologias Associadas ao Carste                | 07 |
| 2.4 Feições e Relevos Cársticos                       | 10 |
| 2.4.1 Feições do Exocarste                            | 11 |
| 2.4.1.1 Solo Residual Argiloso ( <i>Terra Rossa</i> ) | 11 |
| 2.4.1.2 Lapiás  | 12 |
| 2.4.1.3 Fatores que influenciam nas Formas dos Lapiás | 12 |
| 2.4.1.4 Classificação dos Lapiás                      | 13 |
| 2.4.2 Feições do Endocarste                           | 20 |
| 2.4.3 Relevos Cársticos – <i>Landforms</i>            | 22 |
| 2.4.3.1 Campos de Lapiás                              | 22 |
| 2.4.3.2 Dolinas                                       | 23 |
| 2.4.3.3 Classificação Genética das Dolinas            | 24 |
| 2.4.3.4 Classificação Morfométrica das Dolinas        | 27 |
| 2.4.3.5 Sumidouros                                    | 28 |
| 2.4.3.6 Úvalas  | 28 |
| 2.4.3.7 Poljés  | 29 |
| 2.4.3.8 Cânions Cársticos                             | 31 |
| 2.4.3.9 Fluviocarste                                  | 32 |
| 2.4.3.10 Carste Poligonal                             | 33 |

## III - ROCHAS CARSTIFICÁVEIS

- |  |    |
|--|----|
| 3.1 Considerações Gerais               | 35 |
| 3.2 Componentes Físicos dos Carbonatos | 36 |
| 3.2.1 Grãos                            | 37 |
| 3.2.2 Matriz                           | 39 |
| 3.2.3 Cimento                          | 39 |
| 3.2.4 Poros                            | 40 |
| 3.2.4.1 Morfologia dos Poros           | 41 |
| 3.2.4.2 Classificação dos Poros        | 41 |
| 3.3 Minerais de Rochas Carbonáticas    | 45 |
| 3.3.1 Calcita e Aragonita              | 46 |

3.3.2 Dolomita	47
3.3.3 Siderita e Ankerita	48
3.3.4 Minerais Não Carbonáticos	48
3.4 Estruturas das Rochas Carbonáticas	49
3.4.1 Classificação das Estruturas Primárias	50
3.4.1.1 Estruturas Pré-deposicionais	50
3.4.1.2 Estruturas Sindeposicionais	50
3.4.1.3 Estruturas Biogênicas	52
3.4.2 Classificação das Estruturas Secundárias	55
3.4.2.1 Estruturas Sedimentares Químicas	55
3.4.2.2 Estruturas Secundárias Inorgânicas	58
3.5 Classificação das Rochas Carbonáticas	59
3.6 Classificação Geotécnica dos Carbonatos	68

#### **IV – PROCESSOS DE CARSTIFICAÇÃO**

4.1 Fenômenos cársticos	70
4.1.1 Processos Químicos	70
4.1.2 Processos Mecânicos	72
4.2 Considerações sobre Rochas Carbonáticas Carstificáveis	72
4.2.1 Calcários	72
4.2.2 Dolomitos	74
4.2.2.1 Dolomitos Primários	74
4.2.2.2 Dolomitos Secundários	75
4.2.2.3 Evaporitos	78

#### **V - PROBLEMAS AMBIENTAIS E GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS**

5.1 Reconhecimento dos Problemas Cársticos	80
5.2 Problemas Ambientais Causados pela Atividade Antrópica	81
5.2.1 Atividades da construção civil	82
5.2.2 Pedreiras	83
5.2.3 Vibrações	84
5.2.4 Desmatamento	85
5.2.5 Atividades turísticas	86
5.2.6 Inundações	87
5.2.7 Exploração das Águas Subterrâneas	87
5.2.8 Disposição de Rejeitos	92
5.3 Engenharia de Fundações	94
5.3.1 Investigação do Terreno Cárstico para Implantação de Fundações	94
5.3.2 Problemas e Técnicas de Estabilização do Terreno Cárstico frente à Engenharia de Fundações	97
5.3.3 Casos Históricos	100
5.4 Exemplos Esquemáticos de Técnicas Corretivas	103
5.5 Estradas	107
5.5.1 Considerações Sobre um Projeto de Estradas	107

#### **VI – ASPECTOS DO PANORAMA CÁRSTICO MUNDIAL**

6.1 Considerações Gerais	110
6.2 Exemplos Mundiais de Áreas Cársticas	111

<b>VII - OS TERRENOS CARBONÁTICOS NO BRASIL</b>	
7.1. Ocorrências de Rochas Carbonáticas no Brasil	117
7.2. Trabalhos Sistemáticos sobre Carste no Brasil	122
7.3. Descrição dos Principais Trabalhos Realizados em Cidades Brasileiras com Problemas Cársticos	124
<b>VIII - MÉTODOS DE INVESTIGAÇÃO INDIRETA</b>	
8.1. Uso de Sensores Remotos	127
8.2. Prospecção Geofísica	130
<b>IX - ESTUDO DE CASO: NOBRES, MATO GROSSO</b>	
9.1 Histórico	138
9.2 Localização Geográfica	139
9.3 Considerações Sócio-econômicas do Município	140
9.4 Metodologia	141
9.4.1 Levantamento Bibliográfico	141
9.4.2 Sensoriamento Remoto	141
9.4.3 Atividades de Campo	143
9.4.4 Análise dos Dados	144
9.5 Caracterização do Meio Físico Regional	144
9.5.1 Clima	144
9.5.2 Vegetação	144
9.5.3 Hidrografia	144
9.5.4 Geomorfologia	145
9.5.5 Cronoestratigrafia	146
9.5.6 Estruturas Geológicas Regionais	151
9.5.6.1 As Grandes Estruturas da Faixa de Dobramentos	151
9.5.6.2 As Fases de Deformação Tectônica da Faixa Paraguai	152
9.5.6.3 Evolução da Geologia Estrutural Regional	156
9.5.6.4 Evolução do Arcabouço Geológico Regional	156
9.6 Caracterização do Meio Físico Urbano - Nobres/MT	157
9.6.1 Considerações Gerais	157
9.6.2 Substrato Rochoso – Estratigrafia	158
9.6.2.1 Formação Araras	158
9.6.2.2 Formação Raizama	162
9.6.3 Materiais Inconsolidados	164
9.6.4 Substrato Rochoso - Geologia Estrutural	164
9.6.5 Geomorfologia Cárstica	167
9.7 Problemas Geológico-Geotécnicos	170
9.8 Investigação Geofísica na Área Urbana de Nobres, MT	175
9.9 Modelo Cárstico	180
9.10 Potencialidade de Carstificação dos Terrenos	181
<b>X - PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO DE TERRENOS CÁRSTICOS</b>	
10.1 Etapas de Investigação em Terrenos Cársticos	184

10.2	Descrição das Etapas de Investigação	186
10.2.1	Informações Técnicas	186
10.2.2	Análise de Sensores Remotos	190
10.2.3	Atividades de Campo	193
10.3	Modelo Cárstico	198
10.4	Zoneamento de Áreas Potenciais a Ocorrência de Eventos	199
10.5	Análise de custos	199
10.6	Estabilização do Terreno e Monitoramentos	200
<b>XI- CONCLUSÕES</b>		
11.1	Sobre o Tema	201
11.2	Sobre a Área de Estudo	201
<b>XII - CITAÇÕES BIBLIOGRÁFICAS</b>		203

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Região de origem do termo <i>karst</i> , GAMS, 1993	05
FIGURA 2 - Perfil esquemático do carste autigênico (Tipo A), JACKUS, 1977	09
FIGURA 3 - Perfis esquemáticos das variações evolutivas de carste alogênico (Tipo B) JACKUS, 1977	09
FIGURA 4 - Perfil esquemático de um carste <i>Tipo-B</i> desenvolvido a partir de um carste tipo-A com cobertura de materiais inconsolidados, JACKUS, 1977	10
FIGURA 5 - Esquemática dos tipos de lapiás do exocarste	14
FIGURA 6 - Fotografia de lapiás acanalado em Ubajara, CE	15
FIGURA 7 - Blocos suspensos originados pela dissolução química da rocha, BÖGLI (1980)	17
FIGURA 8 - Fotografia de blocos suspensos originados pela dissolução da rocha ao longo de planos de fraturas, Ubajara (CE)	16
FIGURA 9 - Representação esquemática da origem evolutiva dos lapiás em agulhas, segundo ALLEN (1984)	18
FIGURA 10 - Estágio inicial de dissolução dos lapiás em agulhas	19
FIGURA 11 - Campo de lapiás em agulhas em avançado estágio de carstificação	19
FIGURA 12 - Fotografia evidenciando a diferença entre lapiás reentrantes (feições de dissolução vertical), dos lapiás cavernosos (cavidades cilíndricas)	20
FIGURA 13 - Esquemática das feições do endocarste	20
FIGURA 14 - Representação dos tipos genéticos de dolinas	25
FIGURA 15 - Representação esquemática da evolução de dolinas induzidas a partir do rebaixamento do nível freático, NEWTON, 1987	25
FIGURA 16 - Representação planimétrica de uma dolina simétrica	27
FIGURA 17 - Representação planimétrica de dolinas assimétricas	27
FIGURA 18 - Seção esquemática de uma dolina aluvial assimétrica, JENNINGS, 1987	28
FIGURA 19 - Bloco diagrama demonstrando Úvalas que se formaram a partir da união de várias dolinas, DOLABELA, 1958	29
FIGURA 20 - Seções esquemáticas de vários tipos de poljés, JENNINGS, 1987	30
FIGURA 21 - Evolução de um Cânion, a partir de dolinas de colapso, JENNINGS, 1987	32
FIGURA 22 - Evolução de um carste poligonal a partir da drenagem fluvial	34
FIGURA 23 - Tipos de grãos das rochas carbonáticas, SELLEY, 1992	37

FIGURA 24 - Tipos de porosidade primária: (A) Porosidade intergranular; (B) Porosidade Intrapartículas	42
FIGURA 25 - Tipos de porosidade secundária, SELLEY (1992)	44
FIGURA 26 - Processos diagenéticos na formação dos principais minerais constituintes das rochas carbonáticas	47
FIGURA 27 - Tipos de origens do dolomito, PETTIJOHN (1957)	48
FIGURA 28 - Principais tipos de estratificações cruzadas, SUGUIO, 1973	52
FIGURA 29 - Características e evolução cárstica de um recife, JENNINGS (1987)	54
FIGURA 30 - Estilólitos e relações do volume dissolvido, SELLEY, 1992	56
FIGURA 31 - Classificação genética dos carbonatos, PETTIJOHN, 1957	60
FIGURA 32 - (a) Classificação petrográfica dos carbonatos conforme a porcentagem de argila e carbonatos; (b) Relação dos termos comercialmente conhecidos, PETTIJOHN, 1957	60
FIGURA 33 - Classificação dos carbonatos segundo a relação dos minerais calcita - dolomita, PETTIJOHN, 1957	61
FIGURA 34 - Classificação dos carbonatos segundo FOLK, 1959	63
FIGURA 35 - Nomenclatura das rochas carbonáticas segundo DUNHAM, 1962	65
FIGURA 36 - Classificação dos carbonatos segundo LEIGHTON & PENDEXTER, 1962	65
FIGURA 37 - Classificação das rochas carbonáticas segundo WRIGHT, 1992	66
FIGURA 38 - Classificação geotécnica dos carbonatos, RODRIGUES, 1988	69
FIGURA 39 - Exemplo do uso da classificação geotécnica das rochas carbonáticas segundo RODRIGUES, 1988	69
FIGURA 40 - Razões de dissolução de algumas rochas carbonáticas, MÁNDY, 1960	74
FIGURA 41 - Ilustração da dolomitização pelo processo de refluxo por infiltração SELLEY, 1992	76
FIGURA 42 - Razões de dissolução entre dolomito e vários calcários. Na abcissa está representado o volume de água que percolou sobre a superfície da rocha, MANDY (1954)	77
FIGURA 43 - Razões de solubilidade de vários tipos de dolomitos em água saturada de CO <sub>2</sub> da atmosfera em diferentes temperaturas. As linhas cheias representam a dissolução do CaCO <sub>3</sub> e as pontilhadas do MgCO <sub>3</sub> , MÁNDY, 1954	78
FIGURA 44 - Solubilidade da Gipsita e Anidrita em função da temperatura, JAKUCS, 1977	79
FIGURA 45 - Seções esquemáticas do terreno apresentando o rebaixamento do nível freático com conseqüente formação de dolinas, NEWTON, 1987	89
FIGURA 46 - Seções esquemáticas apresentando o rebaixamento do nível potenciométrico com conseqüente formação de dolinas	90

FIGURA 47 - Zoneamento Geológico-geotécnico de terrenos cársticos, WALTHAM & SMART, 1988	95
FIGURA 48 - Exemplos esquemáticos de tratamentos adotados em áreas cársticas para fins da engenharia de fundações, SOWERS, 1984	104
FIGURA 49 - Número de acidentes naturais no período de 1970-1989	115
FIGURA 50 - Perdas econômicas e asseguradas causadas por desastres naturais no período de 1970-1989	116
FIGURA 51 - Principais unidades geológicas constituídas parcialmente por carbonato. Mapa do Brasil 1:2.500.000	119
FIGURA 52 - Números de Municípios com ocorrências de EVAPORITOS por Unidades de Federação	120
FIGURA 53 - Números de Municípios com ocorrências de MÁRMORES por Unidades de Federação	121
FIGURA 54 - Números de Municípios com ocorrências de DOLOMITOS por Unidade de Federação	121
FIGURA 55 - Números de Municípios com ocorrências de CALCÁRIOS por Unidade de Federação	121
FIGURA 56 - Volume das reservas brasileiras de rochas carbonáticas por Unidade de Federação. Fonte: DNPM, 1991	122
FIGURA 57 - Mapa de Localização do Estado de Mato Grosso, e do perímetro urbano de Nobres, MT	139
FIGURA 58 - Fotografia aérea das características geomorfológicas regionais	145
FIGURA 59 - Coluna Estratigráfica esquemática do Cinturão Paraguai em Mato Grosso, ALVARENGA (1988)	146
FIGURA 60 - Áreas de ocorrências das unidades geológicas da região de Nobres, MT	147
FIGURA 61 - A Faixa Paraguai e suas Coberturas Cratônicas Adjacentes ALVARENGA & TROMPETTE, 1993	153
FIGURA 62 - Estruturas sedimentares das rochas carbonáticas	159
FIGURA 63 - Petrografia microscópica dos dolomitos da área urbana de Nobres, MT	160
FIGURA 64 - Fotografia da estratificação, tipo tabular, com dimensões métricas	163
FIGURA 65 - Fotografia da estratificação plano-paralela no topo da Formação Raizama, localmente situada sobre o eixo da Sinclinal de Nobres	163
FIGURA 66 - Representação esquemática dos tipos de falhas de rasgamento	165
FIGURA 67 - Diagramas das estruturas de acamamento (A), e de fraturas (B)	166
FIGURA 68 - Fraturamentos relacionados a fase de deformação D <sub>2</sub>	166
FIGURA 69 - Lapiás de descontinuidade ao longo dos planos de fraturas verticais.	168
FIGURA 70 - Feições do tipo Cunhas de solo ( <i>terra rossa</i> ). Esta figura também ilustra o comportamento do topo do substrato rochoso	169

FIGURA 71 - Lapiás colunares expostos em taludes de encostas pelos processos erosivos.	169
FIGURA 72 - Colapsos do tipo da Classe 1	171
FIGURA 73 - Colapsos do tipo da classe 2	171
FIGURA 74- Colapsos do tipo da classe 3	172
FIGURA 75 - Colapsos do tipo da classe 3	172
FIGURA 76 - Exemplos de trincas nas edificações afetadas por colapso	173
FIGURA 77 - Aparecimento de trincas após a ocorrência de colapsos, confirmando o processo de subsidência	173
FIGURA 78 - Fendas provocadas por colapso - leito da BR 163/364	173
FIGURA 79 – Perfil Gravimétrico – Linha 3	176
FIGURA 80 - Perfil Gravimétrico – Linha 4	176
FIGURA 81 - Perfil Gravimétrico – Linha 5	176
FIGURA 82 - Perfil Gravimétrico – Linha 6	177
FIGURA 83 - Perfil Gravimétrico – Linha 7	177
FIGURA 84 - Perfil Gravimétrico – Linha 8	177
FIGURA 85 - Perfil Gravimétrico – Linha 9	178
FIGURA 86 - Perfil Gravimétrico – Linha 1	179
FIGURA 87 - Perfil Gravimétrico – Linha 2	179
FIGURA 88 – Modelo esquemático do Carste de Nobres, mostrando as formas de relevo, feições de dissolução e o arcabouço geológico	182
FIGURA 89 – Fluxograma para Avaliação do Terreno em Escala Regional	187
FIGURA 90 – Fluxograma para Avaliação de Áreas Urbanas e Específicas	188

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Classificação dos sedimentos autóctones	36
TABELA 2 - Principais componentes das rochas carbonáticas	36
TABELA 3 - Principais organismos formadores de rocha carbonática e sua respectiva mineralogia	38
TABELA 4 – Terminologias adotadas para cimento e matriz	40
TABELA 5 - Classificação dos tipos de porosidade	42
TABELA 6 - Efeitos da diagênese sobre a porosidade das rochas carbonáticas	43
TABELA 7 - Minerais constituintes das rochas carbonáticas	45
TABELA 8 - Critérios de distinção entre calcários alóctones e autóctones, PETTIJOHN (1957)	46
TABELA 9 - Classificação das rochas carbonáticas, segundo DUNHAM (1962)	62
TABELA 10 - Nomenclatura dos carbonatos de acordo com a porcentagem e tipo de grãos na rocha, segundo LEIGHTON & PENDEXTER, 1962	64
TABELA 11 - Nomenclatura revisada por WRIGHT, 1992	67
TABELA 12 - Aptidão de rochas calcárias conforme o conteúdo de argila e sílica	73
TABELA 13 - Resultados da dissolução de dolomitos	78
TABELA 14 - Características de análise em terrenos cársticos, para fins de aterros sanitários, HUGHES et al, 1994	93
TABELA 15 - Métodos de fundação conforme a classe do terreno, utilizadas por WAGENER & DAY, 1984	96
TABELA 16 - Exemplos de casos relacionados aos problemas de fundação	101
TABELA 17 – Ocorrências brasileiras de dolomitos	Apêndice I
TABELA 18 – Ocorrências brasileiras de evaporitos	Apêndice I
TABELA 19 - Ocorrências brasileiras de calcários	Apêndice I
TABELA 20 - Ocorrências brasileiras de mármore	Apêndice I
TABELA 21 - Exemplos de imagens de satélite aplicadas a investigação de terrenos	129
TABELA 22 - Métodos eletromagnéticos	131
TABELA 23 - Métodos gravimétricos	133
TABELA 24 - Métodos sísmicos	136
TABELA 25 - Métodos da eletroresistividade	137
TABELA 26 - Relação das cavernas existentes na região de Nobres, MT	139
TABELA 27 – Características dos terrenos quanto a potencialidade a carstificação	183

## RESUMO

Os terrenos cársticos normalmente são constituídos por calcários, dolomitos, mármore e evaporitos. Nestes terrenos, a percolação de águas superficiais e subterrâneas, provocam o fenômeno da carstificação, ou seja, a dissolução química destas rochas, que por sua vez, dá origem aos problemas cársticos, tais como colapsos e subsidências, afetando qualquer tipo de uso e ocupação do solo em intensidades variadas.

Desta forma, este trabalho procura avaliar as condições geológicas e geotécnicas das rochas carstificáveis, a fim de subsidiar trabalhos que visam contemplar o uso e ocupação de terrenos carstificáveis.

Para tanto, elaborou-se uma extensa revisão bibliográfica sobre o tema, bem como, escolheu-se uma área urbana, onde ocorreram problemas de colapsos devido aos processos de carstificação, e que representasse estes terrenos no Brasil.

Para o estudo de caso, optou-se pela cidade de Nobres, estado de Mato Grosso. As análises basearam-se no mapeamento geológico sistemático; interpretação de fotografias aéreas e imagens de satélite; identificação das feições de dissolução e formas de relevo cárstico; e prospecção geofísica. Entre estas técnicas, destaca-se que o processamento digital do terreno, através de imagens Landsat TM-5, não proporcionou resultados satisfatórios.

A área constitui-se num poljé em formação, onde as principais formas de dissolução apresentam um controle litológico e estrutural. Além disso, também definiu-se dois sistemas de relevo cárstico, ou sejam: o vale e os morros cársticos.

E, por fim, elaborou-se uma proposta para avaliação geológica-geotécnica para áreas sujeitas a problemas de carstificação, em escalas regionais e de detalhe.

## INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os terrenos cársticos vem sendo ocupados desde a pré-história - idade do Ferro, período neolítico.

Historicamente, as primeiras ocupações devem-se ao abrigo que as cavernas naturais forneciam aos povos daquelas civilizações, que já proporcionavam consequências isoladas ao meio ambiente, tais como a erosão e a progressão da destruição da vegetação nativa, nas cavernas que eram ocupadas, SAURO (1993).

Ao longo do tempo estas áreas foram progressivamente sujeitas a uma ocupação mais intensa, devendo-se principalmente, aos potenciais agrícolas dos fundos de vales e aos mananciais hídricos. Esta ocupação, vem sendo incrementada desde o início da era industrial, quando descobriram-se os potenciais à mineração, como matéria prima para várias finalidades industriais.

Assim, com implantação de centros urbanos e industriais sobre terrenos cársticos - rochas carbonáticas, também começaram a surgir os problemas inerentes ao uso e ocupação destas áreas, até então desconhecidos.

Pois, estes tipos rochosos (rochas carbonáticas e evaporíticas) são passíveis de dissolução química, originando vários tipos de cavidades subsuperficiais, feições de dissolução superficiais, e formas de relevos que lhes são características, denominados de processos de carstificação. Embora, existam outros tipos litológicos que também sofrem dissolução, entretanto, para estes casos, o processo se dá normalmente pela dissolução dos silicatos.

Estas formas de dissolução, seriam então as causas da deflagração dos problemas, que originam-se por processos geológicos e, extração de recursos naturais. Neste último caso, os problemas são diretamente causados pelas atividades antrópicas.

Assim, os principais problemas relacionados a ocupação de terrenos cársticos são os colapsos e as subsidências, caracterizando eventos geológicos ou naturais, ou até mesmo riscos com consequências sócio-econômicas, afetando as obras de engenharia, o meio ambiente e quando não, vidas humanas.

A diversidade de fatores relacionados a evolução dessas cavidades, está diretamente ligada as suas origens e propriedades, tais como: composição mineralógica, porosidades, dimensões do maciço rochoso, descontinuidades, estratigrafia, e aos mecanismos hidrológicos e climáticos que afetaram a história geológica destas rochas. Além destas características, intrínsecas ao meio físico, também as formas de ocupação exercem importante papel na evolução das cavidades e formas de relevo.

Atualmente, estima-se que 25% da população mundial vivem sobre terrenos carbonáticos, também estimados em 25% da área superficial terrestre, LAMOREAUX (1997), como estas rochas são carstificáveis, a ocorrência de problemas com colapsos e subsidências, está se tornando cada vez mais intensa. Em outros países a incidência destes problemas atinge dimensões de várias centenas de casos, principalmente pela maior produção de CO<sub>2</sub>, que na maioria das vezes, alcançam a cifra dos milhões de dólares para a recuperação das áreas afetadas.

No Brasil, em pelo menos 968 municípios há uma ocorrência das rochas carbonáticas, entretanto, o número de casos divulgados é bastante restrito, o que não significa que em muitas áreas brasileiras estes problemas já ocorreram, ou estão sujeitas a deflagração dos processos cársticos.

## 1.2 OBJETIVOS

Considerando que as áreas que apresentam condições para o desenvolvimento de processos relacionados ao carste no Brasil são: pouco ocupadas; possuem baixo índice de conhecimento técnico; fotografias aéreas em escalas regionais (1:60.000 ou menores); pouca exploração hídrica, etc, é objetivo deste trabalho estudar uma área que apresente as condições acima mencionadas, a fim de avaliar quais os procedimentos mais adequados para uma investigação geológica-geotécnica.

No sentido de atingir este objetivo principal, um conjunto de objetivos específicos são desenvolvidos, a saber:

- Levantamento bibliográfico sobre o tema;
- Estudo de caso;

- Análise das técnicas de investigação utilizadas;
- Proposta para avaliação Geológica-Geotécnica de terrenos cársticos em escalas regionais, urbanas e estudo de casos específicos.

Para tanto, foi escolhida uma área na Faixa de Dobramentos Paraguai, região Centro-Oeste do Brasil, onde está situada a cidade de Nobres no Estado de Mato Grosso, que dista 140 km a norte da capital – Cuiabá.

Além do objetivo principal, a opção por esta área também foi baseada na:

- 1- proximidade do local de trabalho;
- 2- por constituir-se num terreno cárstico com problemas de colapso e subsidência;
- 3- por representar uma área urbana dentro das características da maioria das cidades brasileiras, tais como: a falta de recursos financeiros; a ausência de informações geológicas e geotécnicas; a incompatibilidade das escalas das fotografias aéreas e data do sobrevôo; a falta de mapas topográficos compatíveis a escala de trabalho requerida em terrenos cársticos; traçado viário atualizado e, finalmente, o desconhecimento da seriedade do problema, por parte das autoridades políticas e administrativas dos órgãos municipais, estaduais e federais.

Portanto, com o término deste, pretende-se que profissionais que desenvolverão trabalhos geológico-geotécnicos em áreas cársticas, tenham um rol de orientações básicas quanto aos termos, feições, metodologias, problemas e eficiência dos processos de investigação.

## CARSTE: CONCEITOS, FEIÇÕES E FORMAS DE RELEVO

### 2.1 A ORIGEM DO TERMO "KARST"

O termo *Karst* tem origem na palavra pré-Indo-Européia *Karra*, que significa terreno rochoso ou campo de pedras, que vem sendo aplicado, provavelmente, desde os tempos romanos, GAMS (1993).

*Karst*, em inglês, foi importado da língua alemã com a mesma grafia *Karst*, JENNINGS (1987). Sendo que na língua portuguesa brasileira foi traduzido como "Carste" por FERREIRA (1980); SILVA, (1984); GUERRA (1987); KOHLER (1989); LINO (1989); KARMANN (1994), portanto, uma terminologia aceita nos meios de divulgação técnica-científica, sendo este o termo adotado nesse trabalho.

A região que deu origem ao termo carste e relevos cársticos, situa-se a nordeste da Baía de Trieste, Figura 1. E, era conhecida pelos iugoslavos como *Kras* ou *Krs*; *Carso* pelos italianos, e *Trieste Karst*, *Gorizia Karst*, *Istrian Karst*, por pesquisadores estrangeiros, referindo-se a centros geográficos, GAMS (1993).

Atualmente, a região apresentada na Figura 1B, é considerada como o carste clássico, ou seja, aquela onde as feições cársticas são as mais desenvolvidas e espetaculares, GAMS (1993). A primeira publicação daquela região, sob a forma de um mapa topográfico, foi elaborada por Ducatus Carnioliae, 1774, apud BATES et al (1980). Todavia, a descrição do Carste Dinárico deve-se a CVIJIC\* 1893 apud DOLABELA (1958).

Até o final do século XIX, a maioria dos autores consideravam o "Carste Clássico", toda a região dos Alpes Dináricos (Carste Dinárico), ou sejam, as áreas que se estendem desde o Centro-oeste da antiga Iugoslávia, por toda a Albânia, e nordeste da Grécia, GAMS (1993), Figura 1a. Entretanto, o carste Clássico corresponde apenas ao extremo noroeste da Província Dinárica., Figura 1b.

---

\* CVIJIC, J. (1893) - Das Karstphänomen *apud* MARTONNE, E. (1947) - *Traité de Géographie Physique*. Tomo. Librairie Armand Colin. Paris.

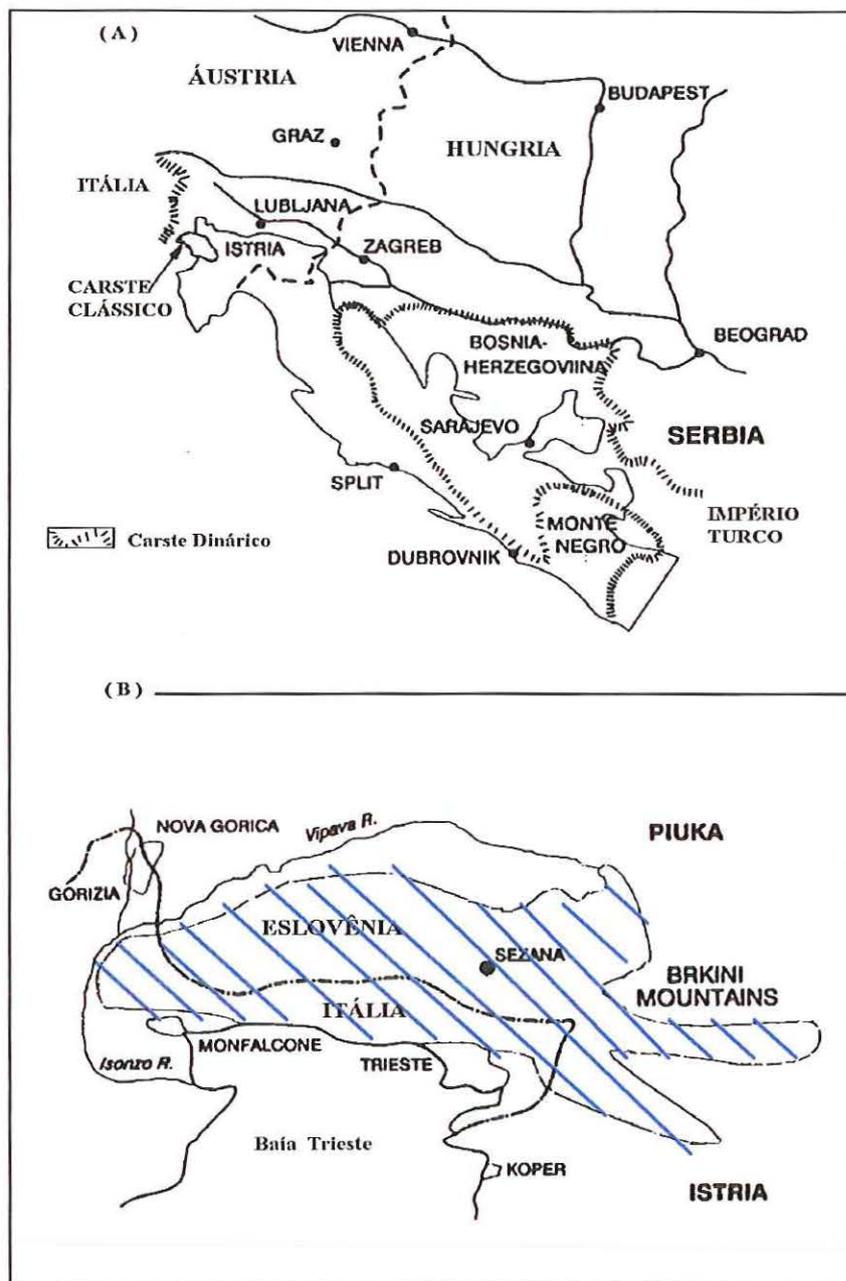


FIGURA 1 - Região de origem do termo *karst*, GAMS, 1993. (A) limites da região do Carste Dinárico no século XIX; (B) A área hachurada corresponde ao Carste Clássico atual.

Igualmente conhecidos e estudados contemporaneamente, os *Causses* - forma antiga da expressão *cal* denominados pelos franceses, que referiam-se aos *Causses do Gévaudan*, no centro da França. Embora nesta área, constituída por grandes planaltos de calcários jurássicos, o relevo apresenta-se em estado muito avançado de destruição da rocha

carbonática, pois a circulação subterrânea já se pôs a descoberto pelos colapsos dos tetos das cavernas, DOLABELA (1958).

No Brasil, as primeiras referências devem-se ao naturalista dinamarquês, LUND (1950), em sua primeira e segunda memória técnica sobre as cavernas. A primeira foi baseada em estudos realizados na caverna Lapa Nova de Maquiné (Gruta de Maquiné) em 1936, enquanto que a segunda, em 1937, referiu-se à região de Lagoa Santa, ambas no estado de Minas Gerais.

Nestas memórias, LUND (1950), descrevia a geologia, a paleontologia e a zoologia das cavernas e da região, sem contudo, fazer uso dos termos técnicos atualmente consagrados na literatura.

## **2.2 DEFINIÇÃO DO TERMO CARSTE**

BATES & JACKSON (1980), definem como um tipo de topografia formada por dissolução de rochas calcárias, gipsos e outras, caracterizada por dolinas, cavernas, etc.

FERREIRA (1980), relaciona o carste aos fenômenos específicos, tais como os estalagmites, estalactites, etc.

Para JENNINGS (1987), é um terreno que apresenta, mais que qualquer outro, feições distintas de drenagem e formas da paisagem, originadas pela solubilidade das rochas por ação das águas naturais. O autor ainda ressalta que a solubilização nem sempre é o processo que prevalece nos carstes, e nem é necessariamente o dominante, mas representa, o mais importante papel em relação aos outros tipos de paisagem.

CARTER & JOHNSON (1989), definem como um termo que é dado às formações de gargantas e cavernas naturais, através da dissolução de rochas carbonáticas. Salientam ainda, que a velocidade de dissolução é muito lenta, sendo necessários 5000 anos para formar-se uma caverna de 1 metro de diâmetro.

FORD (1993); GAMS (1993), atribuem esta terminologia à sistemas geomórficos e hidrológicos das águas subterrâneas, desenvolvidas mais facilmente, em rochas solúveis, particularmente em calcários e dolomitos.

COSTA NUNES et al (1978) denominaram terrenos cársticos às rochas metamórficas e sedimentares que apresentassem fenômenos de solubilidade, chamando-as de formas cársticas, devido a ação das águas de infiltração ou defluxo subterrâneo.

Para este trabalho, considera-se que o termo carste refere-se à:

*Um terreno que apresenta feições geomórficas e hidrológicas, típicas da dissolução química, que podem desenvolver-se tanto em superfície como em condições subsuperficiais e, sempre, relacionadas às rochas solúveis, tais como carbonatos, evaporitos e fosfatos.*

Embora a dissolução química ocorra em todos os tipos rochosos, esta diferenciação é pertinente porque envolvem os tipos de rochas solúveis, onde toda a massa rochosa é passível de dissolução, e não apenas um ou outro mineral constituinte da rocha.

### **2.3 TERMINOLOGIAS ASSOCIADAS AO CARSTE**

Na literatura, é comum encontrar-se variações terminológicas que definem diferentes sistemas cársticos, que podem ou não, ser originados a partir dos processos de dissolução de rochas carstificáveis, tais como:

#### *PSEUDOCARSTE*

O pseudocarste constitui-se num terreno de rochas não carstificáveis, ou seja, que não contenha rochas solúveis, mas apresentem algumas feições de dissolução semelhantes aos terrenos cársticos, mas em menores proporções.

Assim, a origem dos processos de dissolução superficiais e a formação de cavidades no subsolo, de uma área pseudocárstica, podem se dar por outras razões, tais como pelo escape de gases, ablação, perda de resistência dos materiais ou dissolução dos silicatos. Como exemplos de pseudocarste citam-se:

1. Em áreas de geleiras pode formar-se o Carste Glacial, a partir do derretimento do gelo ou neve, com desenvolvimento de dolinas, túneis, cavernas. O processo que desenvolve algumas feições semelhantes ao carste é a ablação, ocasionada pelo movimento da geleira sobre a superfície rochosa subjacente, JENNINGS (1987).
2. Em áreas vulcânicas recentes, quando as lavas são bastante fluidas, vários processos intrínsecos ao vulcanismo, favorecem a formação de complexos dutos subterrâneos, que por colapso, poderão formar depressões superficiais do tipo dolinas. Normalmente, a formação de cavidades está relacionada às bolhas de gases remanescentes e dos canais de saída da lava. À estas áreas, dá-se o nome de Carste Vulcânico ou Vulcanocarste, JENNINGS (1987). No Brasil, pode-se citar o exemplo do túnel da ilha de Trindade, leste de Vitória (ES), e algumas ocorrências pontuais no Rio Grande do Sul, MACIEL FILHO (informação verbal).
3. Feições do tipo lapiás (pequenas caneluras ao longo da superfície rochosa), podem ocorrer em rochas ígneas, devido a reação química do solo com a água, que ocorre no interface

solo-rocha, provavelmente associados a dissolução dos minerais máficos. Estas pequenas caneluras ficam expostas após a denudação do terreno. Um exemplo proeminente deste tipo de feição, especificamente denominada de pseudolapiás, é encontrado nas rochas eruptivas do maciço de Agulhas Negras (RJ).

4. As drenagens subterrâneas, dolinas, arcos de pedra e as cavernas, encontradas em rochas areníticas, também são definidas como pseudocarste, provocadas pela dissolução dos silicatos pois são instáveis na presença de água com alta razão de CO<sub>2</sub> livre e de ácidos orgânicos, em temperaturas ambientes entre 25-35 °C (Trópicos Úmidos), por isso, são feições atribuídas apenas aos fenômenos de alteração natural das rochas, BÖGLI (1980). Além deste fator também atuam os processos de erosão eólica.
5. Outras formas comuns de pseudocarste em arenitos, originadas pela ação conjunta do vento e da precipitação pluvial, são as torres, como aquelas observadas em Vila Velha (PR); Sete Cidades (PI); Chapada dos Guimarães (MT) e, ao longo da Serra de Botucatu (Analândia e Altinópolis (SP), LINO(1989).
6. Em rochas quartzíticas, também podem desenvolver-se feições pseudocársticas, tal é o caso das cavernas em São Thomé das Letras e Ibitipoca (MG).
7. Em sedimentos recentes, face a colapsibilidade dos solos, são encontradas formas de abatimento (pequenas dolinas) em várias partes do país, por exemplo: Brasília, DF, (MENDONÇA,1993); Rio Grande do Sul (informação verbal do Prof. Dr. Maciel Filho, 1995); Parecis (MT) (informação verbal do Prof. Dr. Wilson Conciani, 1995).
8. Outros terrenos pseudocársticos, com abatimentos superficiais, são causados pelo processo de *piping*, ou seja, pela erosão interna subsuperficial à remontante.

#### *EXOCARSTE E ENDOCARSTE*

As evidências de feições e formas de relevo, em áreas de ocorrência de rochas calcárias, quando observadas na superfície do terreno, são denominadas de exocarste ou carste descoberto. E, quando ocorrem em condições subsuperficiais de endocarste ou carste coberto.

Uma condição intermediária, é o carste parcialmente coberto, isto é, quando as formas de dissolução ocorrem sobre a superfície rochosa, que se encontra coberta por algum tipo de solo, sedimento, matéria orgânica, líquens ou musgos. Este tipo de carste é reconhecido em regiões de climas temperados e frios, onde a espessura destes materiais de cobertura é pequena. Entretanto, para condições de clima tropical e subtropical úmido, onde as coberturas atingem até dezenas de metros, opta-se, nesse trabalho, por classificá-lo como endocarste.

### CARSTE AUTIGÊNICO E ALOGÊNICO

JACKUS (1977) estudando áreas cársticas desde 1948, relata que o dinamismo da erosão cárstica, também depende das relações orográficas entre uma área cárstica e outra não cárstica. Alegando que a erosão é linear, seja pelo fluxo vertical percolando camadas subjacentes, ou seja pelo fluxo superficial de drenagens que traspassam áreas de rochas carbonáticas, provocando uma corrosão subárea.

Desta forma, baseado nos aspectos geológicos, estruturais e relações orográficas, o autor distingue dois tipos fundamentais de carste: (1) o carste autigênico (Tipo-A) e (2) o carste alogênico (Tipo-B).

O Carste Autigênico, Figura 2, relaciona-se à uma região calcária, topograficamente elevada, com substrato e área circunvizinha constituída de rochas não carstificáveis. Neste caso, a água flui, invariavelmente, da região cárstica para não cárstica, e suas feições são única e exclusivamente derivadas do sistema hidrológico destas águas.

O Carste Alogênico, Figura 3, ocorre quando uma área de rochas calcárias é drenada por cursos de água, que tem sua origem fora do ambiente cárstico.

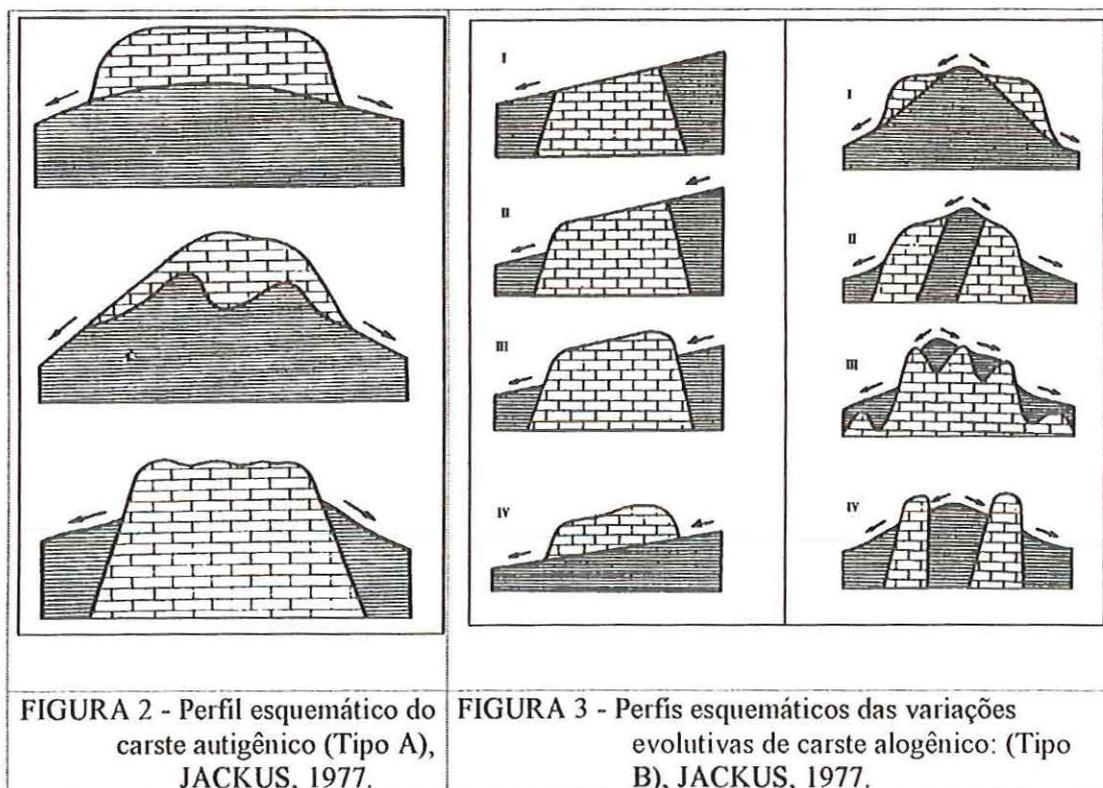


FIGURA 2 - Perfil esquemático do carste autigênico (Tipo A), JACKUS, 1977.

FIGURA 3 - Perfis esquemáticos das variações evolutivas de carste alogênico: (Tipo B), JACKUS, 1977.

Na realidade, apenas o carste tipo-A é encontrado na natureza como um tipo puro, enquanto que o tipo-B, sempre estará associado ao carste autigênico, seja pelo desenvolvimento de materiais inconsolidados resultados da pedogênese, ou seja pelas variações estruturais da região, Figura 4.

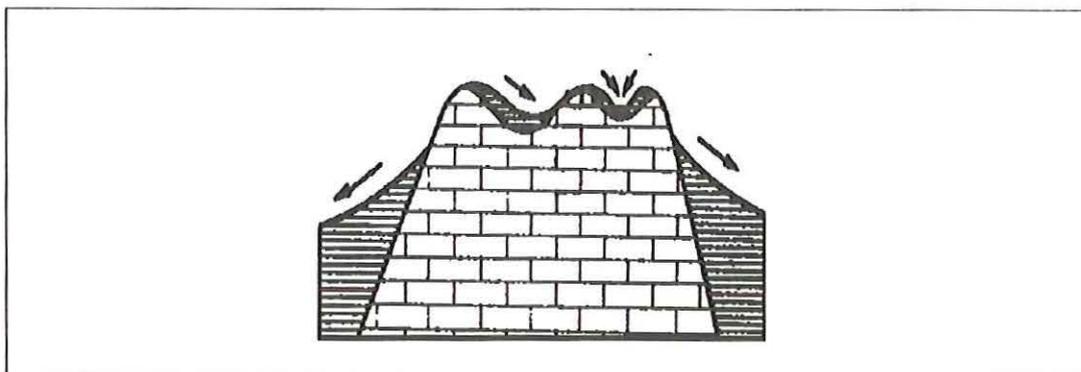


FIGURA 4 - Perfil esquemático de um carste tipo-B desenvolvido a partir de um carste tipo-A com cobertura de materiais inconsolidados, JACKUS, 1977.

### *PALEOCARSTE*

É um carste fóssil, também denominado de Carste Exumado. Este tipo, é observado quando uma determinada área cárstica, sofreu um processo de soterramento por materiais impermeáveis, paralisando os processos cársticos daquela época. Se atualmente expostos a superfície, são por causa da ação dos efeitos erosivos atuais.

### *HOLOCARSTE E MEROCARSTE*

São termos atribuídos por CVIJIC\* apud LINO (1989), que relacionou o termo holocarste com uma área que apresentasse um carste puro, ou seja, constituído apenas por rochas carbonáticas, enquanto que, merocarste, designaria um relevo cárstico constituído pela intercalação com outros tipos litológicos, por exemplo, intercalações com argilitos, arenitos, filitos, etc.

### *EPICARSTE*

O epicarste corresponde a uma zona bastante porosa, imediatamente abaixo do terreno, envolvendo solos e rochas carbonáticas, ou seja, caracterizada por blocos de rochas envolvidos pelos solos de alteração e cavidades vazias. A alta porosidade é causada por processos de dissolução, FORD (1993), CAREW & MYLROIE (1994).

## **2.4 FEIÇÕES E RELEVOS CÁRSTICOS**

A fenomenologia cárstica manifesta-se sob dois sistemas básicos: (1) as feições cársticas que correspondem a formas de dissolução observadas diretamente na superfície das

\* CVIJIC, J. The Dolines. In: Geog. Abhandlungen, 5:225-76.

rochas aflorantes e, (2) as formas de relevo cárstico, que podem estabelecer uma unidade geomorfológica regional, incluindo-se aqui, as cavidades subsuperficiais.

Assim, as feições cársticas refletem àquelas formas que podem ser individualizadas sobre a superfície rochosa, ou seja, a nível de afloramento. Enquanto que as formas de relevos cársticos - *Landforms*, traduzem unidades de áreas que variam desde dezenas de m<sup>2</sup> a km<sup>2</sup>, podendo exibir vários tipos das feições cársticas.

LINO (1989) classifica as formas cársticas em dois grandes grupos: primárias e secundárias.

As formas primárias referem-se aos aspectos destrutivos da rocha, e compreendem, (1) as formas superficiais, tais como lapiás, dolinas, torres, poljés, úvalas, etc e, (2) as formas subterrâneas, representadas por cavidades ou cavernas.

As formas secundárias são construtivas, e referem-se aos espeleotemas, definidos como deposições minerais em cavernas formadas basicamente por processos químicos de dissolução e precipitação.

A abrangência deste trabalho, limitar-se-à as formas superficiais destrutivas primárias, sem abordar os tipos e a morfologia das cavidades ou cavernas.

#### **2.4.1 FEIÇÕES DO EXOCARSTE**

São as feições pertinentes ao carste descoberto, também denominado de carste superficial, sendo a precipitação pluvial, diretamente sobre o terreno, o principal agente causador dessas evidências, podendo originar desde coberturas biogênicas e solo residual, bem como sulcos por corrosão de dimensões milimétricas a métricas.

A evolução destes processos, após dezenas até milhares de anos, pode originar outras formas mais evoluídas, tais como: campo de lapiás, dolinas, sumidouros, poljés, etc.

##### **2.4.1.1 SOLO RESIDUAL ARGILOSO (*Terra Rossa*)**

Representa um solo residual superficial de coloração avermelhada e textura argilosa, com contato abrupto e nítido com a rocha matriz, podendo penetrar nas juntas abertas pela dissolução.

São materiais inconsolidados com aspecto muito semelhante aos solos lateríticos de clima tropical, todavia, não caracterizam esta condição por também serem encontrados atualmente em climas temperados e frios, seja no Norte e Sul da Europa bem como ao Sul de Indiana (USA), THORNBURY (1966). Além destas características, não apresentam minerais

expansivos, nem registros que denotam relações com colapsividade provocada pelas próprias características físicas intrínsecas à este tipo de solo.

#### 2.4.1.2 LAPIÁS

O termo *lapiás* é originário da região de Savoy, França, que significa pedra, porém é utilizado para denotar formas de corrosão em superfícies rochosas.

Na literatura estrangeira, o termo é citado como *karren*, que segundo ECKERT apud BÖGLI (1980), provém do alemão *char*. Contudo, BÖGLI (1980), acredita ser derivado da palavra *karst*, do inglês.

No Brasil, alguns autores traduziram-no como *lapiáz* e outros como *lapiéz*, provavelmente da palavra francesa *lapiéz*. Entretanto, como a Grande Enciclopédia Portuguesa e Brasileira (1945), registra o termo como substantivo masculino, que significa lapiasação ou superfície lapiasada, esta é a terminologia adotada neste trabalho.

Os lapiás são estrias, sulcos ou canaletas, entalhados na superfície rochosa, que podem compor infinitas formas simples e complexas, e com grandes variações na profundidade. São também denominadas de microformas, por estarem relacionadas à escala de afloramento.

A origem dessas feições pode ser por: (1) deflação ou corrosão, responsável pelo processo físico para a sua formação; (2) corrosão ou dissolução, que representam os processos químicos, sendo estes, os principais fatores genéticos.

#### 2.4.1.3 FATORES QUE INFLUENCIAM NAS FORMAS DOS LAPIÁS

A importância dos lapiás reside no fato de apresentarem padrões superficiais de drenagens e, portanto, de acumulação dessas águas, podendo ainda expressar outras propriedades intrínsecas a rocha, como descrito a seguir:

THORNBURY (1966) cita que as formas dos lapiás são em função de algumas propriedades da rocha, tais como: solubilidade; permeabilidade; juntas; acamamento e outros atributos físicos e químicos.

BÖGLI (1980) alega que as variedades das formas dependem da maneira pela qual a superfície rochosa é molhada; das condições de drenagem da água corrosiva e das coberturas de solo.

ALLEN (1984) cita vários autores que reconhecem a morfologia das lapiás como sendo dependentes da litologia, geologia estrutural, altitude e outros aspectos, tais como:

distribuição da precipitação, estagnação ou fluxo das águas, e, pela presença ou ausência de solo e/ou matéria orgânica.

JENNINGS (1987) dá uma versão mais completa desses fatores, dizendo que as formas e tamanhos dos lapiás são controlados pelos atributos da rocha (litologia, porosidade, granulometria, descontinuidades, % de impurezas, anisotropia termal da calcita - maior alteração ao longo do eixo cristalográfico "c"); presença ou ausência de coberturas; atividades climáticas; desenvolvimento vegetativo; interferência antrópica, bem como a ação conjunta desses fatores ao longo do tempo.

#### 2.4.1.4 CLASSIFICAÇÃO DOS LAPIÁS

Os tipos morfológicos dos lapiás caracterizam-se por uma evolução gradual e hereditária dos fatores que influem na sua formação, dependendo simplesmente do estágio de evolução que são encontrados. Assim sendo, é possível estabelecer um indefinido número de sistemas classificatórios.

BÖGLI (1980), classificou os lapiás em formas simples; complexas e grupo de formas complexas.

ALLEN (1984), apresenta uma classificação fundamentada nas formas superimpostas e no tamanho das lapiás.

JENNINGS (1987), descreveu as formas de lapiás conforme sua ocorrência, ou seja, àquelas pertencentes ao carste coberto; parcialmente encoberto e carste descoberto.

Neste trabalho, preocupou-se em elaborar uma classificação quanto as suas ocorrências (exocarste e endocarste), e feições correlatas, baseada e adaptada de autores consagrados na literatura mundial, Figuras 5 a 12.

As denominações aqui atribuídas, aos lapiás, são uma tentativa de adaptação para o português, dos termos técnicos consagrados na língua estrangeira. Embora, LINO (1989) e DOLLABELA (1958), tenham descrito algumas dessas feições.

##### Lapiás Acanalados

Na literatura estrangeira são citadas como *rillenkarrren e solution flutes*. Formam pequenas cavidades longitudinais, em superfícies bastante íngremes, sempre separadas por pequenas cristas angulosas, Figura 5A.

A profundidade (1-3 cm) destas caneluras, em formas de meia cana, não ultrapassam a largura (2-4 cm) e, seu comprimento, varia de alguns centímetros, para climas temperados,

à metros, em climas tropicais. Em seção transversal, apresentam formas semicirculares até fundos em V.

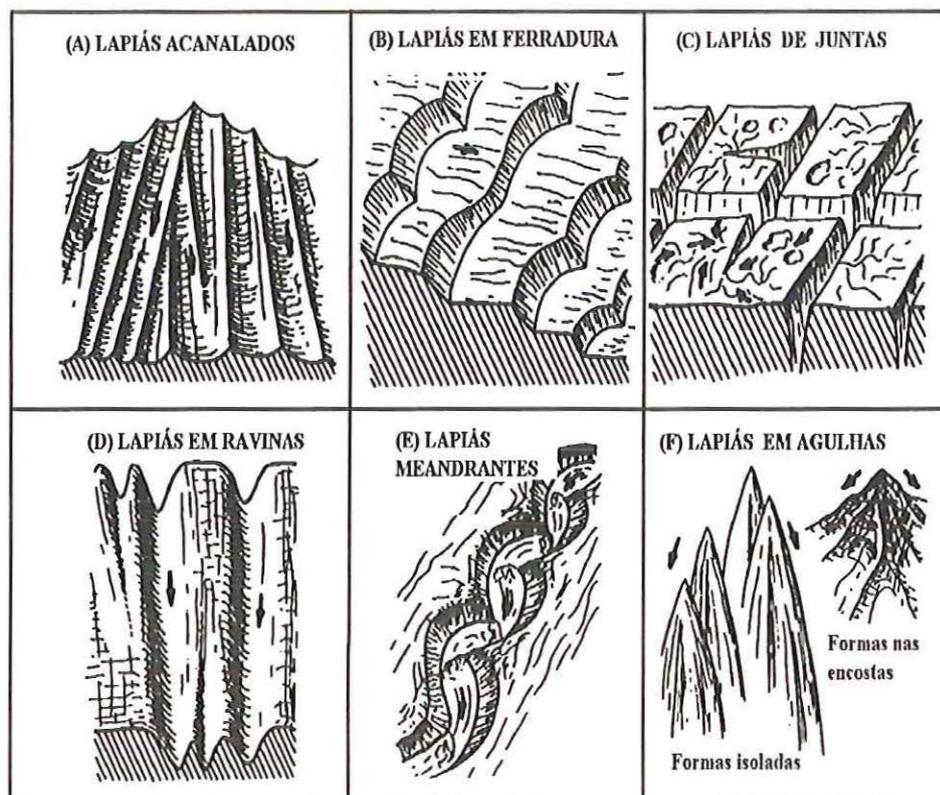


FIGURA 5 - Esquemática dos tipos de lapiás do exocarste.

BÖGLI (1980), diz que o tempo decorrido para a formação dos lapiás acanalados esculpidos sobre a superfície de blocos rochosos, está entre 400-600 anos, a partir da exposição destes blocos na superfície do terreno. E, JENNINGS (1987), relaciona a superfície acanalada a área de insolação (voltada para o Sul), enquanto as faces voltadas para o Norte, são constituídas por algas e líquens.

Estes tipos de lapiás são característicos de superfícies rochosas que tendem a verticalização, como observa-se na Figura 6. Estas feições podem ser observadas nos calcários que ocorrem em Bonito (MS); Ubajara (CE).

BÖGLI (1980) considera que o comprimento aumenta com a inclinação, a temperatura e a quantidade de chuva, sendo que o fim de um canal é marcado, quando a água atinge grandes concentrações de carbonato dissolvido, característica esta também observada na Figura 6.

Alguns trabalhos experimentais, baseados em simuladores de chuva, tentaram estabelecer uma correlação entre a inclinação da superfície e o comprimento das caneluras,

chegando a resultados contraditórios. Isto levou DUNKERLEY\* apud JENNINGS (1987), afirmar que a intensidade da chuva e a hidrodinâmica do fluxo não controlam as características dessas feições, mas sim, os contornos dos grãos minerais e as irregularidades preexistentes na superfície rochosa. E, que o padrão homogêneo dessas caneluras, é devido a competitividade do processo com o passar do tempo.

Nas bordas de superfícies verticalizadas ou no topo de protuberâncias rochosas, associadas aos lapiás acanalados, podem originar-se os tipos serrilhados ou dentados, LINO (1989), encontrados em Santana, BA.

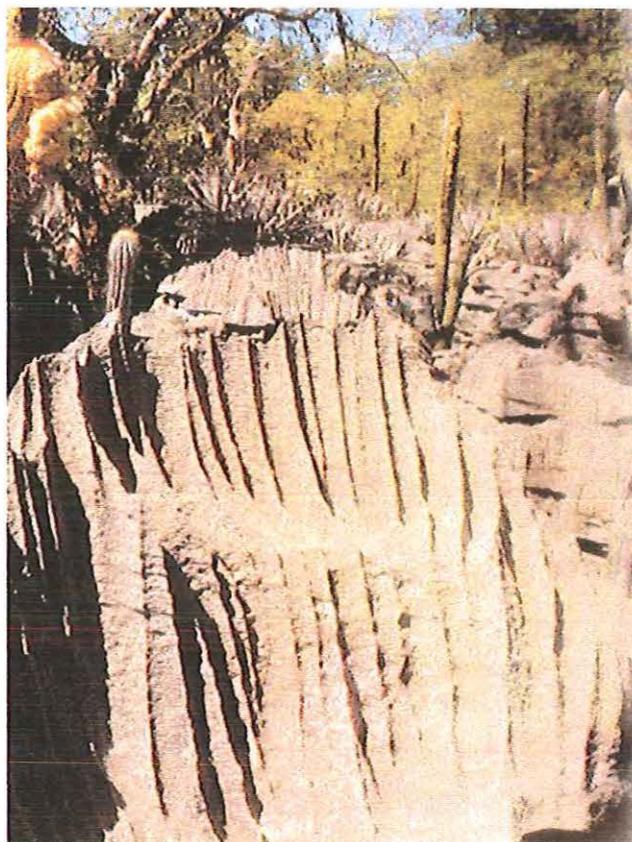


FIGURA 6 - Fotografia de lapiás acanalado em Ubajara, CE.

#### Lapiás em Ferradura

São citados na literatura estrangeira como *trittkarren*, *heel-print-karren* e *solution karren*.

Esses lapiás ocorrem sobre superfícies pouco inclinadas, formando reentrâncias semicirculares, com erosão à remontante, dando formas semelhantes à uma sequência de degraus isolados ou pequenos patamares contínuos, com aspecto de ferradura, Figura 5B. Por

---

\*DUNKERLEY, D.L.(1979)The morphology and development of rillenkarren. Z. Geomorph,23,332-48.

vezes, podem ocorrer ferraduras superimpostas. Estas formas semicirculares originam-se a partir dos pontos de onde há o aumento da velocidade de água.

O diâmetro e a profundidade dessas cavidades podem atingir desde alguns centímetros até alguns metros.

### Lapiás de Descontinuidades

Estes tipos de feições são comuns tanto no exocarste como no carste coberto. Neste último caso, estão atualmente expostos ao ar livre pela remoção dos materiais de cobertura, seja pela ação erosiva natural (água, vento e geleiras) ou por alguma ação antropogênica.

As feições causadas por descontinuidades, são mais proeminentes em superfícies planas, estando relacionadas à dissolução das zonas de fraqueza verticais das rochas, como planos de falhas, juntas, acamamentos e estratos mais facilmente carstificáveis.

Os lapiás de juntas, Figura 5C, estão relacionados a fraturas, juntas e/ou falhas, compondo um campo rochoso com intensivo ravinamento, formado por pequenos corredores que denotam as principais feições estruturais da rocha. Na literatura estrangeira são citados como *grykes ou grikes, solution fissure e klufkarren*.

No ponto de interseção destas descontinuidades, comumente originam-se pequenos poços naturais (*karst wells*), onde normalmente há acúmulo de água. E, por serem locais de maior fraqueza da rocha, associado ao volume de água acumulado, estas junções condicionam-se como pontos de grande vulnerabilidade à carstificação das rochas carbonáticas.

Quando estes canais de dissolução estiverem relacionados a estratificação do calcário ou bandamentos composicionais diferentes, são denominados de lapiás de acamamento (*bedding grikes*).

Nas superfícies rochosas inclinadas, e ao longo de planos de falha, juntas ou acamamento, podem originar-se os lapiás reentrantes (Figura 12), que são pequenas cavidades cônicas, alinhadas nas superfícies destes planos. Estas feições são semelhantes as lapiás de ferradura, sendo diferenciadas por se implantarem segundo aqueles planos de fraqueza, além de serem característicos de superfícies mais inclinadas.

A combinação dos lapiás de descontinuidades pode levar ao isolamento de blocos de rocha, ou seja, à formação de blocos suspensos (*clints karst*), que podem apresentar várias dimensões, Figura 7.

Esta feição é muito comum em áreas brasileiras com ocorrências de rochas carstificáveis, um exemplo é ilustrado na Figura 8, onde ocorre bloco suspenso devido a dissolução da rocha ao longo dos planos de fraturas.

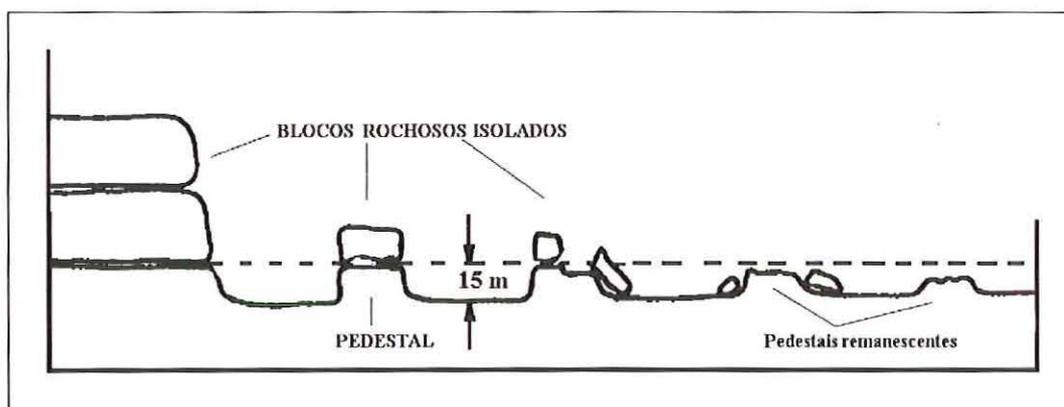


FIGURA 7 - Blocos suspensos originados pela dissolução química da rocha, BOGLI (1980).

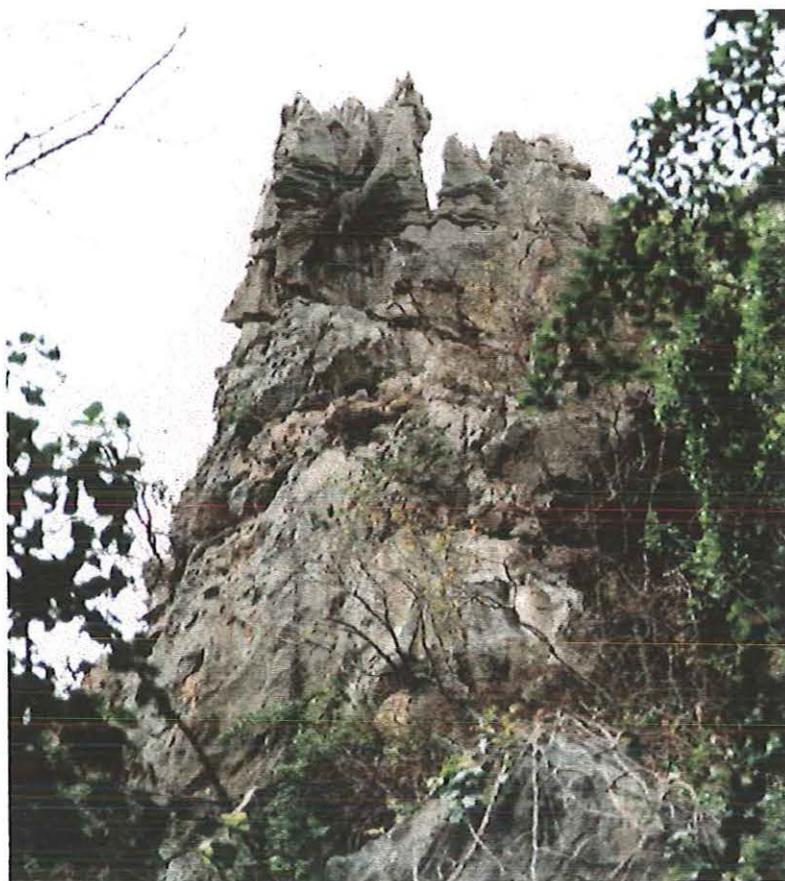


FIGURA 8 - Fotografia de blocos suspensos originados pela dissolução da rocha ao longo de planos de fraturas, Ubajara (CE).

#### Lapiás em Ravinas ou Ruiniformes

São variações dos lapiás de discontinuidades, e se implantam nos canais de dissolução (*rinnenkarren*, *solution grooves* e *solution runnels*).

Nestas ravinas, Figura 5D, ocorre a concentração do escoamento de águas pluviais, com ou sem contribuição de águas que emergem da subsuperfície. São canais que tendem a

umentar suas dimensões a jusante. Quando há influência de águas efluentes, poder-se-á implantar o processo de *piping*.

Estas feições diferenciam-se dos lapiás acanaladas, por atingirem dimensões métricas e abrangerem áreas bem maiores; e dos lapiás de juntas, por não apresentarem um padrão paralelo.

Esses lapiás, quando em superfícies planas, apresentam variação: formam pequenos regos, de dimensões centimétricas, Figura 5E, chamados de lapiás meandantes (*meandering runnels, mäanderkarren*) passando a outras formas, como espiraladas a retíneas, dependendo do ângulo da encosta.

#### Lapiás em Agulhas ou Punhais

Estes lapiás, Figura 5F, correspondem a formas calcárias pontiagudas, com superfícies poligonais cortantes, são também conhecidas como *spitzkarren*, em alemão.

A origem é devida a progressiva dissolução de formas preexistentes, e, conforme ALLEN (1984), evoluem a partir da ação de águas pluviais que atuam num sistema de juntas, Figura 9.

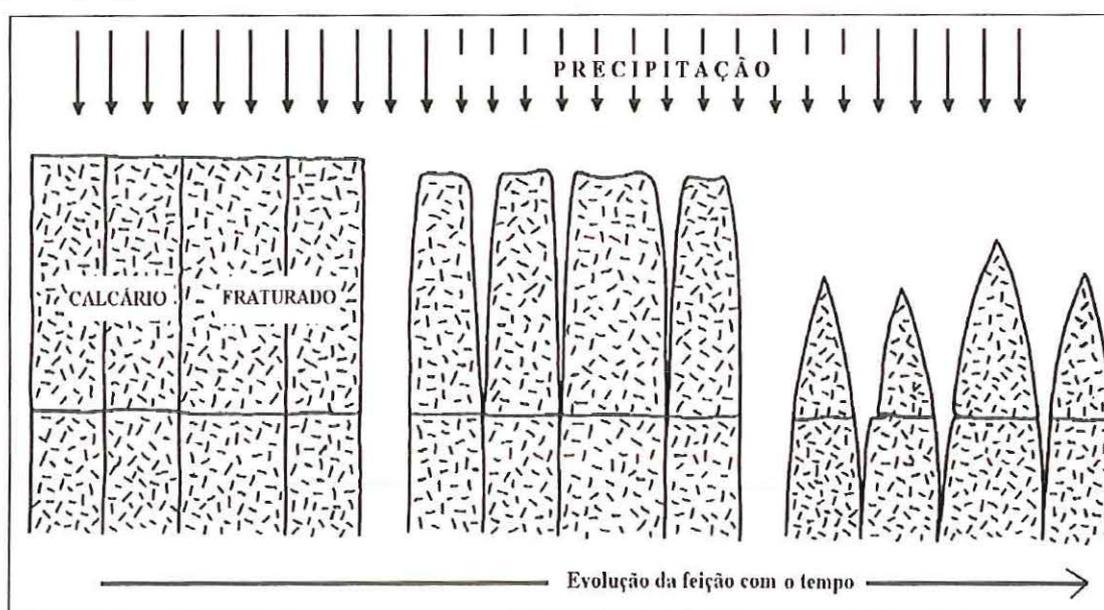


FIGURA 9 - Representação esquemática da origem evolutiva dos lapiás em agulhas, segundo ALLEN (1984).

Como exemplo de ocorrência brasileira, cita-se as feições encontradas nos calcários de Ubajara, CE, Figuras 10 e 11.



FIGURA 10 – Estágio inicial de dissolução dos lapiás em agulhas, Ubajara (CE).



FIGURA 11 - Campo de lapiás em agulhas em avançado estágio de carstificação, Ubajara (CE).

#### Lapiás dendríticos

Formam minúsculos canais bastante ramificados (*root karren*), com alguns milímetros de profundidade que, quando expostos ao ar livre, geralmente são facilmente destruídos.

#### Lapiás alveolares

Os lapiás alveolares, LINO (1989), são observados nas superfícies de rochas carbonáticas, originadas pela ação corrosiva do escoamento de águas superficiais ou pela precipitação direta. O aspecto alveolar é devido as variações composicionais na superfície do maciço rochoso.

Estas feições devem ser diferenciadas dos lapiás reentrantes, por estes ocorrerem ao longo de planos de fraqueza e, dos lapiás cavernosos, por ocorrem por todo o corpo do maciço, conferindo à rocha uma aspecto esponjoso. A Figura 12, ilustra a diferença entre lapiás reentrantes e cavernosos.

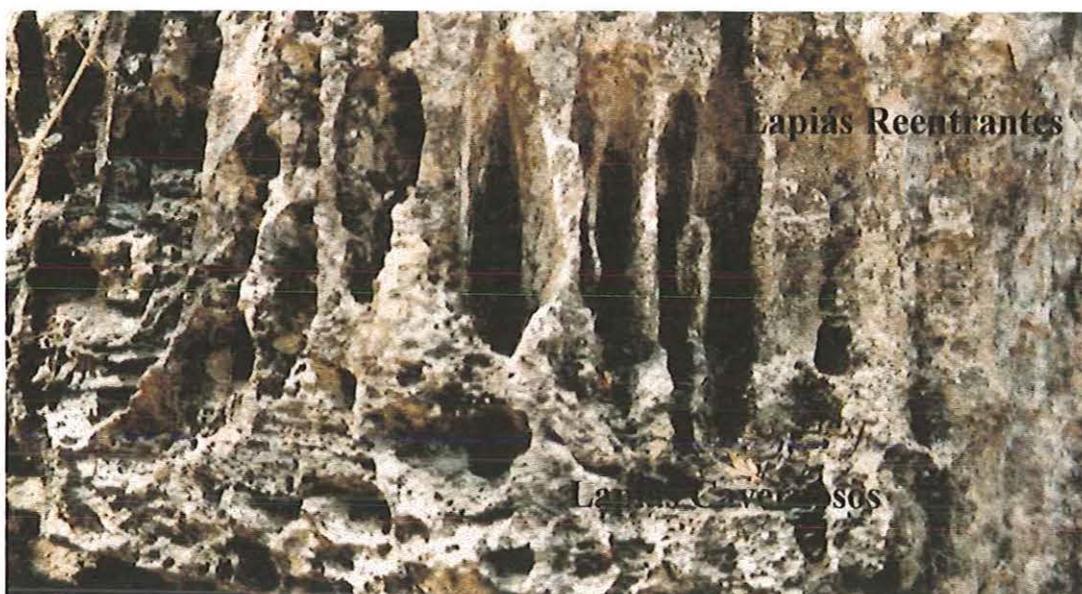


FIGURA 12 - Fotografia evidenciando a diferença entre lapiás reentrantes (feições de dissolução vertical), dos lapiás cavernosos (cavidades cilíndricas)

#### 2.4.2 FEIÇÕES DO ENDOCARSTE

As feições do endocarste, assemelham-se muito com as do carste descoberto, mas, sua distinção se justifica pelas seguintes características: (1) a água de percolação no material de cobertura, contém elevado teor de  $\text{CO}_2$  biogênico e da atmosfera; (2) as feições denotam estreitas relações com o padrão estrutural das rochas; (3) são inerentes àquelas que ocorrem no interface solo-rocha e (4) as formas são mais arredondadas ou planares, pois as rochas são submetidas a uma ação corrosiva mais lenta.

Deve-se salientar que todas as feições do endocarste, descritas a seguir, estão recobertas por material inconsolidado da superfície, e que sua observação direta sobre o terreno (Figura 13), é devida aos colapsos, subsidências (carreamento dos materiais inconsolidados para o interior da superfície do terreno), erosão superficial, ou pela implantação de taludes escavados.

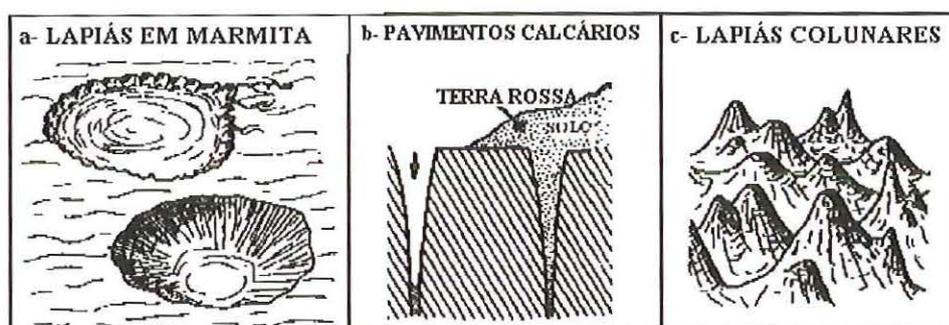


FIGURA 13 - Esquemática das feições do endocarste.

### Lapiás em marmitas

São conhecidos como *solution pans*, *undercut karren*, embora este último termo pode ser amplamente empregado, tanto para designar reentrâncias ao longo de planos inclinados como em superfícies horizontalizadas.

As marmitas são originadas pela presença da zona do epicarste, fazendo com que as cavidades subsuperficiais, apareçam na superfície do terreno, através da migração dos materiais inconsolidados sobrepostos. Esta feição pode evoluir, lentamente, para um dolina.

Por lapiás em marmitas, Figura 13a, entende-se como pequenas depressões fechadas e arredondadas, atingindo até um metro de diâmetro e com alguns centímetros, ou mesmo um metro, de profundidade.

Quando o tipo do material que preenche o fundo destas marmitas, constituir-se por argila, poderá haver a estagnação da corrosão em profundidade e, conseqüentemente, uma significativa ampliação das bordas. Isto se explica pelo fato da argila atuar como uma camada impermeável, provocando maior acúmulo da matéria orgânica com maior influência do CO<sub>2</sub> da atmosfera.

### Pavimentos Calcários (*Limestone pavement*)

São superfícies rochosas, formando verdadeiros patamares horizontais, truncadas abruptamente por juntas verticais, alargadas pela dissolução e preenchidas pelo solo residual - *terra rossa* (Figura 13b), que recobre o substrato rochoso.

Esta feição pode ser observada quando o material de cobertura é removido ou quando se executa um corte transversal no talude natural. É comum observarem-se feições de preenchimento, pelo solo, conhecidas como cunhas de solo ou *cutters*, Figura 13b.

### Lapiás Plano-Côncavos

Na literatura mundial são conhecidos como *solution notches*, sendo observados em paredes rochosas verticalizadas ou blocos de rocha, que estiveram em contato lateral com solos. Se observados na superfície, isto se deve à ação erosiva, natural ou antrópica.

Formam superfícies lisas e planas, com geometria irregular, mas apresentando uma certa concavidade na porção inferior de torres rochosas, enquanto que na porção do topo dos testemunhos as paredes são rugosas e irregulares. O limite da superfície lisa e rugosa estabelece o antigo nível de cobertura pelo solo.

A concavidade é devida à percolação da água na interface solo-rocha. Estas feições são comuns em climas tropicais.

### Lapiás Colunares ou chaminé

Na literatura estrangeira são conhecidos como *solution pipes*, *geologican organ* ou *cockpit*.

JENNINGS (1987), alega que estas feições, ocorrem tanto em rochas carbonáticas compactas e cristalinas, associadas a juntas, como também em rochas calcárias brandas (margas, gipso), mas BÖGLI (1980), afirma que não existem relações estruturais.

São lapiás que formam pequenas torres de rocha carbonática, Figura 13C, sendo visíveis quando ocorrem colapsos no terreno. Estas torres podem aparecer em grande número ou isoladamente no interior das áreas que sofreram colapso.

No caso de Nobres (MT), a maioria das depressões circulares que apareceram na superfície, devido aos colapsos, está associada a pelo menos uma ocorrência de lapiás colunares.

A forma colunar, em torre ou em pináculo, é responsável pela irregularidade topográfica do topo rochoso, geralmente associada a outras feições cársticas.

### Lapiás Cavernosos

São conhecidos como *cavern subsol weathering* e *kavernosen karren*, bastante comuns em carste coberto.

Os lapiás cavernosos (Figura 12) ocorrem por todo o interior do maciço rochoso, expostos e distribuídos ao longo da superfície do terreno, sob a forma de blocos, matações, etc. São feições representadas por pequenas impregnações de cavas e tubos arredondados, denotando pretérita percolação de água subterrânea.

Os blocos, atualmente dispersos sobre a superfície do terreno, tem suas formas de dissolução com dimensões aumentadas, porque progrediram, através do acúmulo de águas meteóricas. Portanto, não representam o estado original.

## **2.4.3 RELEVOS CÁRSTICOS - Landforms**

### **2.4.3.1 CAMPOS DE LAPIÁS**

Todas ou algumas das feições descritas, seja do exocarste como também do carste coberto, podem ocorrer conjuntamente e, quando alcançarem uma superfície de área considerável, algumas centenas de metros quadrados, são denominados de Campos de Lapiás (*field karren*), Figura 11, como aqueles encontrados em São Domingos (GO); Ubajara (CE).

### 2.4.3.2 DOLINAS

A expressão dolina advém do Carste Dinárico e significa pequeno vale ou pequenas depressões fechadas, originadas sobre a superfície de rochas carstificáveis.

Por definição, dolina é uma depressão fechada com contornos circulares sinuosos ou irregulares, de diâmetros geralmente superiores à sua profundidade. Os diâmetros podem variar desde algumas dezenas a centenas de metros, e suas profundidades chegam a atingir até uma centena de metros, para grandes dolinas.

Os termos *sinkhole*, *swallow hole*, *swallet* são amplamente utilizados, na literatura estrangeira, para designar depressões na superfície do terreno. Contudo, sem conotação genética, sendo muitas vezes erroneamente utilizados para designar feições em terrenos não cársticos.

Os termos *solution doline* ou *solution sinkhole*, *collapse sinkholes*, *subsidence doline*, *subsidence sinkhole* (denominada pelos engenheiros de *ravelling sinks*) definem a condição da origem da depressão superficial, ou seja, respectivamente, dolinas de dissolução e colapso, enquanto que *bowl-shaped depression* diz respeito ao aspecto morfométrico de depressão ou dolina em forma de bacia.

BECK (1984) discute os vários usos e abusos do termo *sinkholes*, que é sinônimo de dolinas (*doline*), referindo-se que este termo, deveria ser empregado apenas para aquelas depressões superficiais do terreno onde ocorrem processos cársticos. Assim, quando depressões superficiais aparecem em terrenos não cársticos, o autor sugere o uso de *subsidence pits*, seguido da causa que provocou a depressão, por exemplo, *piping features subsidence pits* ou *mine collapse subsidence pits* para referir-se a subsidência ou do colapso de solos e de teto de minas, respectivamente.

Portanto, o uso do termo *sinkhole* ou dolina é uma expressão genérica, sem conotação genética ou morfométrica, mas diretamente relacionado à depressões na superfície de terrenos exclusivamente cársticos.

Em referência ao termo *pseudo-sinkhole* (pseudodolina), este deve corresponder as depressões que ocorrem em regiões não cársticas, por causas que não envolvem a dissolução química de rochas solúveis, BECK\* apud MENDONÇA (1993).

A seguir, estabelece-se uma classificação genética, Figura 14, e morfométrica, Figuras 16 e 17, para designar os vários tipos de dolinas e suas características quanto à origem e às formas de ocorrência em terrenos cársticos, baseada na literatura já consagrada mundialmente.

---

\* BECK, B. (1993) Informação verbal.

### 2.4.3.3 CLASSIFICAÇÃO GENÉTICA DAS DOLINAS

As dolinas de dissolução, Figura 14a, formam-se preferencialmente ao longo, ou nas interseções de zonas de fraqueza das rochas, tais como sistemas de fraturas e falhas.

O processo inicia-se pela ação de águas pluviais, que se concentram nesses focos e, vão se infiltrando, provocando a progressiva e lenta dissolução da rocha. Nesta fase de abertura da dolina, participa também o acúmulo das águas do escoamento superficial.

O fundo destas dolinas geralmente é constituído por materiais residuais argilosos (*Terra Rossa*) ou fragmentos, sedimentos e restos orgânicos carreados de áreas circunvizinhas.

Embora todas as dolinas, de uma forma ou de outra, tenham sua formação a partir de processos de dissolução, este tipo foi assim denominado porque as formas seguintes variam nos processos do avanço das depressões.

As dolinas de colapso, Figura 14b, são originárias devido ao desabamento de teto de cavernas, num processo rápido, originando “crateras” com paredes verticais e bordas angulares.

Estes tipos de dolinas podem dar origens aos cenotes, isto é, quando no fundo destas depressões há a exposição de águas subterrâneas, por exemplo, o Buraco das Araras, em Cáceres, (MT).

As dolinas de subsidência, Figura 14c, originam-se pelo lento e contínuo afundamento da superfície do terreno, geralmente com formas arredondadas, causado pela erosão interna (*piping*) da rocha ou do manto residual de alteração, sobrepostas às rochas carstificáveis. Assim, estas dolinas são formadas a partir de cavidades preexistentes e próximas à superfície do terreno. Por esta razão, são diferenciadas das dolinas de dissolução, que tem causas subáreas, ou seja, a dissolução processa-se a partir da superfície do terreno.

As dolinas de carste subjacente, Figura 14d, originam-se em grandes profundidades, quando a superfície do terreno é composta por rochas não carstificáveis.

A corrosão pode ter-se iniciado há muito tempo, sem que seus efeitos se refletissem na superfície, que uma vez alcançada, pode resultar em dolinas de colapso ou subsidência.

As dolinas de arrasto, Figura 14e, tem seu processo iniciado à grandes profundidades, dezenas de metros, e que no estado inicial não são percebidas na superfície do terreno, que poderá não ser constituído por materiais carstificáveis, a exemplo das dolinas de carste subjacente.

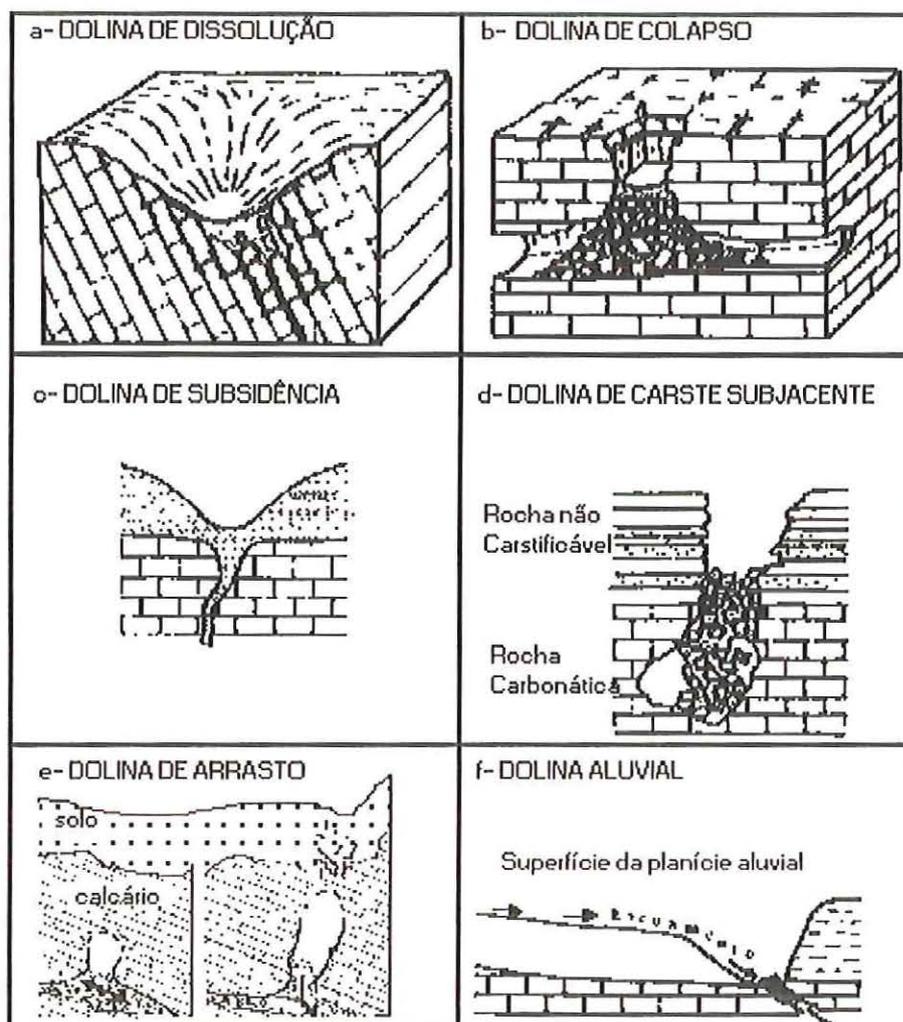


FIGURA 14 - Representação dos tipos genéticos de dolinas.

Estas, são oriundas a partir do rompimento ou subsidência de tetos de cavidades profundas, desenvolvidas ao longo de zonas de maior concentração de fluxo de águas subterrâneas. Estes abatimentos evoluem de tal forma que, na medida que há o desabamento e preenchimento do espaço vazio preexistente, origina-se outro, cada vez mais próximo da superfície. Finalmente, quando provocam colapsos no terreno, removem os materiais superficiais para seu interior, também podendo provocar desastres se afetarem áreas urbanizadas, como o ocorrido em Cajamar, SP, PRANDINI et al (1990).

Este tipo de dolina, durante a sua evolução poderão provocar pequenos recalques na superfície do terreno, mesmo que em profundidade ocorram frequentes e pequenos colapsos.

Quando alcançam estágios mais desenvolvidos, as dolinas de colapso podem ser confundidas com outros tipos, quanto a sua origem.

As dolinas aluviais, Figura 14f, são aquelas em que seu interior está preenchido por aluviões, carreados por alguma drenagem, interrompendo temporariamente a sua evolução,

embora o fluxo da água seja contínuo naquele meio. Posteriormente, estes aluviões poderão ser tragados pelo próprio canal, que adentra na subsuperfície do terreno, estabelecendo-se um sistema cíclico. Este tipo de dolina geralmente está associado a poljés. Geneticamente, formam um tipo intermediário entre dolinas de dissolução e de subsidência.

As dolinas induzidas, Figura 15, são causadas pelo excesso da exploração de águas subterrâneas. Também poderão ser originadas pelo aumento da diferença da carga hidráulica

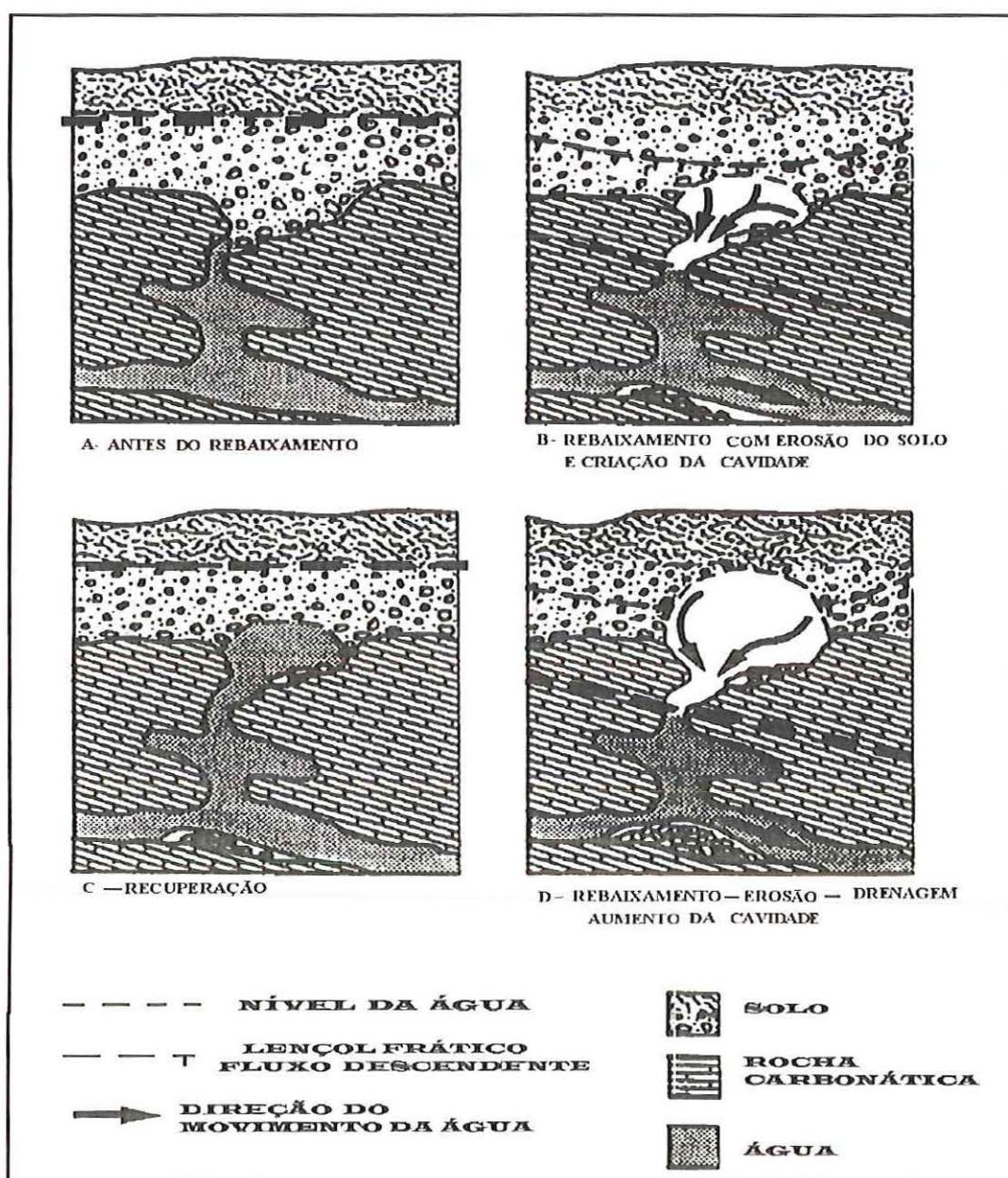


FIGURA 15 - Representação esquemática da evolução de dolinas induzidas a partir do rebaixamento do nível freático, NEWTON, 1987.

entre o aquífero superficial (lençol freático) e o aquífero profundo carbonático (nível piezométrico), ou seja, inicia-se um fluxo de água para dentro de fraturas ou cavidades

preexistentes, provocando a perda da pressão de suporte que a água exercia sobre os materiais, GARLANGER (1991).

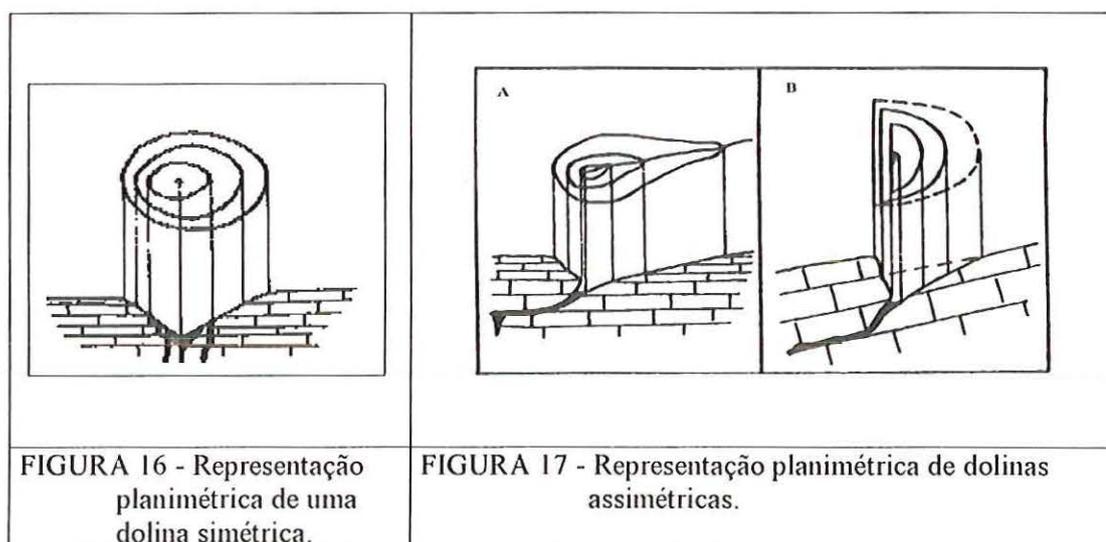
#### 2.4.3.4 CLASSIFICAÇÃO MORFOMÉTRICA DAS DOLINAS

A morfometria das dolinas, Figura 16, está muito relacionada aos aspectos estruturais das rochas; diversidade dos materiais de preenchimento e regularidade das chuvas.

Quando o meio rochoso é homogêneo e isotrópico, tendem a se formar as dolinas simétricas, com formas circulares, cônicas e encostas interiores de baixa declividade, Figura 16. Como exemplo citam-se as dolinas em prato, em bacia, em funil, em poço ou caldeirão.

As dolinas em prato ou em tigela, apresentam bordas de baixa declividade ( $10 - 12^\circ$ ), geralmente rasas, sendo a largura muito maior que a profundidade (razão 10:1), CVIJIC\* apud LINO (1989).

As dolinas em funil apresentam fundos estreitos e bordas íngremes. As dolinas em bacia tem fundo plano e bordas mais íngremes, se comparadas às dolinas em prato, enquanto que as dolinas em poço ou caldeirão são cilíndricas, profundas, e com vertentes rochosas verticalizadas.



Quando se implantarem em áreas falhadas, ou com acamamento não horizontalizado ou por razões petrográficas, originam-se vários tipos de dolinas assimétricas (Figura 17) que, de um lado, apresentam vertentes verticais e, de outro, vertentes de baixa declividade, geralmente com cobertura de materiais inconsolidados; por exemplo, uma dolina aluvial assimétrica, Figura 18.

\* CVIJIC, J. The Dolines. In: Geog. Abhandlungen, 5:225-76.

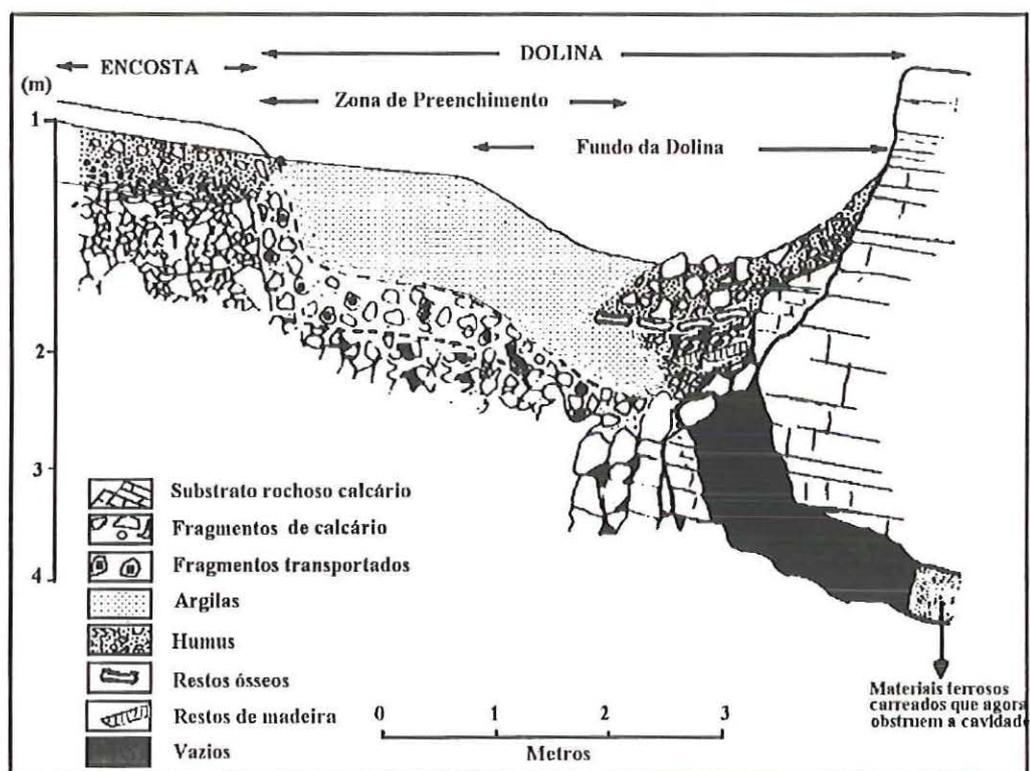


FIGURA 18 - Seção esquemática de uma dolina aluvial assimétrica, JENNINGS, 1987.

#### 2.4.3.5 SUMIDOUROS

Um sumidouro (ou *Aven* na França; *Jama* na Iugoslávia e *Algar* em Portugal), são aberturas na superfície do terreno, por onde águas pluviais, ou drenagens superficiais, infiltram no maciço.

Estas formas cársticas consistem num poço ou um conduto verticalizado, estreito e profundo, pelo qual as águas superficiais penetram, alimentando as águas freáticas (escoamento básico) ou as águas subterrâneas.

A origem de um sumidouro está relacionada ao fluxo de águas superficiais, que paulatinamente vão infiltrando nas fraturas da rocha que, por ação mecânica e química, alargam-na, podendo atingir grandes dimensões. Outra origem dos sumidouros, está relacionada a dolinas de colapso.

#### 2.4.3.6 ÚVALAS

A união de várias dolinas, pode produzir vastas depressões topográficas, com superfícies totalmente irregulares, denominadas úvalas, Figura 19.

O avanço lateral dolinas ou, ainda, o aparecimento de dolinas dentro de outras mais antigas dá a origem às secundárias, denominadas de dolinas superimpostas.

Em áreas dobradas e falhadas, as úvalas tendem ser alinhadas e alongadas segundo estes planos, enquanto que em platôs horizontais e homogêneos predominam as formas arredondadas de dolinas compostas.

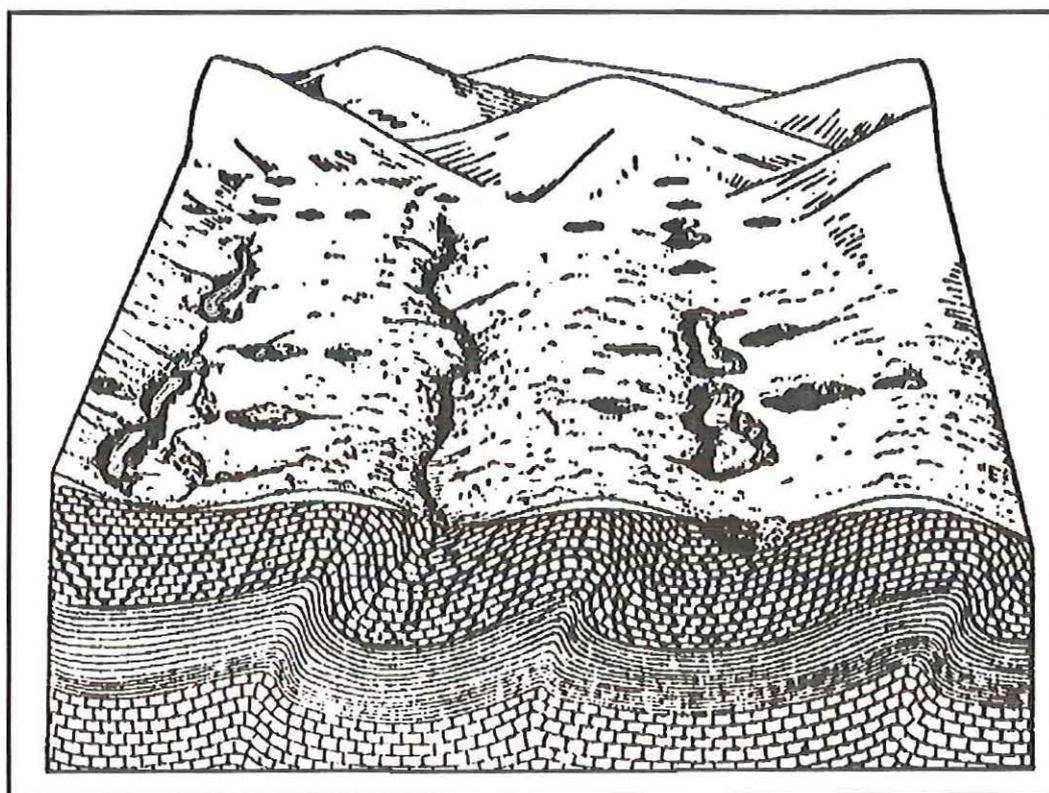


FIGURA 19 - Bloco diagrama demonstrando Úvalas que se formaram a partir da união de várias dolinas, DOLABELA, 1958.

#### 2.4.3.7 POLJÉS

O termo *poljé* significa planície e, geomorfologicamente, é atribuído para designar um extenso vale cárstico, fechado por todos os lados, com flancos abruptos e fundos planos e alguns morrotes isolados, recobertos por argilas residuais de descalcificação (*Terra Rossa*), depósitos lacustres e sedimentos aluvionares, Figura 20.

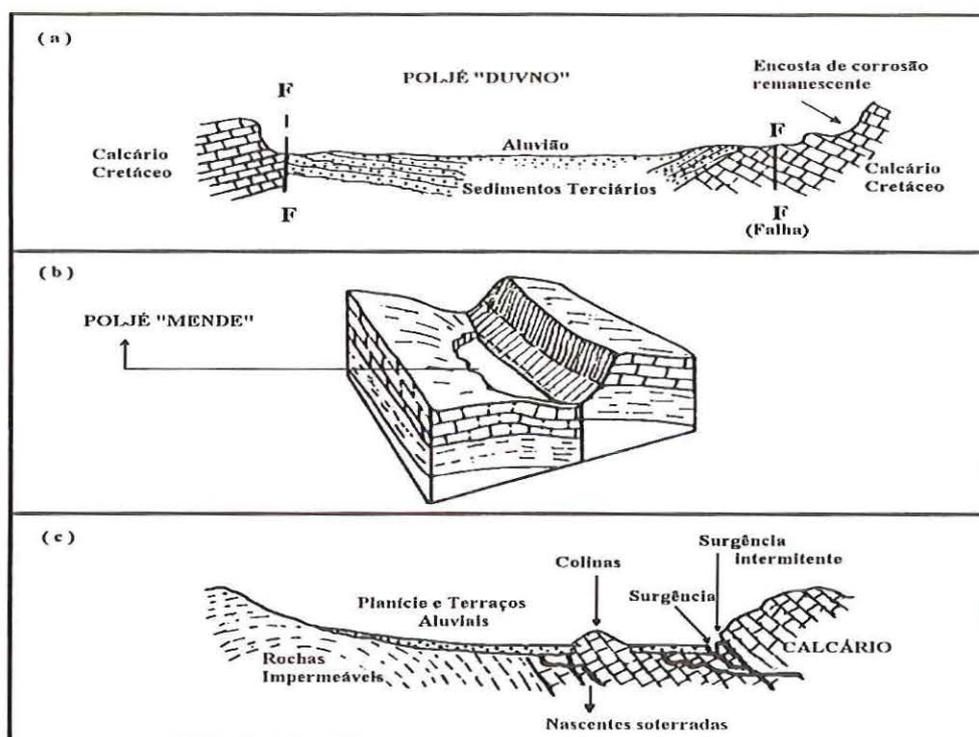


FIGURA 20 - Seções esquemáticas de vários tipos de poljés, JENNINGS, 1987.

O fundo dos poljés, muito utilizado para fins agrícolas, é caracterizado pela presença de vários pequenos morros residuais, denominados de *Hums*, *Butles*\*.

As reentrâncias que aparecem na porção inferior dos paredões rochosos, que delimitam um poljé, são devidas aos desabamentos e recuos por dissolução, causadas pelas águas de inundação. A inundação, frequente em tais relevos cársticos, pode ser causada por: (1) vazão permitida pelo sumidouro, menor que a taxa de água que entra no sistema; (2) presença de nascentes - *Ponor*\*\*; (3) ação antrópica; (4) impermeabilização natural da superfície do terreno pelas argilas residuais e, (5) inundação permanente pela alimentação de águas freáticas (surgência vaclusiana) com refluxo das águas pelo próprio sumidouro, em épocas de alta pluviosidade. Em todos os casos podem dar origem aos lagos cársticos.

Comumente, um poljé é recortado por uma drenagem que desaparece em sumidouros, dando origem aos vales cegos e vales secos. Os vales cegos são aqueles em que

\* *Hums* são colinas constituídas de rochas que resistiram a ação da dissolução, geralmente encontrados no fundo das uvalas e poljés. Também são denominados de *Mogotes* (morros isolados); *Tourelles* (torres isoladas); *Chicots* (rochedos residuais).

\*\* *Ponor* são minas de águas ressurgentes, através de um sistema de fraturas ou rede de drenagem subterrânea. Quando sua vazão é algo extraordinário, na ordem de centenas de m<sup>3</sup>/segundo, recebe o nome de *Fonte ou Surgência Vaclusiana ou Voclusiana*, em referência à Fonte de Vacluse, França (700 m<sup>3</sup>/seg).

a drenagem superficial é interrompida no fundo de um talvegue (fundo do leito de um rio), por imergir no subsolo, enquanto os vales secos são aqueles em que as drenagens não tem água, seja pelo rebaixamento do lençol freático, seja por fatores climáticos (estiagem).

Um poljé pode ainda ser denominado de emissivo, quando está inundado por águas pluviais ou emersão de águas subterrâneas; ou absorvente, quando está destituído de água superficial.

Quando o fenômeno for emissivo, pode fazer com que ocorram peixes em lagos cársticos, cujo tamanho é maior do que a permanência da lagoa poderia permitir, fato este que provavelmente ocorre na Lagoa do Sumidouro, em épocas de cheia do Rio das Velhas (MG), DOLABELA (1958), quando os peixes migram para estes lagos.

A concepção de que a formação de um poljé se dá a partir da evolução de uma dolina → úvala → poljé, é atualmente descartada por vários autores, entre eles, DOLABELA (1958); BÖGLI (1980); JENNINGS (1987). Estes autores acreditam que sua origem está relacionada a fenômenos de deslocamentos tectônicos e/ou erosão, sendo sua forma geomórfica diretamente relacionada à constante acumulação e percolação de águas superficiais e subterrâneas, que por sua vez diminuem a resistência dos materiais ao longo de zonas de fraquezas preexistentes.

DE MARTONNE\* apud DOLABELA (1958) supõe que esta forma de relevo, representa o estágio mais evoluído do relevo cárstico.

#### 2.4.3.8 CÂNIONS CÁRSTICOS

Os cânions cársticos, análogos àqueles não cársticos, são vales longitudinais de paredes abrutadas, Figura 21, situados entre planaltos; para o caso de rochas carbonáticas destacam-se como os mais notáveis o Cânion de Neretva (Montes Dináricos); Verdon (Alpes do Sul); Tam (França).

No Brasil, DOLABELA (1958), destaca trechos do cânion Rio das Velhas (MG), entre Ouro Preto e Belo Horizonte, embora nesta região as rochas não são predominantemente carstificáveis.

A origem dos cânions pode estar relacionada a (1) cursos de água, que nascem em áreas impermeáveis e, quando estas atingem trechos de rochas carbonáticas, inicia-se um processo de escavação do leito; (2) queda dos tetos de rios subterrâneos, neste caso devendo-se analisar o grau de descontinuidade do maciço rochoso sobrejacente ao curso de água pois,

---

\* DE MARTONNE (1932). *Traité de Géographie Physique*, 2<sup>o</sup> Tomo.

se muito fraturado, a origem estará relacionada a erosão provocada pelos fluidos de percolação a partir da superfície; e (3) a processos de colapsos de várias dolinas alinhadas, segundo uma direção - por exemplo, a Gruta Temimina no Vale do Ribeira (SP), LINO (1989).

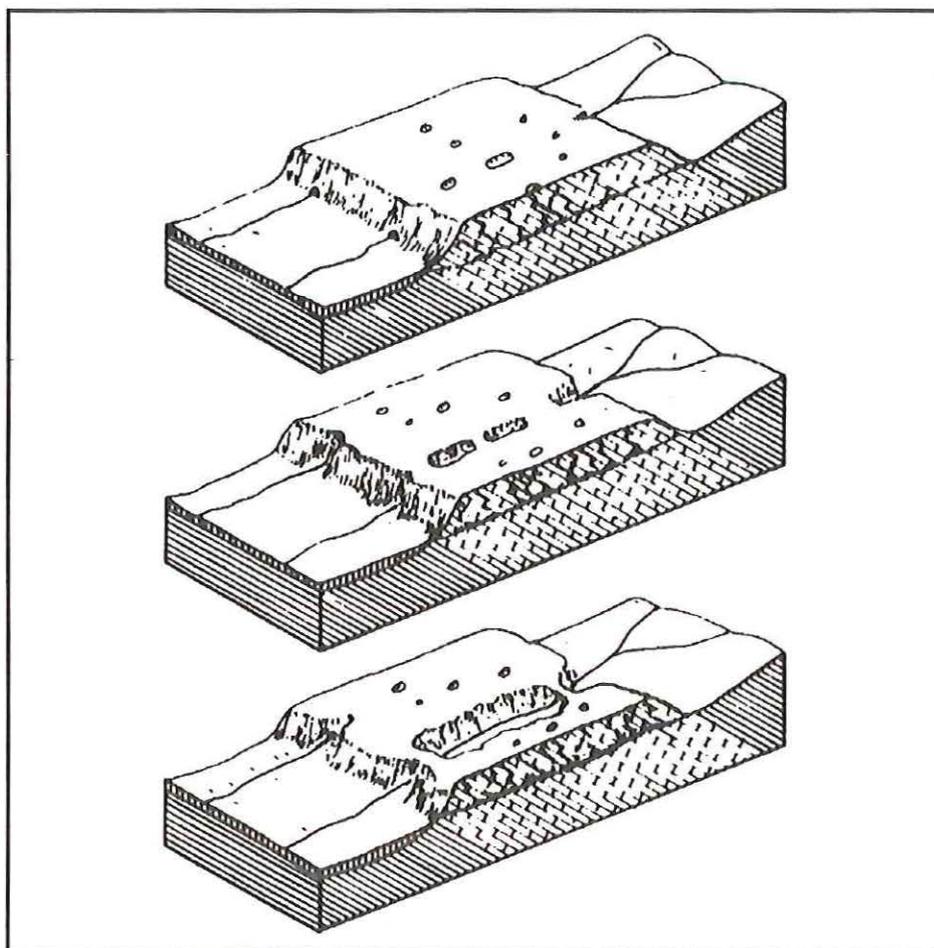


FIGURA 21 - Evolução de um Cânion, a partir de dolinas de colapso, JENNINGS, 1987.

#### 2.4.3.9 FLUVIOCARSTE

Corresponde a zonas cársticas com drenagens superficiais e subterrâneas que se alternam ao longo de uma determinada extensão. Suas nascentes normalmente encontram-se em regiões não cársticas (alóctonas).

Algumas características podem ser atribuídas para o reconhecimento de uma zona fluvio cárstica, BÖGLI (1980) e KARMANN (1994):

- diminuição da vazão de drenagem superficial a jusante, quando percorre sobre o terreno carbonático, podendo secar em épocas de estiagem;
- presença de vales cegos;

- divisores de água entre os sumidouros, de fundo de vales, são pouco desenvolvidos,
- presença de sedimentos fluviais alóctones ou de dimensões incompatíveis com a atual energia da drenagem; este fato indica um antigo sistema fluvial de maior energia;
- topografia de morrotes suaves e arredondados, com cones cársticos isolados entre os vales fluviais intermitentes.

O fluviocarste pode representar uma transição para um carste poligonal.

#### 2.4.3.10 CARSTE POLIGONAL

Este tipo de relevo está associado ao carste autigênico e holocarste, ou seja, quando toda a drenagem superficial é absorvida pelo terreno.

Assim, um carste poligonal, segundo WILLIAMS (1972) apud JENNINGS (1987), é marcado por uma drenagem incipiente, no fundo dos vales, que desaparece através dos sumidouros. Esta característica faz com que a superfície do terreno esteja repleta de morrotes isolados por este mesmo sistema de drenagem.

Estes morrotes, morfologicamente, são denominados: (1) morros cônicos (*cone karst, cockpits*), de encostas de média declividade e com cobertura vegetal densa; (2) pináculos ou morrotes (*pinnacle karst*), que constituem testemunhos rochosos pontiagudos com paredes íngremes e destituídas de vegetação; e (3) morrotes alinhados (*aligned karst*), que exibem uma forte tendência ao paralelismo entre as cristas e vales.

Em planta, um carste poligonal apresenta vários polígonos irregulares, delimitados pelos divisores de água, como esquematizado por KARMANN (1994), Figura 22.

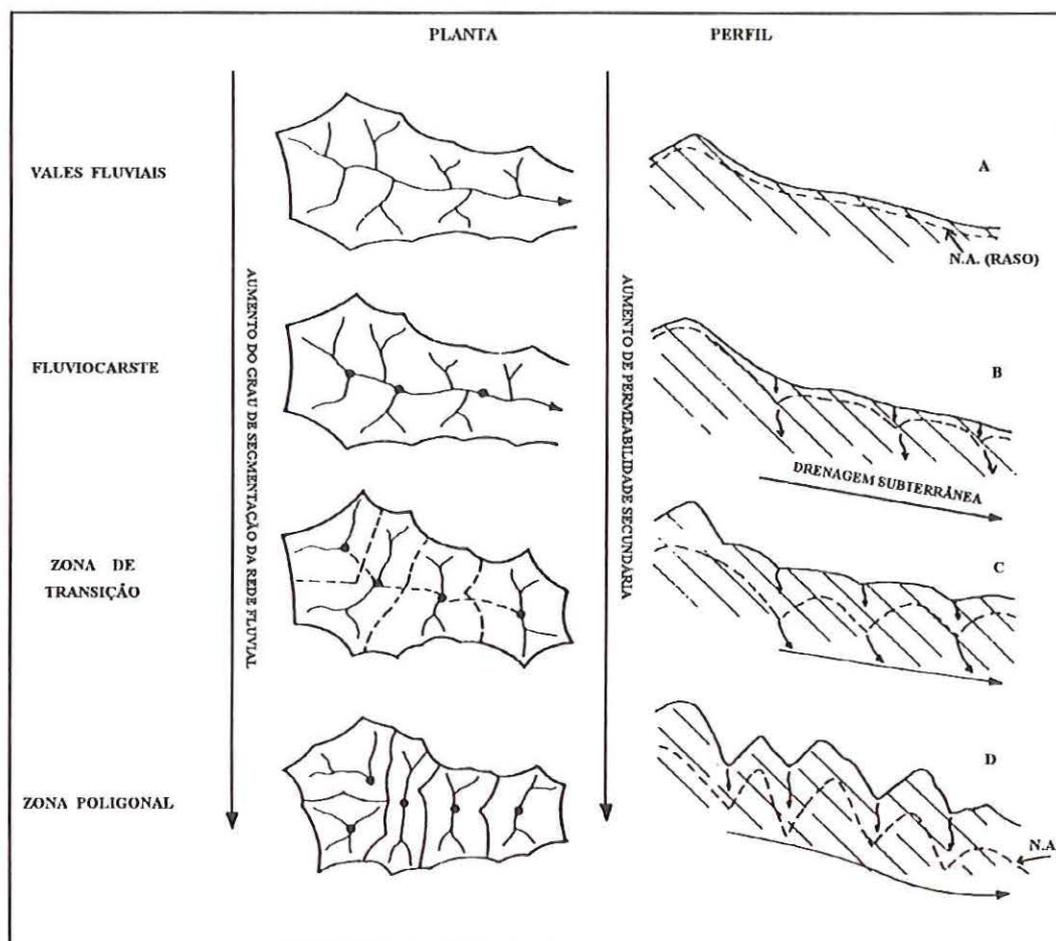


FIGURA 22 - Evolução de um carste poligonal a partir da drenagem fluvial.

(A) Drenagem superficial ativa e lençol freático raso; (B) Drenagem superficial parcialmente ativa, com rebaixamento do lençol freático nos pontos de absorção; (C) Drenagem superficial segmentada com instalação de dolinas e desenvolvimento de divisores entre os sumidouros; (D) Ampliação dos divisores entre os sumidouros e estabelecimento de bacias poligonais fechadas. KARMANN, (1994).

## ROCHAS CARSTIFICÁVEIS

### 3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

As rochas carstificáveis pertencem ao grupo de rochas solúveis, destacando-se as sedimentares (calcários, dolomitos, evaporitos, fosfatos), e metamórficas (mármore).

A seguir faz-se uma descrição das rochas sedimentares supracitadas, quanto as suas origens, materiais constituintes e classificações, não tratando-se das rochas carstificáveis metamórficas, pois aquelas representam a origem primária de todas os tipos de rochas solúveis.

As rochas sedimentares são geradas a partir de sedimentos alóctones e autóctones, sendo que quase todos os tipos de carbonatos, são originados por sedimentos autóctones. Enquanto que os mármore, são originados por processos metamórficos em carbonatos sedimentares preexistentes.

#### Sedimentos Alóctones ou Aloquímicos

Os sedimentos transportados de outras áreas para o interior de um ambiente de deposição (bacia sedimentar), são denominados de sedimentos alóctones, sendo constituídos por materiais terrígenos e piroclásticos, SELLEY (1992), formando os depósitos clásticos ou detriticos.

Os sedimentos alóctones podem incluir os calcários clásticos, porém são raros.

Terminologicamente, os sedimentos maiores que a fração areia, quando transformados em rochas sedimentares, são denominados de rochas *rudáceas* ou *psefiticas*, e constituem os conglomerados, ortoconglomerados, paraconglomerados, brechas intraformacionais e piroclásticas. Estas últimas são derivadas da mistura de clásticos com produtos das atividades vulcânicas, como cinzas, tufo e outros fragmentos.

Quando formadas por pela fração areia, são denominadas de *rochas areníticas* ou *psamíticas*, sem conotação mineralógica, por exemplo: arenitos, arcósios, grauvacas, etc.

E, quando representadas pela granulação silte e argila, são chamadas de rochas *pelíticas ou lutáceas*, conhecidas na literatura como argilitos (fração argila); siltitos (fração silte); folhelho (rocha argilosa com aspecto foliado) e lamitos (mistura de fragmentos pelíticos e areia).

#### Sedimentos Autóctones ou Ortoquímicos

São os sedimentos, que via de regra, precipitam-se dentro do ambiente de deposição, podendo contudo sofrerem algum processo de transporte de sedimentos químicos detríticos, dentro deste mesmo ambiente, constituindo a maioria das rochas carstificáveis.

Os sedimentos autóctones são classificados conforme mostra a Tabela 1:

TABELA 1 - Classificação dos sedimentos autóctones.

Tipos de sedimentos	Exemplos de Rochas Químicas
Sedimentos químicos (Ambiente subaquático)	Evaporitos, Gipso, Calcários
Sedimentos orgânicos (restos de animais e vegetais)	Carvão, Calcários, Esqueletos
sedimentos residuais	Lateritas, Bauxitas

Dentre as rochas químicas, destacam-se calcários, dolomitos (carbonatos), gipso, anidrita e halita (evaporitos), cujas propriedades serão descritas.

### 3.2 COMPONENTES FÍSICOS DOS CARBONATOS

Os componentes físicos das rochas carbonáticas referem-se aos elementos do arcabouço rochoso, ou seja: grãos, matriz, cimento e poros, Tabela 2.

TABELA 2 - Principais componentes das rochas carbonáticas.

COMPONENTES	TIPOS DE GRÃOS	
Grãos	Grãos Detríticos	Litoclastos / Intraclastos
	Grãos de Esqueletos	-
	Pelóides	-
	Concreções	Grãos Compostos Grãos Algais
	Grãos revestidos	Oólitos Pisólitos Grãos incrustados por algas
Matriz	Micrito /Argila/Silte	-
Cimento	Esparito	-
Poros		-

Fonte: SELLEY, 1992, modificado de LEIGHTON & PENDEXTER (1962)

### 3.2.1 GRÃOS

Os grãos são partículas que sustentam a estrutura da rocha, e geralmente situam-se na fração areia ou maior. Sendo classificados como detríticos, bioclastos, pelotas, concreções e grãos revestidos, Figura 23, SELLEY (1992).

Os grãos detríticos incluem os fragmentos de rochas não carbonáticas (litoclastos) que são transportados para dentro da bacia e, fragmentos carbonáticos (intraclastos), originados dentro da bacia de deposição. Estes podem ser originados por erosão contemporânea a deposição de outros sedimentos.

Os grãos formados por esqueletos, conchas, carapaças, ou restos, são denominados de bioclastos, e constituem, para as rochas carbonáticas, a classe mais importante quanto a origem dos grãos. Os tamanhos desses grãos dependem dos processos biológicos e da intensidade da energia de destruição que ocorreram na época de deposição.

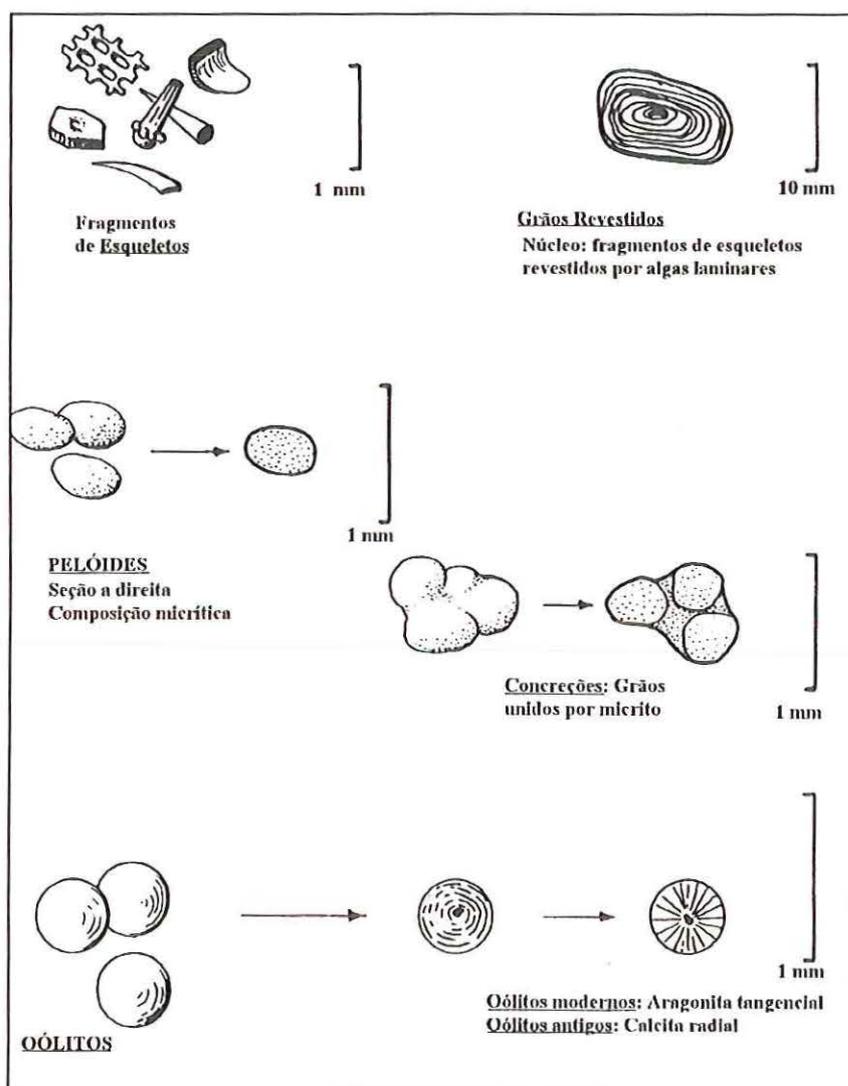


FIGURA 23 - Tipos de grãos das rochas carbonáticas, SELLEY, 1992.

SELLEY (1992) sumariza os principais organismos (esqueletos) formadores dos carbonatos, e relaciona-os com sua respectiva mineralogia, Tabela 3.

As pelotas ou *pellets* são grãos arredondados e de várias cores, sendo mais comuns os de coloração branca e acinzentados, com diâmetros entre 20-60mm (estrutura criptocristalina). Estes pelóides podem formar espessos depósitos de origem de águas rasas, por exemplo, lagunar.

TABELA 3 - Principais organismos formadores de rocha carbonática e sua respectiva mineralogia. Quando entre parênteses, denotam menor ocorrência.

Taxonômia	Aragonita (A)	Calcita (C)
<b>Algas</b> Vermelha/Verde/Azul	A	C
<b>Foraminíferos</b> Bentônicos/Plantônicos	A	C
<b>Esponjas</b>	A	C
<b>Celenterados</b> Estromatoporóides Corais Rugosa Tabulata Escleratina Alciolária	A   (A) (A)	C?   C C
<b>Briozoários</b>	(A)	C
<b>Braquiópodos</b>		C
<b>Moluscos</b> Lamelibrânquios Gastropodos Pteropodos Cefalópodos Belenóides	A A A A	C C
<b>Anelídeos</b>	A	C
<b>Artrópodos</b>		C
<b>Equinodermas</b>		C

Fonte: SCHOLLE\*, 1978 apud SELLEY (1992)

Os pelóides ou peletóides são originadas, em sua grande maioria, a partir de pelotas fecais de invertebrados marinhos, SELLEY (1992). Outros pelóides também podem ser derivados da recristalização de oóides preexistentes; micritização de grãos esqueletos; ou pela ação das algas endolíticas, e, distinguem-se dos oólitos, pela ausência das estruturas internas (concêntrica e radial); dos fósseis, pela ausência de esqueletos; e dos intraclastos, pela uniformidade do tamanho e forma, SUGUIO (1980).

\* SCHOLLE, P.A. (1978) - Carbonate rock constituents, textures, cements and porosities. *Am. Ass. Petrol. Geol. Mem.* 27, 241pp.

As concreções (*grapestone, lumps*) formam grãos, pela ação cimentante da matriz, entre dois ou mais fragmentos.

Os grãos revestidos tem formas esféricas, e apresentam um núcleo individualizado com arranjo dos cristais, em sua volta, na forma de anéis concêntricos ou fibras radiais. Sendo os mais comuns os oólitos (diâmetros 0,25-2,00mm); pisólitos (diâmetros 2-30,0mm) e oncólitos (diâmetros maiores que 30mm).

### 3.2.2 MATRIZ

São lamas carbonáticas microcristalinas (0,03 - 0,04 mm), podendo formar espessos depósitos de calcários afaníticos (massa homogênea) ou formar a matriz, propriamente dita, isto é, ocupam os espaços vazios entre detritos silicosos, argilosos ou siltosos.

A origem dessa lama calcária pode estar no próprio ambiente aquoso pela ação das algas calcárias verdes, que liberam diminutas cerdas de aragonita; através da ação mecânica do vento, marés, ondas, SUGUIO (1980), ou ainda, pela ação biológica da cadeia alimentar dos peixes, conchas bentônicas ou escavações feitas pelos invertebrados, SELLEY (1992).

Esta lama, denominada de matriz micrítica (micrito) e de origem sindeposicional, quando encontrada em depósitos recentes é constituída pelo mineral aragonita, enquanto que em depósitos antigos, por calcita, SELLEY (1992). Isto se deve porque a aragonita é um mineral muito instável quimicamente.

Também as argilas e siltes podem constituir a matriz de uma rocha carbonática.

### 3.2.3 CIMENTO

O cimento que também pode ser denominado como uma matriz pós-deposicional, preenche os espaços vazios entre os grãos que constituem as rochas carbonáticas.

Os principais tipos de cimento carbonáticos são: (1) a calcita espática (calcita cristalina grosseira, 0,02 a 0,10 mm, com limites entre cristais e clivagens bem definidas); e (2) os não carbonáticos, sendo os mais comuns, a calcedônia, glauconita, pirita, quartzo, feldspato, anidrita.

Nos espaços vazios, onde há o preenchimento parcial pelo cimento, também pode ocorrer o crescimento de cristais, denominados de drusas. Neste caso, ocorre a neoformação da calcita espática pela substituição química de carbonatos preexistentes, seja pela própria transformação polimórfica (mudança do mineral, aragonita ↔ calcita), ou seja pela

recristalização (desenvolvimento de calcita espática, a partir do crescimento de cristais de calcita preexistente).

Tanto a matriz como o cimento das rochas carbonáticas podem apresentar várias nomenclaturas, sendo estas em função da textura e forma dos cristais, Tabela 4.

TABELA 4 - Terminologias adotadas para cimento e matriz.

Terminologia	Características do cimento ou matriz
Acicular ou fibroso	Cristais alongados, geralmente de aragonita, perpendiculares a superfície dos grãos
Maciça	Grãos equigranulares
Criptocristalina	Cristais transparentes a translúcidos com diâmetro menor que 4 $\mu$
Microcristalina	Cristais translúcidos a opacos com diâmetro maior que 4 $\mu$ ou entre 4 - 30 $\mu$
Micrito / micrítica	Calcita microcristalina com diâmetro maior que 4 $\mu$ e menor que 30 $\mu$
Microespática	Matriz recristalizada
Espática	Cristais claros com diâmetro maior que 10 $\mu$
Peletal	Matriz e cimento compostos por peletóides com diâmetro entre 20 - 6 $\mu$
Drusas	É um tipo de cimento espático com cristais subedrais, geralmente formada nos espaços vazios
Sacaroidal	Cimento sacaroidal, comum em dolomitos

Fonte: FOLK (1959)

### 3.2.4 POROS

A porosidade das rochas carbonáticas, estudada pela petrofísica (arranjo espacial dos grãos), sempre foi relevante, principalmente pela importância dos espaços vazios como armazenadores de petróleo, águas subterrâneas e gases. E, em se tratando do desenvolvimento de feições cársticas, não se poderia dar menor importância, pois os espaços vazios que existem em todo o pacote rochoso, são os pontos de maior vulnerabilidade à dissolução e, portanto, um aspecto fundamental na formação de um sistema cárstico.

FEAZEL & SCHATZINGER\* apud SELLEY (1992) discutiram os fatores que governam a porosidade dos carbonatos, relacionados a seguir:

- soterramento mínimo (reduzida tensão de sobrecarga);
- arcabouço estrutural sólido;
- presença de minerais estáveis (alta razão da calcita em relação a aragonita);
- barreiras impermeáveis que impedem movimento de fluidos;
- preenchimento temporário dos poros, soluções, por exemplo: halita;
- presença de petróleo;

\* FEAZEL, C.T. and SCHATZINGER R.A. (1985) Prevention of carbonate cementation in Petroleum reservoirs. In: Carbonate Ciments. Soc. Econ. Pal. & Min. Spec. Pub. 36. 97-106.

Outros fatores que também influem na porosidade e permeabilidade são: granulometria; seleção dos grãos (coeficiente de uniformidade); forma dos grãos; e arredondamento e esferecidade;

A porosidade ( $n$ ) é dada em percentuais e, definida pela razão do volume total dos vazios ( $V_v$ ) e o volume total da amostra ( $V$ ). O índice de vazios ( $e=V_v/V_s$ ), é definido pela relação entre o volume de vazios com o volume de sólidos. Assim, para as rochas sedimentares, os valores de porosidade geralmente situam-se entre 5-25 %, e os extremos, para rochas carbonáticas, situam-se entre 0 % para *cherts* e 100 % para as cavernas.

As medidas de porosidade destas rochas podem ser determinadas por vários métodos, seja de forma direta ou indireta.

Os métodos diretos, em sua grande maioria, não quantificam a porosidade, mas o índice de vazios (porosidade efetiva). Destes métodos, destaca-se por sua eficácia, a extração a vácuo.

Outros métodos para a determinação da porosidade de materiais coerentes são o método da flutuação; método do porosímetro; método da balança de Westphal; método do densímetro de Stöe; método do volumímetro de Russel; Porosímetro de Beckman; método do flutuador de mercúrio. Para maiores detalhes consultar SUGUIO (1973).

#### 3.2.4.1 MORFOLOGIA DOS POROS

A forma dos poros, pode ser estudada por diferentes métodos de avaliação, destacando-se o exame da superfície, polida ou rugosa, com lupa manual, microscópio eletrônico e microscopia eletrônica de varredura.

Um método bastante eficaz, para determinar a morfologia dos poros, consiste em impregnar uma amostra de rocha, com uma resina insolúvel, para depois colocar toda a amostra tratada em um solvente adequado, que deverá dissolver somente a rocha. Após dissolvida, examina-se o resíduo, que permite fornecer dados quanto ao tamanho dos canais, tortuosidade, índice de vazios, tamanho dos poros, etc.

#### 3.2.4.2 CLASSIFICAÇÃO DOS POROS

A porosidade dos carbonatos é função do arranjo dos minerais da época de deposição, podendo ser modificada, posteriormente, pela compactação natural, processos diagenéticos, tectônicos e atectônicos, Tabela 5.

TABELA 5- Classificação dos tipos de porosidade.

CLASSIFICAÇÃO	TIPO	ORIGEM
Primária ou Deposicional	Intergranular e Intrapartícula	Sedimentação
Secundária ou Pós-Deposicional	Inter cristalino Intraestratal ou Fenestral	Cimentação
	Molde Vesicular	Dissolução
	Fratura	Tectônica Compactação Desidratação

Fonte: Selley, 1992

TIPOS DE POROSIDADE PRIMÁRIA

## - Porosidade Intergranular

É a porosidade determinada pelos espaços vazios entre os grãos detriticos, Figura 24A, que para o caso dos carbonatos, é modificada pela diagênese.

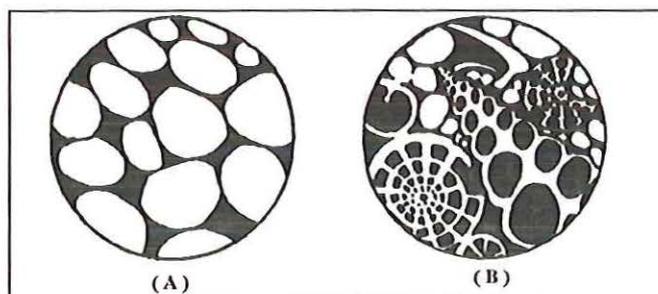


FIGURA 24 - Tipos de porosidade primária: (A) Porosidade intergranular; (B) Porosidade Intrapartículas.

Diagênese são todas as transformações físicas e químicas, que um sedimento sofre, desde a época de deposição até a completa litificação, excluindo-se influências tectônicas e vulcânicas, SUGUIO (1973).

Dessa forma, a diagênese refere-se às reações que ocorrem entre um mineral e outro; e entre minerais e fluidos intersticiais. Em ambos casos pode haver, simultaneamente, dissoluções e recristalização dos materiais envolvidos nas reações químicas.

Como exemplos, citam-se: uma lama calcária fina pode transformar-se em calcário cristalino grosseiro; um carbonato pode ser substituído por um fosfato; um mineral de argila pode converter-se em outro, etc. Percebe-se então, que os processos diagenéticos também deverão produzir efeitos na porosidade, Tabela 6.

TABELA 6 - Efeitos da diagênese sobre a porosidade das rochas carbonáticas.

Processos Diagenéticos		Efeitos na Porosidade
Cristalização		Decresce
	Recristalização..... calcita→calcita	não muda
Neomorfismo	Polimorfismo.....aragonita→calcita	decresce 8 %
	Substituição.....calcita↔dolomita	aumenta 13 %
Lixiviação	-	aumenta nos tipos molde e vesicular
Silicificação	Preenchimento com calcedônia	Decresce
	Substituição	não muda

Fonte: SELLEY,1992

#### - Porosidade Intrapartículas

Corresponde aos espaços vazios dentro dos grãos detríticos, cavidades de moluscos, corais e microfósseis, Figura 24B.

Também neste caso, pode haver uma diminuição da porosidade, face a infiltração da matriz micrítica e a instabilidade dos materiais frente aos processos diagenéticos.

### POROSIDADE SECUNDÁRIA

#### - Porosidade Intercristalina

É a porosidade que ocorre entre os cristais individuais que compõem uma rocha, sendo muito Comum nos evaporitos. De uma maneira geral, formam cavidades planares e retilíneas, podendo haver conexões entre elas, Figura 25a.

#### - Porosidade Intraestratal

A porosidade intraestratal, é conhecida na literatura estrangeira pela expressão *Fenestral Porosity*, e define as cavidades alongadas ou em forma de amêndoas, horizontais ou subhorizontalizados, com dimensões sempre maiores que os interstícios vazios inter ou intrapartículas, Figura 25b.

Estes espaços, típicos em rochas carbonáticas, são relacionados ao escape de gases de origem orgânica ou biogênica, SHINN\* apud SELLEY (1992), que também relaciona a forma mais ovalar como sendo pela geração de gás biogênico e, quando mais alongada, à decomposição de material orgânico como algas estromatolíticas, ou ainda, às saliências de argilas laminadas durante a exposição intramaré.

\* SHINN, E.A. (1983) - Birdeyes, fenestrae, shrinkage pores and loferites: a reevaluation. *J. Sedim. Petrol.* 53, 619-628.

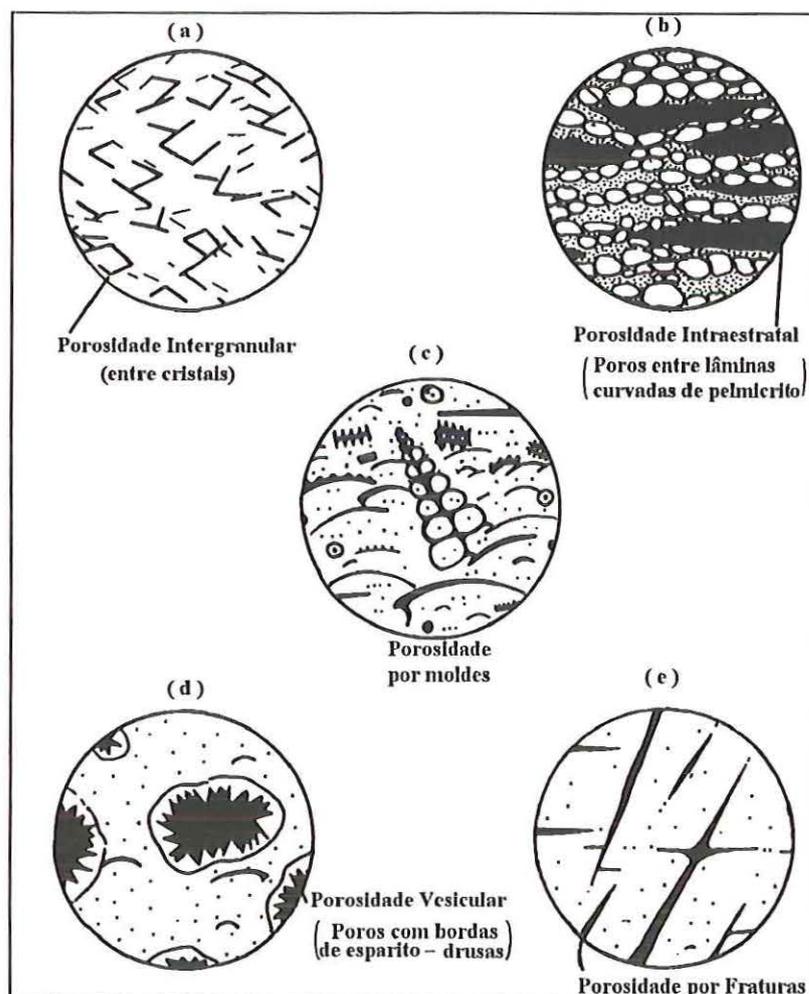


FIGURA 25 - Tipos de porosidade secundária, SELLEY (1992).

A dissolução intraestratal representa a dissolução ao longo de superfícies de contato entre estratos. À estas superfícies dá-se o nome de estilólitos ou superfícies estilolíticas. Esse processo de solubilização, segundo STOCKATE\* apud SUGUIO (1973), pode atingir entre 5 a 40% do volume inicial da rocha.

A dissolução intraestratal não deve ser confundida com a remoção de material em zonas superficiais, por fenômenos do intemperismo.

#### - Porosidade Estromática

Esta porosidade, geralmente com 10 cm de comprimento por 1-3 cm de largura, forma uma abóbada irregular no topo e paralela à laminação na base da camada. Se a

\* STOCKATE, P.B. (1922) - Stylolites: their nature and origin. *Indiana Univ. Studies*, IX, 1-97.

cavidade estiver parcialmente preenchida com lama e a superfície superior dessa lama estiver em ângulo com a superfície do terreno atual, significa que a porosidade é primária, e que todo o pacote sedimentar sofreu algum basculamento tectônico.

A porosidade estromática tem sido atribuída a esqueletos frágeis, bioturbação, ação de algas e recristalização da matriz micrítica.

#### - Porosidade por Moldes

A origem desse tipo de porosidade é devido a dissolução de materiais primários que se acumularam durante a sedimentação, formam poros com molde do organismo que se encontrava naquele ponto.

Assim, pode-se obter as mais variadas formas e tamanhos deste tipo de porosidade, a depender exclusivamente do tipo do organismo dissolvido, como exemplificado na Figura 25c.

#### - Porosidade Vesicular

São cavidades na rocha, que diferem dos moldes, por cortarem transversalmente as estruturas sindeposicionais das rochas, Figura 25d.

#### - Porosidade por Fraturas

Normalmente a porosidade devido a fraturas, Figura 25e, ocorre após a litificação por movimentos tectônicos, atectônicos e fenômenos do intemperismo. Embora possam existir as contemporâneas, com o rompimento de laminações, causadas pela própria compactação, deslizamentos, abatimentos, ou mesmo, pela dolomitização, que tende diminuir o volume inicial da rocha.

### 3.3 MINERAIS DE ROCHAS CARBONÁTICAS

Os minerais carbonatados são constituídos pelo radical  $(\text{CO}_3)^{--}$ , e associados com um ou mais cátions, sendo os mais comuns o Cálcio (Ca) e o Magnésio (Mg), podendo ainda apresentarem B; Fl; Na; S; K; Fe; N; Cu; Zn; Sr; Ba e Pb.

Os principais minerais constituintes das rochas carbonáticas, são o carbonato de cálcio (calcita e seu polimorfo instável - aragonita) e o carbonato de magnésio (dolomita). A Tabela 7 sumariza os minerais mais comuns e suas propriedades.

TABELA 7 - Minerais constituintes das rochas carbonáticas.

Mineral	Fórmula	Sistema cristalino	Ocorrência	Densidade	dureza	Outros cátions
Calcita	CaCO <sub>3</sub>	Hexagonal	cimento e matriz	2.72	3	Mg,Fe, Mn,Zn,Cu
Dolomita	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Hexagonal	-rochas cristalinas diagenéticas -associada a evaporitos	2.86	3,5 - 4	Fe,Mn, Zn,Cu
Aragonita	CaCO <sub>3</sub>	ortorrômbica	- esqueletos -reverte para calcita	2.94	3,5 - 4	Sr,Ba Pb,K
Magnesita	MgCO <sub>3</sub>	Hexagonal	Presente em menor quantidade em restos de esqueletos, juntamente com aragonita e calcita	-	-	-
Ankerita (dolomita ferrosa)	Ca(MgFe)(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Hexagonal	variedade da dolomita	-	-	-
Siderita	FeCO <sub>3</sub>	Hexagonal	concreções e oólitos	-	-	-

### 3.3.1 CALCITA E ARAGONITA

O carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) é o constituinte dominante dos calcários antigos e recentes, formando mais da metade do volume total dos carbonatos na natureza, e são representados pelos minerais de calcita e aragonita. Estes minerais podem ser encontrados na forma cristalina, microcristalina, cristais xenomorfos, crostas, formas fibrosas, oólitos e, podem ainda, constituir o cimento de outros tipos de rochas, por exemplo: arenitos.

Somente a calcita ocorre em calcários litificados, todavia, pode coexistir com a aragonita, desde que em depósitos recentes. A geração da aragonita, que se precipita em condições de baixa salinidade, pode ainda, originar-se por constituintes primários da rocha, por exemplo, fragmentos de conchas (veja Tabela 2).

A calcita, pode formar-se a partir da aragonita, nas seguintes condições: (1) por conversão rápida, provocada pela reação com água, em temperatura próxima a 400 °C, a 1 atm, PETTIJOHN (1957); (2) conversão lenta, dezenas de milhões de anos, sem a intervenção de água.

Tanto a calcita como a aragonita, são mais facilmente precipitadas em ambientes que tenham as seguintes condições físico-químicas:

<u>Aragonita</u>	<u>Calcita</u>
Mg em solução.....	Ausência de Mg
Temperatura elevada.....	Baixa temperatura
pH elevado.....	Baixo pH
Presença de Succinato de Na.....	Presença de (SO <sub>4</sub> ) <sup>2-</sup>
Presença de Sr, Ba, Pb.....	Compostos orgânicos (Citrato de Na)

Também os processos diagenéticos apresentam sensíveis contribuições para a formação da aragonita, calcita e dolomita, Figura 26.

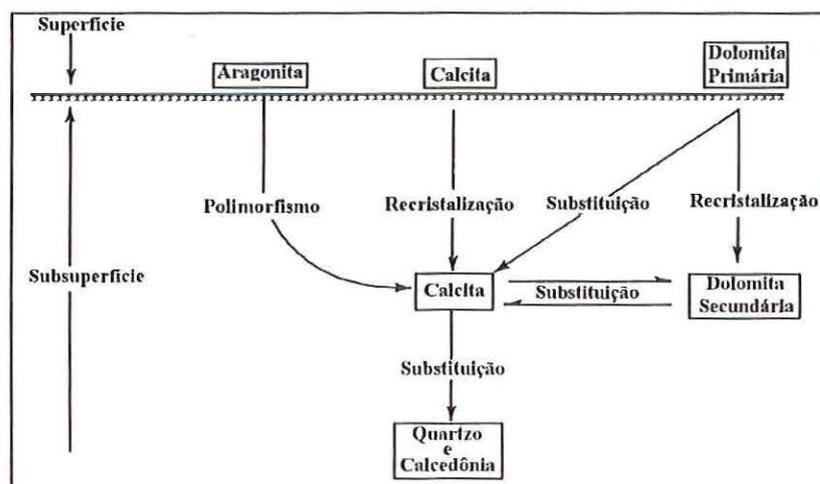


FIGURA 26 - Processos diagenéticos na formação dos principais minerais constituintes das rochas carbonáticas.

### 3.3.2 DOLOMITA

É um mineral composto por carbonato de cálcio e magnésio [Ca,Mg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>], é o principal constituinte da rocha denominada dolomito. Na literatura estrangeira o termo dolomita é atribuído tanto ao mineral como a rocha, embora alguns autores denominam a rocha como *dolostone*. Neste trabalho, denomina-se dolomita para designar o mineral e, dolomito, para rocha.

A origem da dolomita é muito discutida, sendo geralmente por substituição de calcários. A Figura 27 mostra esta complexidade.

Teoricamente, algumas condições básicas são necessárias para a formação de dolomitas: permeabilidade da rocha hospedeira; pressões diferenciais que permitam o movimento do fluido através dos poros; suprimento contínuo e suficiente de íons de magnésio; e presença de um fluido que esteja subsaturado de íons de cálcio, SELLEY (1992).

Baseados nestas condições, a dolomita pode ser de origem primária (deposição) ou secundária (origem diagenética), Figura 27.

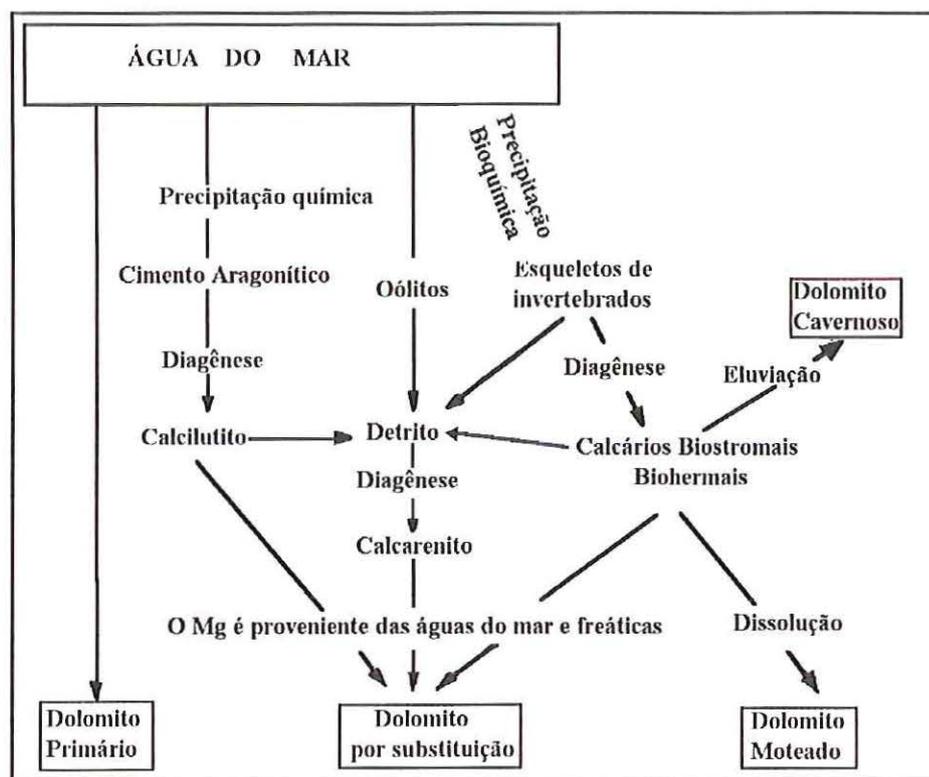


FIGURA 27 - Tipos de origens do dolomito, PETTIJOHN (1957).

### 3.3.3 SIDERITA E ANKERITA

Tanto a siderita [ $\text{Fe}(\text{CO}_3)$ ] como a ankerita [ $\text{Ca}(\text{Mg},\text{Fe})(\text{CO}_3)_2$ ] podem ser originárias pela precipitação direta, como por substituição química, desde que em ambientes de condições alcalinas.

Apesar de serem minerais mais raros, geralmente estão associados a depósitos sedimentares de minerais de ferro, sob a forma de concreções, bandas, e camadas horizontais ou contorcidas, por vezes, fraturados. Quando encontrados sob esta última forma, indicam movimentos de colapso no pacote rochoso.

Estes minerais são facilmente oxidados na presença de água, assim é recomendável observar, ao longo dos planos de clivagem e bordas dos cristais, manchas de óxidos de ferro, pois denotam percolação de fluidos subterrâneos.

### 3.3.4 MINERAIS NÃO CARBONÁTICOS

A sílica pode estar presente sob várias formas, sendo a mais comum a calcedônia (quartzo microcristalino), seja disseminada ao longo de todo o pacote rochoso ou, sob a forma

de nódulos, tanto em calcários como em dolomitos. O cristal de quartzo, com formas definidas, quando corta estruturas primárias é considerado autigênico, comum nos calcarenitos.

O feldspato também é um mineral comum em dolomitos e calcários, assim como a gipsita e anidrita, entretanto, mais persistentes nos dolomitos.

Os minerais de argila, constituem uma das principais impurezas das rochas carbonáticas, predominando os minerais do grupo da illita.

Outros minerais, mais raros, encontrados nos carbonatos são a glauconita (na forma de grânulos), colofana (fragmentos esqueléticos fosfáticos), pirita, marcasita, apatita, hematita, etc.

### **3.4 ESTRUTURAS DAS ROCHAS CARBONÁTICAS**

A avaliação das formas estruturais das rochas carbonáticas se deve, fundamentalmente, pela influência que exercem sobre a percolação das águas, principal agente propulsor das feições cársticas.

As estruturas das rochas carbonáticas podem refletir desde as condições ambientais da época de deposição; evolução tectônica; e outros processos geológicos. As estruturas, podem ser observadas em escalas regionais, afloramentos, amostras de mão, lupa, bem como pela microscopia eletrônica.

Em cada ambiente de sedimentação, que representa uma unidade geomórfica, MENDES (1984), poderão haver subambientes, caracterizados por processos físicos, químicos e biológicos específicos, e com estruturas sedimentares específicas.

Portanto, conhecendo-se as características desses processos, em cada subambiente, é possível prever os tipos de estruturas existentes em uma dada região carbonática, diferenciando aquelas que pertencem a fase singenética (primárias), das estruturas pós-deposicionais (secundárias), bem como sua distribuição ao longo do maciço rochoso.

As estruturas primárias são aquelas originadas durante o processo de sedimentação, estabelecidas sobre uma ou várias superfícies deposicionais.

As estruturas secundárias referem-se àquelas que se formaram após a sedimentação, quando o meio ainda apresentava-se sob condições hidrodinâmicas ou, àquelas onde a rocha já encontrava-se totalmente solidificada. Estas estruturas podem estar relacionadas a processos de diagênese, biológicos, e químicos, associados ou não aos movimentos tectônicos contemporâneos, regionais ou globais.

### **3.4.1 CLASSIFICAÇÃO DAS ESTRUTURAS PRIMÁRIAS**

#### **3.4.1.1 ESTRUTURAS PRÉ-DEPOSICIONAIS**

São aquelas que correspondem a forma da superfície basal de deposição (marcas basais), seja do fundo de uma bacia de deposição ou, interestratil, quando por algum período não ocorreu a sedimentação.

Estas estruturas geralmente estão correlacionadas às superfícies de erosão. Dependendo da dimensão considerada, podem refletir unidades geomórficas, canais fluviais, ou formas menores, tais como sulcos, superfícies rugosas, marcas onduladas, gretas de contração, turboglifos e marcas de objetos (fragmentos rochosos, madeira, conchas, etc).

#### **3.4.1.2 ESTRUTURAS SINDEPOCIONAIS**

As estruturas sindeposicionais se originam contemporaneamente a deposição das camadas de sedimentos, sendo observadas ao longo de todo o pacote rochoso, inclusive nas unidades de sedimentação, que compõem o próprio maciço rochoso.

#### Estruturas de Acamamento

A principal feição de identificação das rochas sedimentares é o acamamento, que é representado por unidades de sedimentação.

Uma unidade de sedimentação pode ser uma camada ou estrato, com mesma composição química, espessura variável, homogênea (maciça), ou apresentar pequenas lâminas paralelas. Uma camada também pode atingir desde alguns centímetros até várias dezenas de metros de espessura que, via de regra, é depositada sob condições físicas essencialmente constantes. Assim, um pacote de rochas sedimentares poderá ser constituído por várias camadas laminadas ou não.

#### Estruturas maciças

SUGUIO (1980) sugere que estas são formadas a partir de uma rápida deposição de materiais, em suspensão ou por recristalização diagenética (estruturas secundárias), sendo a ausência de laminações justificada pela falta de material transportado, por tração, durante a deposição.

Para o caso das rochas carbonáticas, em uma análise não muito cuidadosa, estas estruturas, aparentemente, poderão estar ausentes. Pois, laminações cruzadas e/ou paralelas,

geralmente são mascaradas, quando a rocha não está alterada, devendo-se recorrer a observação em superfícies intemperizadas e a microscopia eletrônica. Estas feições são comuns nos carbonatos da Formação Araras; Formação Irati; Formação Estrada Nova; e Grupo Açungui.

#### Estruturas Estratificadas Planares

São camadas laminadas e ocorrem quando há um equilíbrio entre as condições de fluxo e deposição, ou seja, a força da inércia se aproxima a velocidade de fluxo da partícula.

A distinção entre camadas e lâminas, é percebida por variações texturais, superfícies de disjunção, cor, tipo de material, e constituem os planos de estratificação.

Quando um conjunto de planos de estratificações não se interceptam, denomina-se estratificações plano-paralelas, enquanto que, quando interceptados em ângulos: estratificações cruzadas.

#### Estratificações cruzadas

Um maciço rochoso que apresenta vários estratos cruzados, evidencia que estas camadas foram depositados em taludes inclinados, e truncados durante a deposição pelas seguintes mudanças nas condições ambientais: variações da superfície erosiva; atividade tectônica; e não deposição ou mudanças abruptas na natureza dos materiais, Figura 28.

Os ambientes geológicos onde estes tipos de estratificações podem ser encontrados são: fluvial, litorâneo, eólico e marinho (caso dos calcários e dolomitos).

Na estratificação cruzada tabular, Figura 28A, as camadas frontais constituem superfícies que tendem ao paralelismo, porém inclinadas. O tipo acanalado, Figura 28B, é caracterizado por camadas frontais curvas, e as superfícies que delimitam cada sequência, com forma de canal.

Ainda podem existir outras variedades específicas, tais como a estratificação cruzada espinha de peixe (planícies de maré); cruzada recumbente (sedimentos fluviais); cruzada com concavidade para baixo (barras de meandros); preenchimento de canal (canais fluviais ou de erosão, microdeltas, praias e bancos costeiros) e cruzada de duna eólica, SUGUIO (1980).

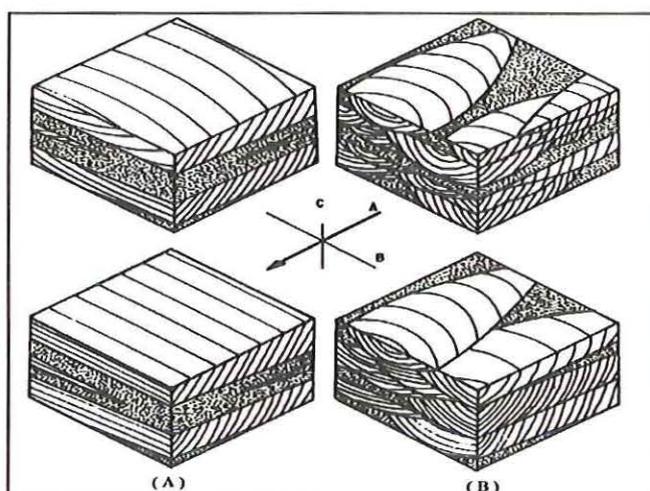


FIGURA 28 - Principais tipos de estratificações cruzadas, SUGUIO,1973.  
A seta indica o sentido da deposição.

### 3.4.1.3 ESTRUTURAS BIOGÊNICAS

Estruturas biogênicas ou orgânicas são derivadas de restos de animais e vegetais, vestígios de pegadas, perfurações e tubos, causados pela atividade dos organismos que viviam naquele ambiente de sedimentação.

A importância maior destas estruturas, para a sedimentologia, é porque indica os parâmetros biológicos ambientais. Para a carstificação, os restos de organismos constituem, pela fácil dissolução, uma importante origem da porosidade. A seguir, descreve-se os principais tipos:

#### Restos de Esqueletos

São concentrações de conchas, corais, ostras, mexilhões e outras partes duras de organismos, que ocorrem em ambientes de praias e no fundo de canais. Podem formar biohermes e bióstromos.

O grau de fraturamento destas carapaças, indica se o ambiente foi agitado ou não. Como exemplo de águas agitadas, cita-se o caso da Ilha Comprida (SP) e, de águas calmas, o Porto do Frade (RJ).

#### Estruturas de Bioperturbação

As atividades dos organismos podem destruir, total ou parcialmente, as estruturas inorgânicas primárias, tomando a rocha com um aspecto mosqueado. Estas estruturas podem ser representadas por pegadas, pistas e tubos.

Os tubos, poderão estar preenchidos com algum tipo de material, em caso contrário, poderão servir de conduto para a percolação de águas nas rochas carstificáveis.

### Estromatólitos

São estruturas organosedimentares produzidas pela superfície gelatinosa de algas que tende aprisionar e unir sedimentos. O sucessivo crescimento algal, juntamente com o aprisionamento dos grãos, tendem formar laminações crenuladas, semelhante à uma seção de um repolho, LAPORTE (1975). Estas feições crenuladas são atribuídas a dissecação, daí relacionar-se como originários de águas rasas e ambientes de sub-maré. Geralmente, estas laminações crenulares são encontradas sob a forma de colunas, pseudo-colunas, dômicas ou colunas com ramificações.

De uma maneira geral, as formas estão relacionadas ao tipo da alga, podendo haver uma infinidade de classes morfológicas. Por exemplo: quando as laminações são quase plano-paralelas, devem-se aos estromatólitos do tipo *Wedelia*; quando um pouco convexas, são do tipo *Collenia*; quando formam laminações bastante encurvadas e complexas, pertencem ao tipo *Cryptozoon*; e quando apresenta formas digitadas, ao tipo *Gymnosolen*, PETTIJOHN (1957).

Para maiores detalhes taxonômicos pode-se recorrer aos trabalhos realizados por BERTRAND-SARFATI et al (1992); CAMOIN & MONTAGGIONI (1994); PETTIJOHN (1957).

CAMOIN & MONTAGGIONI (1994). relata que no pré-cambriano, os estromatólitos formaram grandes recifes, embora com declínio proeminente no início do proterozóico, coincidindo com o aparecimento de restos de organismos. No início do paleozóico, os recifes estromatolíticos, estavam associados a outros organismos (esponjas, metazoários, corais) e, no final do paleozóico e durante o mesozóico, estes organismos tiveram significativo incremento volumétrico na formação de recifes. Os autores ainda salientam que os estromatólitos modernos, foram encontrados em vários ambientes, isto é, desde ambientes de água doce a águas supersalinas, de clima tropical a polar, incluindo ambientes marinhos de alta energia.

### Recifes, Biohermes e Bióstromos

O termo recife, significa na linguagem náutica, obstáculos perigosos a navegação. Entretanto, tem sido amplamente utilizado na literatura para designar um bioherme.

Um bioherme é um tipo de recife, de origem puramente orgânica, produto da ação construtiva destes organismos, que ligam os sedimentos. Portanto, os recifes podem ser

origem orgânica ou inorgânica, portanto, pode-se afirmar que todo bioherme é um recife, mas nem todo recife é um bioherme.

Os recifes de corais são elevações topográficas de constituição calcária com muito pouca impureza, em forma de lentes, sem estratificações. Porém, nas bordas, ocorrem interdigitações de lamias, areias e conglomerados calcários ou mesmo calcários cristalinos, Figura 29.

Os recifes do paleozóico nem sempre foram constituídos por corais, havendo também a contribuição de outros organismos, tais como algas, conchas, briozoários, foraminíferos, crinóides, etc. Enquanto que os recifes atuais, constituído por corais são denominados de franja, barreira e atol.

Os recifes de franja ocorrem junto a costa, crescendo em direção ao mar. Os de barreira, formam uma cordão rochoso, entre o mar, ao longo da linha de costa, impedindo a navegação. Os atóis, tem formas circulares, dando origem a lagunas internas.

Um bióstromo é um bioherme estratificado, tabular, constituído por estratos de organismos (restos de conchas, algas, crinóides, etc), formando corpos rochosos lenticulares. Estes depósitos estão associados a períodos calmos, sem registros de deposição de detritos clásticos, podendo estarem relacionados a destruição da vida daquela época, por exemplo, pela presença de águas com ácido sulfúrico.

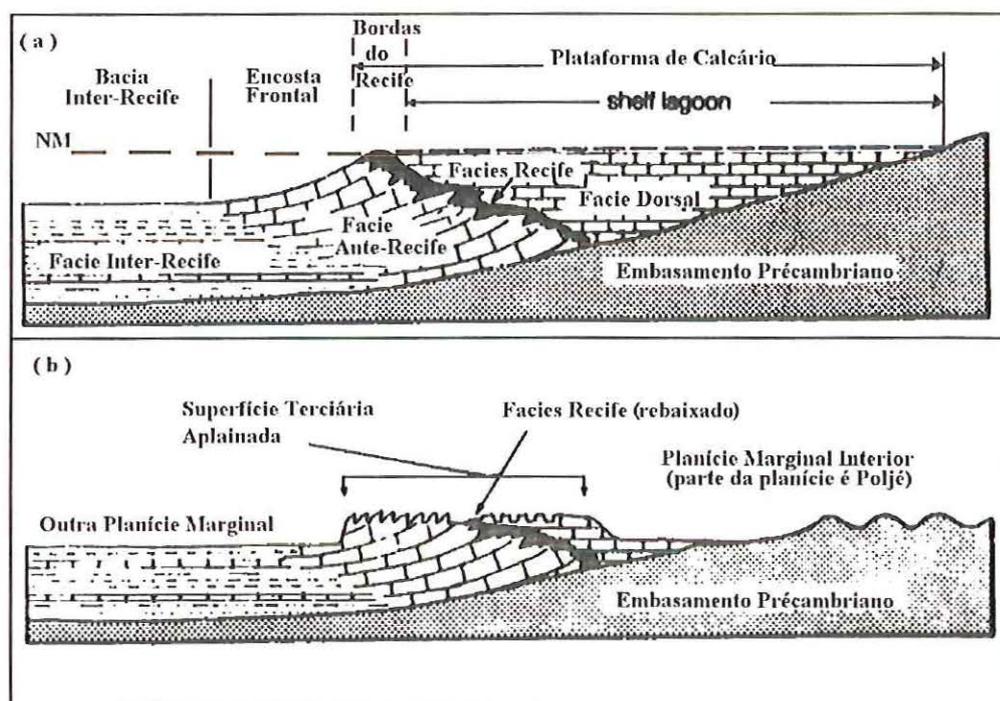


FIGURA 29 - Características e evolução cárstica de um recife, JENNINGS (1987).

### 3.4.2 CLASSIFICAÇÃO DAS ESTRUTURAS SECUNDÁRIAS

#### 3.4.2.1 ESTRUTURAS SEDIMENTARES QUÍMICAS

##### Concreções e Nódulos

PETTIJOHN (1957) relata que os nódulos formam corpos com contatos irregulares e superfícies protuberantes e, comumente, tem formas alongadas paralelas ao acamamento. Enquanto que, concreções, tem formas esféricas, discóides e elipsóides, sendo a mais autêntica com formas concêntricas.

A origem destas estruturas pode ser por segregação mineral (concentração secundária do cimento) ou pelo processo do metassomatismo (substituição ou adição de componentes químicos), MENDES (1984).

A constituição mineral destas estruturas, normalmente, corresponde ao cimento da rocha, sendo mais comum a sílica, calcita e óxido de ferro. Além destas, podem ocorrer na composição da hematita, limonita, pirita, marcassita, gipso, barita, óxido de manganês, fosfato de cálcio, fluorita, bauxita, etc, SUGUIO (1973).

Em calcários e dolomitos, é muito comum a presença de concreções ou nódulos de sílex, que podem ter as seguintes origens: (1) a sílica ser proveniente de testas de microrganismos (radiolários, diatomáceas, esponjas, etc); (2) origem vulcânica; e (3) origem climática, SUGUIO (1973).

Em climas tropicais, é comum a formação de concreções silicosas, ferruginosas, manganesíferas e carbonáticas, devidas a ação do intemperismo. Neste caso, ocorre a mobilização do óxido de ferro e carbonato de cálcio, em PH ácido, originário dos ácidos húmicos da matéria orgânica.

Outros tipos de concreções também podem ser consideradas, como é o caso das concreções de  $\text{CaCO}_3$ , onde o núcleo é constituído por conchas, assim como os ictiofósseis, que são concreções compostas por peixes, bastante comum na Chapada do Araripe (CE). Todavia, estes são de origem singenética, tendo suas formas originais preservadas por causa da rápida calcificação, não tendo tempo para se fragmentarem ou deformarem pela compressão de camadas sobrepostas.

##### Estilólitos

Constituem uma superfície de junção entre partes de um mesmo maciço rochoso,

caracterizadas por saliências e reentrâncias, estriadas em suas superfícies verticais, exibindo em perfil um padrão em zig-zag, Figura 30.

São estruturas originadas a partir da dissolução de calcários, causada pela pressão vertical de sobrecarga dos materiais sobrepostos, ou ainda, pela compressão tectônica, portanto, sempre perpendiculares aos eixos compressivos. A dissolução pode atingir 25% do volume total inicial do pacote rochoso, MOSSOP\* apud MENDES (1984).

Comumente são superfícies constituídas por argilas com matéria orgânica ou carbonosa, originadas a partir da fração insolúvel do calcário dissolvido. A espessura da superfície argilosa é função direta do volume dissolvido e, em proporção indireta, com o grau de pureza da rocha.

Esta superfície, dependendo da espessura pode atuar como uma camada impermeável e, possivelmente, com relações ao desenvolvimento de feições cársticas pretéritas ou mesmo atuais.

Os oólitos e geodos (formas côas) também podem ser consideradas como estruturas concrecionais.

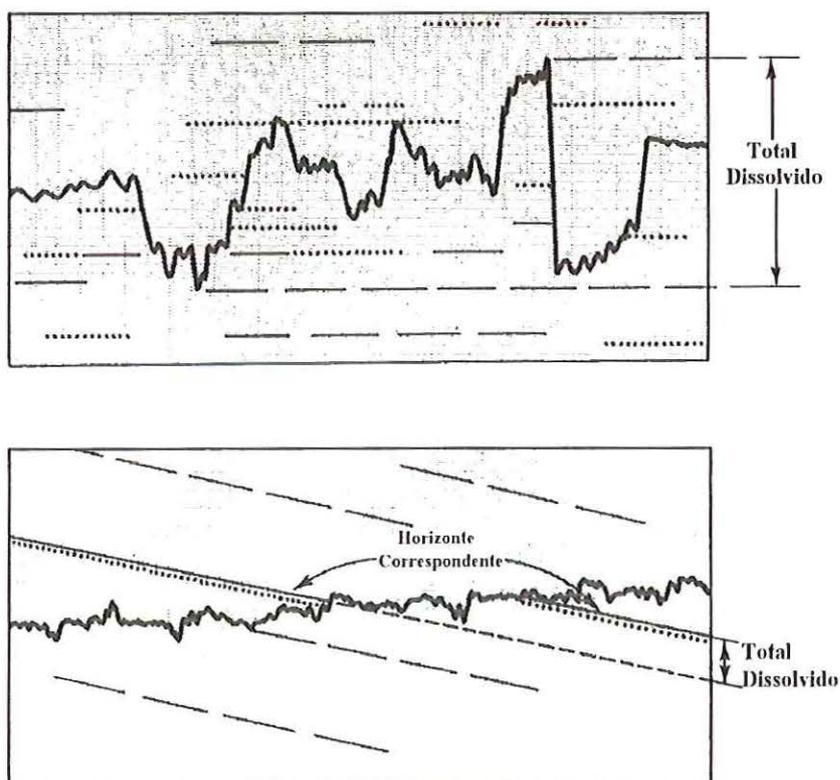


FIGURA 30 - Estilólitos e relações do volume dissolvido, SELLEY, 1992.

\* MOSSOP, G.D. (1972)- Origin of the peripheral rim, Redwater Reef, Alberta. Bull. Canadian Petrol. Geol., 20:238-280.

### Oólitos, Pisólitos e Oncólitos

São formas esféricas diferenciadas por suas origens e tamanhos. Os oólitos tem diâmetros entre 0.25 - 2.0 mm, enquanto que os pisólitos, são maiores que 2.0 mm. Os oncólitos são formados a partir de algas azuis e verdes que crescem em torno de um grão, permitindo a deposição de lamas calcárias em sua superfície pegajosa. Os grãos que constituem os núcleos são quartzo, feldspatos, fragmentos de concha, etc.

As origens destas feições podem estar relacionadas ao desprendimento de CO<sub>2</sub> e precipitação do CaCO<sub>3</sub> em (1) águas agitadas (lâminas concêntricas simétricas); (2) águas calmas (lâminas concêntricas assimétricas); (3) águas vertidas de tetos de cavernas (espeleotema - pérolas de cavernas); e (4) origem lacustre (estruturas complexas), CAROZZI (1964); SUGUIO (1973); SELLEY (1992). Todavia, os oólitos sempre estão relacionados a ambientes de alta energia mecânica, enquanto que os pisólitos, a ambientes calmos.

Estas formas esféricas, em seção, apresentam um mosaico radial, concêntrico ou cristalino, em torno de um núcleo (grão). Quando este mosaico for cristalino ou radial, geralmente está associado à substituição da aragonita pela calcita. Da mesma forma, são constituídos por aragonita em depósitos recentes, e por calcita em depósitos antigos.

### Geodos

São cavidades (cavidades miarolíticas) originadas pela dissolução de material mais solúvel que a rocha. Estas formas podem ocorrer tanto no interior do maciço como também ao longo de fraturas. Geralmente, estas estruturas estão associadas ao crescimento secundário de cristais de quartzo, calcita, gipsos, etc.

### Estruturas de cones encaixados (cone em cone)

Formam um conjunto de cones concêntricos e encaixados uns aos outros, de dimensões centimétricas. Geralmente, a forma deste conjunto é lenticular, com os ápices dos cones voltados para baixo e são constituídos de calcita fibrosa, com superfícies estriadas.

A origem, destes cones, também está relacionada à pressão superimposta pelos sedimentos com dissoluções associadas. As evidências são a presença de estrias; as interpenetrações dos cones e a presença de calcita fibrosa (dissolução e recristalização).

No Brasil, estas estruturas foram observadas nos calcários da cidade de Corumbá, MS; Grupo Aquidauna, MS; e nos carbonatos Permianos da Bacia do Paraná.

### Septárias

São corpos subsféricos caracterizados por fendas radiais, que se alargam para o

interior da estrutura. Via de regra, os cristais são orientados perpendicularmente as fendas, SUGUIO (1980), sendo constituídos por calcita ou por barita, pirita, marcassita, galena, calcopirita, etc.

A sua origem é relacionada à existência inicial de uma concreção, com o seu centro, em estado coloidal, que gradativamente se transforma em estrutura cristalina sólida, tendendo ao alargamento das paredes das fraturas em que se desenvolvem.

Estas estruturas são encontradas no Grupo Aquidauna (MT); Calcário Marium (SE); Formação Candeias, (BA); Formação Santa Maria, (RS); e na Chapada do Araripe, (CE).

### 3.4.2.1 ESTRUTURAS SECUNDÁRIAS INORGÂNICAS

#### Estruturas de Laminações Convolutas

São estruturas originadas pela liquefação de sedimentos subjacentes, SUGUIO (1980), provocando um movimento relativo entre as camadas, que ainda não sofreram uma completa litificação.

A deformação plástica afeta as camadas de sedimentos, formando pequenas dobras dos mais variados tipos. Embora, MENDES (1984), também considera que estas dobras possam ser originárias a partir de tensões de cisalhamento exercidas pela corrente dos próprios sedimentos e pela pressão de geleiras.

Quando uma camada de diferente competência sofre rompimentos transversais ao acamamento, que somada a pressão de sobrecarga, tenderá a afastar estes pequenos blocos rompidos. Neste caso, poderão formar-se estruturas do tipo *boudins* (*boudinage* sedimentar).

#### Brechas Intraformacionais

As brechas intraformacionais, podem originar-se pela (1) erosão e deposição interna, isto é, na própria bacia de sedimentação; (2) deformações atectônicas; (3) remobilização local de calcários contemporâneos a deposição; e (4) movimentos tectônicos sinsedimentares localizados, SUGUIO (1980).

#### Estruturas por Escorregamentos e Deslizamentos

As estruturas por escorregamentos referem-se a movimentos rápidos, e estão relacionados a falhamentos, terremotos, escorregamento de massa em taludes antigos, tempestades ou colapsos, provocados pela sobrecarga de sedimentos. Como consequência,

formam uma mistura caótica de sedimentos e camadas contorcidas com pequenas falhas e dobras.

As estruturas por deslizamento estão relacionadas a deformação quebradiça de sedimentos mais compactados, formando pequenos blocos. Neste caso, não ocorre o rompimento da resistência ao cisalhamento da estrutura interna de uma ou mais camadas.

### 3.5 CLASSIFICAÇÃO DAS ROCHAS CARBONÁTICAS

A classificação das rochas carbonáticas é bastante complexa, pois os autores utilizam-se de parâmetros diferentes para alcançar tais objetivos.

Dentre os principais critérios classificatórios, destacam-se: a composição química; tamanho dos grãos (granulometria); tipo de partículas; tipo e quantidade de poros; grau de cristalinidade; quantidade de argila; ambiente de sedimentação; considerações genéticas (precipitação química, mecânicas, bioquímica), etc.

As principais classificações datam de 30 a 40 anos atrás, sem que houvesse até então mudanças significativas. A seguir faz-se uma descrição das principais classificações utilizadas no meio geológico: PETTIJOHN (1957); FOLK (1959); DUNHAM (1962); LEIGHTON & PENDEXTER (1962); WRIGHT (1992).

#### Classificação de PETTIJOHN (1957)

PETTIJOHN (1957) defende uma classificação baseada na origem da rocha, onde deve-se eleger algumas propriedades significativas e mais marcantes, pois a grande maioria das classificações, que são de ordem genética, elegem apenas um critério e, muitas vezes erroneamente aplicado.

A classificação genética de PETTIJOHN (1957), define os calcários como Alóctones e calcários Autóctones, Figura 31.

PETTIJOHN (1957) também definiu os tipos petrográficos dos carbonatos baseados no teor de carbonatos e percentagem de argilas, associando-os com a terminologia usualmente utilizada em meios comerciais, Figura 32.

Outra classificação terminológica também elaborada por este autor, é baseada na porcentagem da calcita e dolomita, Figura 33.

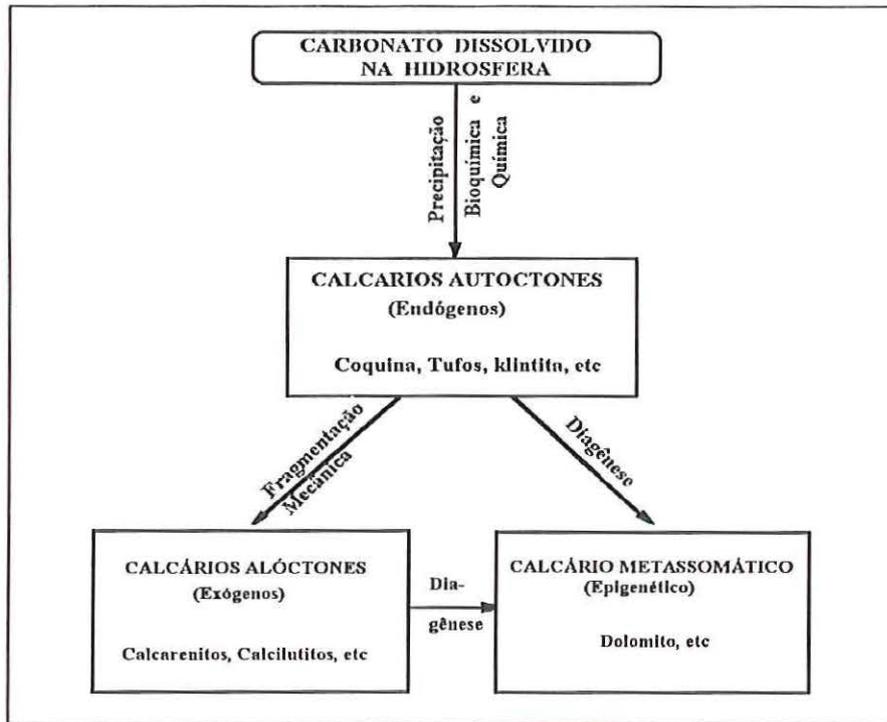


FIGURA 31 - Classificação genética dos carbonatos, PETTIJOHN, 1957.

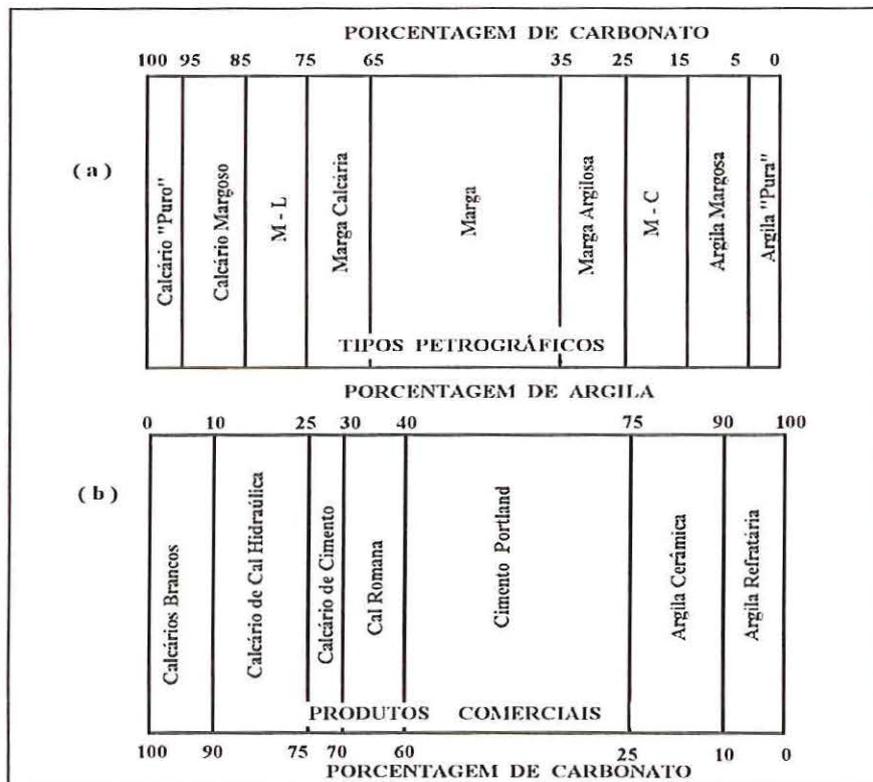


FIGURA 32 - (a) Classificação petrográfica dos carbonatos conforme a porcentagem de argila e carbonatos; (b) Relação dos termos comercialmente conhecidos, PETTIJOHN, 1957.

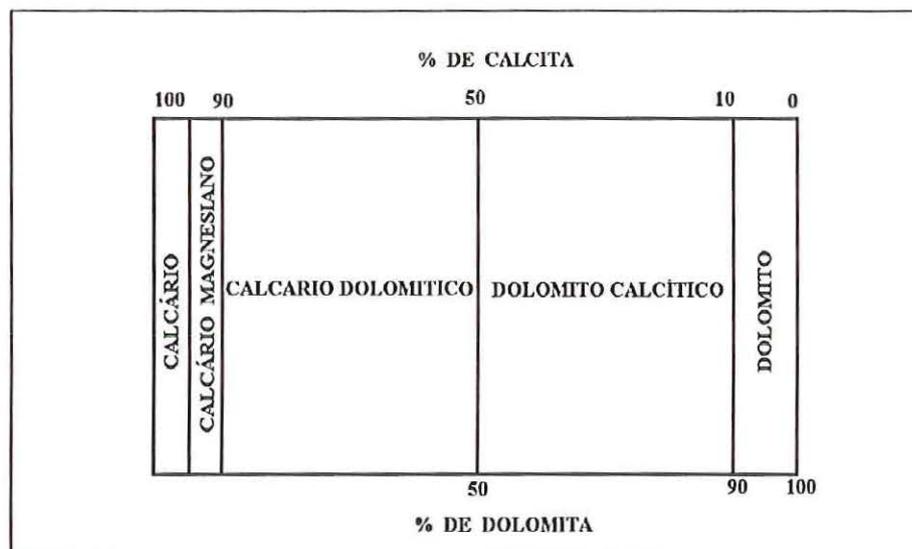


FIGURA 33 - Classificação dos carbonatos segundo a relação dos minerais calcita - dolomita, PETTIJOHN, 1957.

Os calcários alóctones são formados pela erosão, transporte e redeposição, portanto são depositados mecanicamente, sendo a maioria dos detritos de origem clástica, e secundariamente, fragmentos de rocha de recifes; detritos de conchas; ou fragmentos de origem química e bioquímica. Algumas destas rochas são conhecidas como margas; calcários oolíticos; calcários pisolíticos; conglomerados calcários; arenitos calcíferos, etc

Os calcários autóctones constituem a grande maioria dos carbonatos, e são originados pela (1) precipitação química de seus minerais, e (2) ação e acumulação *in situ* de componentes orgânicos, resultando em recifes, biohermes.

Desta forma, percebe-se que nem todos os calcários autóctones são resultados da atividade bioquímica.

Os calcários químicos\*: travertinos, caliche, tufo calcário e marga, precipitados puramente químicos, de soluções supersaturadas, se precipitam em lagos ou em determinados horizontes do solo.

PETTIJOHN (1957) estabelece um quadro de critérios que distingue os calcários autóctones e alóctones, Tabela 8.

\* Calcários Químicos: Os *calcários travertinos* e *tufos* são formados pela evaporação de águas de lagos e rios. O tufo é uma rocha esponjosa, porosa, forma depósitos pouco espessos e superficiais. O travertino, é um depósito mais espesso, mais bandado, comum em cavernas, incluem os estalactites e estalagmites. Ambos forma depósitos recentes. O *caliche* é um depósito rico em óxido de cálcio formado em solos de regiões semi-áridas, pela ação capilar. São indicadores climáticos e bastante resistentes a ação erosiva. A *marga* tem significados variados, geralmente empregado para designar depósitos carbonáticos argilosos, friáveis, de água doce.

TABELA 8. Critérios de distinção entre calcários alóctones e autóctones, PETTIJOHN (1957).

Calcários autóctones	Calcários Alóctones
Associados com lutitas	Associados com ortoquartzitos
Passa gradualmente para lutitas calcárias e fangolitas	Passa gradualmente a arenitos calcários, podendo estar interestratificados com ortoquartzitos
Os interstícios entre os fósseis estão preenchidos com calcários	Os interstícios estão preenchidos com calcita clara
Incrustação de fósseis briozoários	Contém fósseis trazidos transportados
Sem seleção granulométrica	Seleção granulométrica
Fósseis articulados	Fósseis não articulados
Estruturas de recifes	Estratificação cruzada

### Classificação de Folk (1959)

FOLK (1959) estabelece uma classificação para calcários essencialmente marinhos, em três grandes grupos, Figura 34. Este autor exclui destas classes, as rochas carbonáticas como caliche, travertinos, veios carbonáticos, tufos, camadas cone-in-cone, calcários de origem de água doce, recristalização de minerais e calcários esferulíticos.

O triângulo apresentado na Figura 34, classifica os calcários, sem o componente terrígeno, em três classes extremas: (1) aloquímicos; (2) matriz calcítica microcristalina e (3) cimento de calcita espática.

A classe I consiste em abundantes grãos aloquímicos cimentados por calcita espática. São calcários homogêneos, bem limpos pela elevada ação energética do ambiente de deposição, são análogos aos arenitos desprovidos de argila.

A classe II consiste em um a quantidade de componentes aloquímicos embebidos em uma matriz remanescente a deposição, onde a energia de deposição não é intensa e duradoura. Neste caso formam os calcários aloquímicos microcristalinos, semelhantes aos conglomerados e arenitos argilosos.

A classe III, se faz representar pelos calcários microcristalinos, sendo constituídos, essencialmente, por lama carbonática. São análogos aos lamitos (argilitos - rochas sedimentares clásticas).

A classe IV é representada pelos biolitos, e consistem em organismos litificados *in situ*, dando origem as estruturas do tipo biohermes e bióstromos, portanto, formam depósitos puramente orgânicos.

Para as rochas carbonáticas que contenham partículas transportadas (oólitos, intraclastos, fósseis e peletóides), assim como minerais precipitados quimicamente (cimento, lamas primárias ou minerais de recristalização ou substituição), FOLK (1959), apresenta uma nomenclatura, para calcários e dolomitos, baseada no tamanho dos grãos (textura), segundo a

Escala de Wentworth. Neste caso, a nomenclatura das rochas em função da classe textural, ou seja: Calcilutitos ou Dololutitos (0,004mm-0,0062mm); Calcarenitos ou Doloarenitos (0,062mm-1,0mm); Calcaruditos ou Doloruditos (1,0 - 64mm).

Estas nomenclaturas permitem um jogo de parâmetros texturais e mineralógicos, onde o prefixo define o tipo do grão e, o sufixo, denota a predominância do cimento ou matriz (calcita espática ou micrito), por exemplo: oosparito; pelmicrito e biopelmicrito. Este último, quando coexistem mais de um tipo aloquímico na rocha.

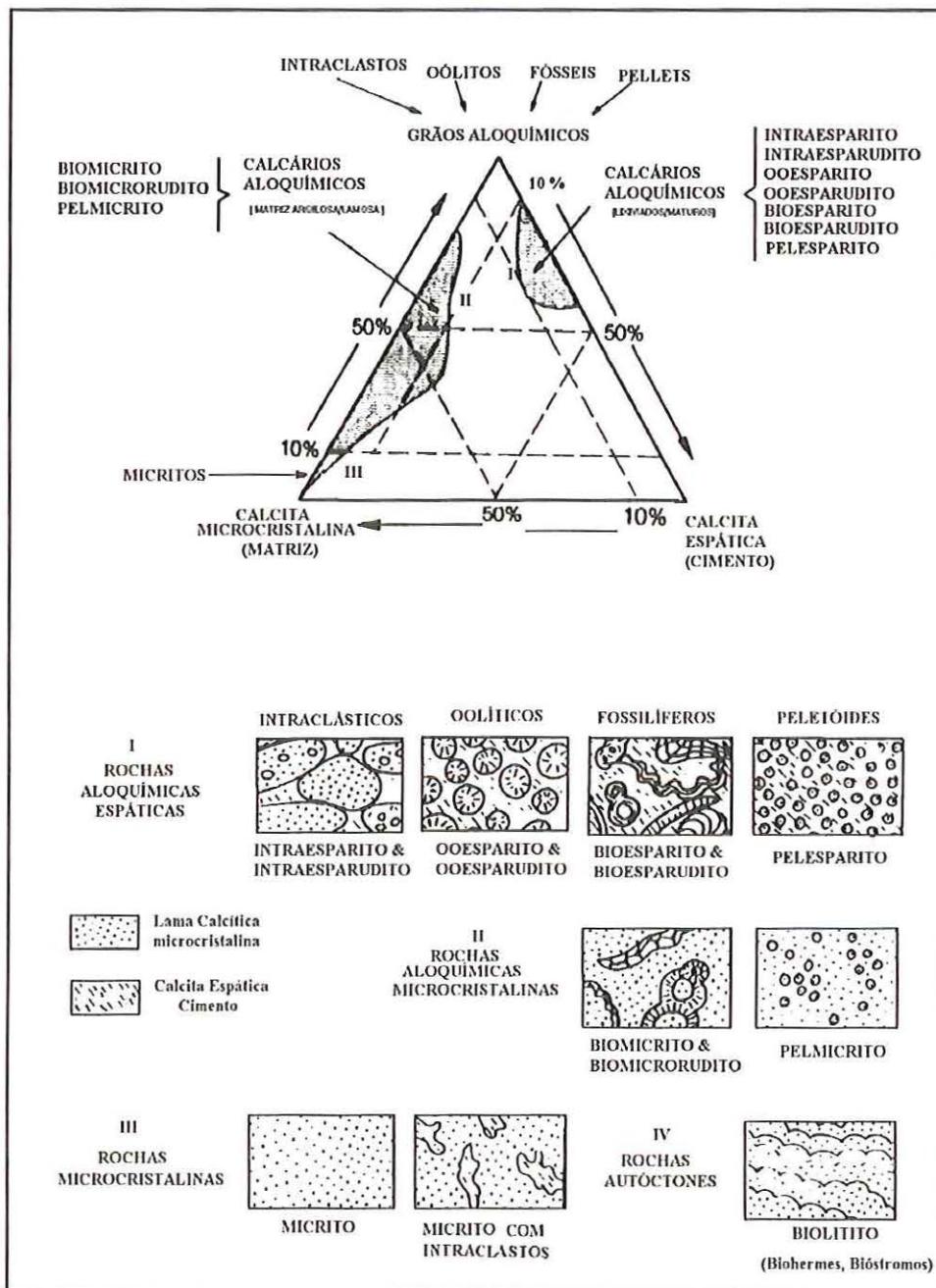


FIGURA 34 - Classificação dos carbonatos segundo FOLK, 1959.

Classificação de DUNHAM (1962)

DUNHAM\* apud SELLEY (1992), apresentou uma classificação baseada na textura deposicional, Tabela 9, enquadrando os carbonatos em três classes: (1) *boundstone*; (2) carbonatos cristalinos sem remanescentes da estrutura primária; e (3) o restante dos carbonatos, classificados em quatro grupos conforme a sustentação à massa rochosa, ou seja, grão ou lama cimentante.

Esta classificação, baseada na distribuição granulométrica e conteúdo da matriz, segundo SELLEY (1992), deve ser utilizada com reserva, quando para indicar as condições hidrodinâmicas do ambiente de deposição das rochas carbonáticas, em contraposição a outras rochas sedimentares, tais como os arenitos.

TABELA 9 - Classificação das Rochas Carbonáticas, segundo DUNHAM (1962).

NOMENCLATURA	Características	
<i>Boundstone</i>	corpos rochosos de origem biogênica	
<i>Mudstone</i> < 10 % grãos	arcabouço sustentado por cimento	contém cimento
<i>Wackstone</i> > 10 % grãos	arcabouço sustentado por cimento	contém cimento
<i>Packstone</i> > 5 % micrito	arcabouço sustentado por grãos	contém cimento
<i>Grainstone</i> < 5% micrito	arcabouço sustentado por grãos	
Carbonato cristalino	Estruturas primárias	destruídas pela recristalização

Os termos da nomenclatura apresentados na Tabela 9, foram mantidos na língua original, porque nem todos os termos tem correspondentes com a língua portuguesa. Em contrapartida, faz-se uma analogia destes termos com aqueles propostos por FOLK (1959):

DUNHAM (1962)

FOLK (1959)

<i>Boundstone</i> .....	biolitos
<i>Mudstone - carbonate muds</i> .....	micritos
<i>Grainstone</i> .....	espáticos
(grãos fração areia sem matriz micrítica)	
<i>Packstone</i> .....	microcristalinos
(Grãos arenosos com matriz)	
<i>Wackstone</i> .....	microcristalinos
(Grãos siltosos ou arenosos dispersos na matriz)	

As nomenclaturas para as rochas carbonáticas, apresentada por DUNHAM (1962), podem ser vistas na Figura 35.

\*DUNHAM, R.J. (1962) - Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: "Classification of carbonate Rocks - a Symposium" (W.E.Ham, Ed.), pp. 108-121. Am Ass. Petrol. Geol.,Tulsa

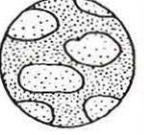
"MUDSTONE" < 10% Grãos	Lama calcária, Micrito, Calcilutito, Gesso			
	PELLETS	Fragmentos de Conchas	OÓLITOS	INTRACLASTOS
"WACKSTONE" > 10% grãos (suportados por uma matriz)	 Pelmicrito	 Biomicrito	 Oomicrito	 Intramicrito
"PACKSTONE" > 5% matriz (suportados por grãos)	 Pelmicroesparito	 Biomicroesparito	 Oomicroesparito	 Intramicroesparito
"GRAINSTONE" < 5% matriz	 Pelesparito	 Bloesparito	 ooesparito	 Intraesparito
"BOUNDSTONE" (Componentes orgânicos confinados)	Recifes, Biolititos			

FIGURA 35 - Nomenclatura das rochas carbonáticas segundo DUNHAM, 1962.

Classificação de LEIGHTON & PENDEXTER (1962)

LEIGHTON & PENDEXTER apud MONT'ALVERNE (1978) apresentaram uma classificação baseada nos teores de calcita, dolomita e impurezas, Figura 36.

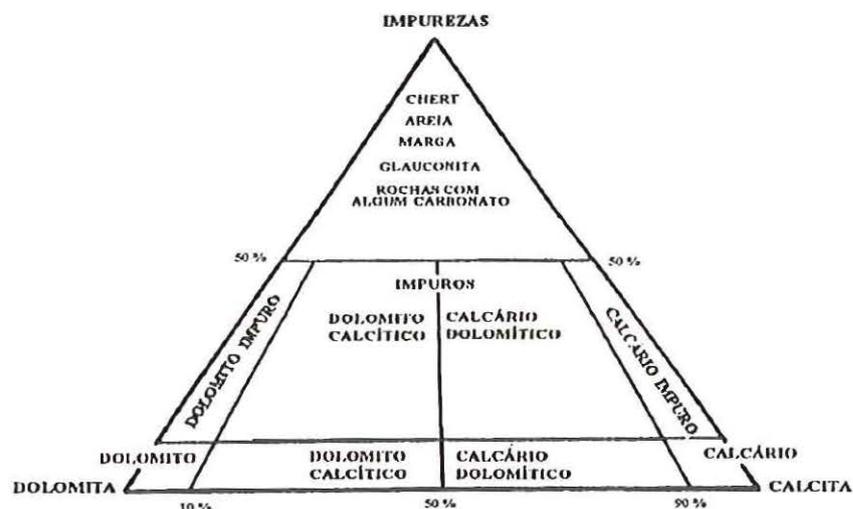


FIGURA 36 - Classificação dos carbonatos segundo LEIGHTON & PENDEXTER, 1962.

Estes autores ainda apresentam uma nomenclatura baseada na percentagem dos grãos constituintes das rochas, e nos tipos de grãos presentes, conforme Tabela 10.

TABELA 10 - Nomenclatura dos carbonatos de acordo com a percentagem e tipo de grãos na rocha, segundo LEIGHTON & PENDEXTER, 1962.

% Grãos	Tipos de Grãos				Grãos revestidos	Estrutura orgânica
	Detrítico	Esqueletos	Peletóides	Concreções		
≈ 90	Detrítico	esqueletal	peletal	concrecional	oólitos pisólitos	corais
≈ 50	detrítico-micrítico	esqueletal-micrítico	peletal-micrítico	concrecional-micrítico	oólítico-micrítico	coral-micrito
≈ 10	micrítico-detrítico	micrítico-esqueletal	micrítico-peletal	micrítico-concrecional	micrítico-oolítico	micrito-coral

#### Classificação de WRIGHT (1992)

WRIGHT (1992) apresentou uma revisão que envolve as classificações anteriores, baseada nos tipos texturais, classificando-os conforme o regime deposicional, atividade biológica e processos diagenéticos, Figura 37, fazendo correlações, alterações e adições terminológicas de tipos litológicos, que podem ser observadas na Tabela 11 .

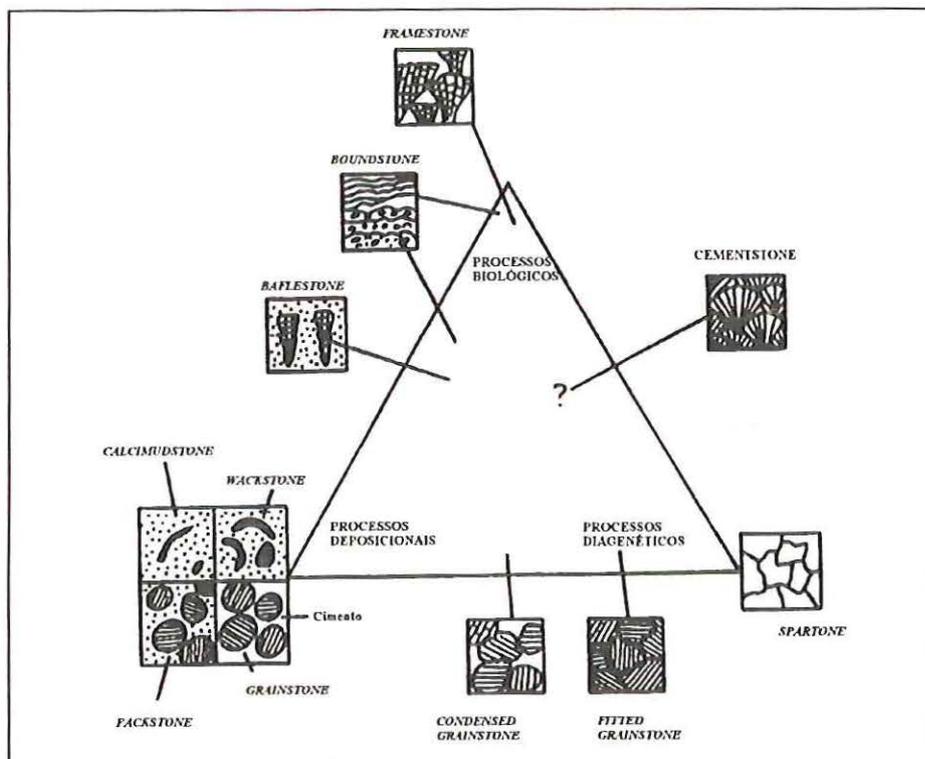


FIGURA 37 - Classificação das rochas carbonáticas segundo WRIGHT, 1992.

Também neste caso, foram mantidos os termos da terminologia original, entretanto, para uma melhor compreensão, a seguir faz-se uma rápida descrição dos mesmos:

- Framestone* como uma rocha calcária orgânica com preservação das estruturas,
- Boundstone* corresponde a rochas de constituição orgânica, por exemplo: biolitos,
- Bafflestone* são calcários com organismos imersos na matriz, que influenciaram a sua sedimentação,
- Calcimudstone* são rochas com matriz predominante (calcilitos), em substituição ao termo *mudstone* proposto por DUNHAM (1962),
- Wackstone* e *Packstone* são termos próximos, onde os espaços intergranulares são preenchidos por uma matriz que pode ser composta por organismos, ao mesmo tempo, *Packstone* podem ter sido originados da alteração ou compactação de *Wackstone*,
- Grainstone* são calcários cristalinos, quando alguns os grãos estão em contato dá-se o nome de *Condensed grainstone*, e quando todos os grãos estão justapostos- *fitted grainstone*, este contato é microestilolítico, ou seja, por dissolução, provocado por pressões durante a sedimentação,
- Spartone* correspondem aos esparitos,
- Cemenstone* são calcários biogênicos constituídos por cimento fibroso, originado pela substituição ou recristalização por processos diagenéticos, sem obliterar a textura e estrutura primária.

TABELA 11 - Nomenclatura revisada por WRIGHT, 1992.

PROCESSOS POR DEPOSIÇÃO				PROCESSOS BIOLÓGICOS			PROCESSOS DIAGENÉTICOS			
ARCABOUÇO POR MATRIZ (Argila & Silte)		ARCABOUÇO GRANULAR		ARCABOUÇO POR ORGANISMOS "in situ"			NÃO OBLITERATIVO		OBLITERATIVO	
< 10% GRÃOS	> 10% GRÃOS	COM MATRIZ	SEM MATRIZ	Cimentação por organismos	Organismos destroem o cimento	Domínio de organismo rígidos	Domínio de cimento	Alguns grãos em contato microestilolítico	Majoria dos grãos em contato microestilolítico	Cristais > 10 µm
"Calci-mudstone"	"Wackstone"	"Packstone"	"Grainstone"	"Boundstone"	"Bafflestone"	"Framestone"	"Cemenstone"	Condensed Grainstone"	"Fitted Grainstone"	"Spartone"
CALCÁRIOS GRANULARES										
		"Floatstone"	"Rudstone"							Cristais < 10 µm
		Grãos maiores que 2 mm								"Micro-spartone"

### 3.6 CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA DOS CARBONATOS

O conteúdo dos minerais acessórios, tais como o quartzo, minerais de argila e outros elementos não carbonáticos, influenciam as propriedades geotécnicas das rochas carbonáticas.

De uma forma geral o teor de quartzo é benéfico às propriedades geotécnicas, pois é um mineral estável química e mecanicamente, enquanto que as argilas, face suas propriedades cristalinas, tendem prejudicar o comportamento geotécnico dessas rochas.

Genéricamente, as rochas carbonáticas (calcários e dolomitos), apresentam as seguintes características geotécnicas:

- O Coeficiente de expansão até 300 °C é baixo, em torno de  $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ;
- A resistência a compressão simples é muito variável (175 - 2000 kg/cm<sup>2</sup>);
- A resistência ao cisalhamento varia entre 85 - 210 kg/cm<sup>2</sup>;
- A massa específica está entre 2,3 - 2,7 g/cm<sup>3</sup>;
- O módulo de elasticidade varia no intervalo de  $3 \times 10^6$  a  $6 \times 10^6$

TOURENQ & ARCHIMBAUD (1974), baseados em parâmetros estatísticos, concluíram que a mineralogia, porosidade e a estrutura presentes na rocha, são fundamentais para a caracterização geotécnica dessas rochas. Para a correlação estatística, estes autores basearam-se nos ensaios de (1) Porosidade, obtida através da velocidade sônica e método de Youngs; Resistência de Compressão Última, através da resistência a tração e dureza; e (3) *Driability*, obtida através do ensaio de perda por abrasão e fragmentação dinâmica.

RODRIGUES (1988), baseando-se apenas nas propriedades físicas, realizou testes de porosidade (n) e de deformação de expansão para propor um ábaco que classifica as rochas carbonáticas, em termos geotécnicos, conforme mostra a Figura 38.

A Figura 38 apresenta, na ordenada, os valores de deformação divididos em 4 grupos (A,B,C e D), com valores em ordem crescente, e, na abcissa, os valores de porosidade subdivididos em 5 grupos (I,II,III,IV e V). A combinação destes parâmetros, enquadra o tipo geotécnico da rocha, conforme o significado de cada grupo, ou seja:

<u>Porosidade</u>	<u>Deformação de expansão</u>
<b>I</b> - Porosidade muito baixa	A - Muito baixa deformação
<b>II</b> - Porosidade Baixa	B - Baixa deformação
<b>III</b> - Porosidade média	C - Média deformação
<b>IV</b> - Porosidade alta	D - Alta deformação
<b>V</b> - Porosidade muito alta (sem deformação)	

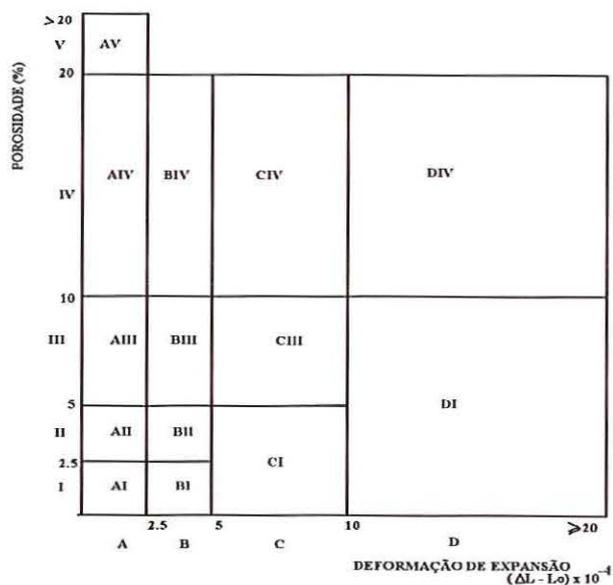


FIGURA 38 - Classificação geotécnica dos carbonatos, RODRIGUES, 1988.

Os testes de porosidade realizados por RODRIGUES (1988), foram obtidos pela densidade hidrostática, saturando-se a amostra com vácuo.

Para obtenção da deformação de expansão foi realizado o ensaio proposto por NASCIMENTO et al\* apud RODRIGUES (1988). Este parâmetro é medido quando a amostra está imersa em água destilada, tendo seu resultado expresso pela relação  $\Delta L/L_0$ , onde  $\Delta L$  é a deformação de expansão e  $L_0$  é o comprimento inicial da amostra. Os resultados, para Portugal, são apresentados na Figura 39.

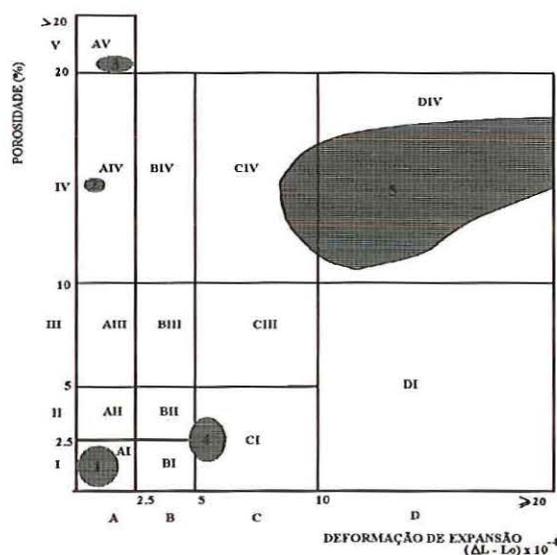


FIGURA 39 - Exemplo do uso da classificação geotécnica das rochas carbonáticas segundo RODRIGUES, 1988.

\* NASCIMENTO, V.; OLIVEIRA, R.; GRAÇA, R. (1968) - Rock swelling test. *Int. Symp. Rock Mechanics*, Madrid, pp.363-365.

## PROCESSOS DE CARSTIFICAÇÃO

### 4.1 FENÔMENOS CÁRSTICOS

A carstificação pode ser definida como um conjunto de transformações físico-químicas que se produzem numa região de rochas solúveis, como consequência da ação combinada com outras substâncias, tais como:  $\text{CO}_2$ ; ácidos húmicos; água; entre outras.

As principais rochas carstificáveis, caracterizadas por sua grande ocorrência na natureza, são as rochas carbonáticas, que apresentam em comum o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Nominalmente, são os calcários e os dolomitos (rochas sedimentares) com suas respectivas variedades, e os mármore, que constituem o grupo de rochas metamórficas.

Os evaporitos, completam o grupo de rochas carstificáveis, destacando-se o gesso (gipso), sal gema (halita) e anidrita. Estas rochas apresentam ocorrências mais restritas em clima tropical, face o alto grau de solubilidade.

#### 4.1.1 PROCESSOS QUÍMICOS

Os processos químicos atuam através da dissolução dos constituintes mineralógicos, que dependem particularmente da composição química das rochas, e da acidez da água de circulação.

A composição química está diretamente relacionada ao conteúdo mineralógico da rocha, que por sua vez apresenta diferentes minerais com diferentes características de solubilidade.

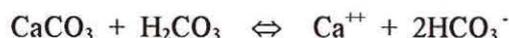
Assim, a susceptibilidade à carstificação das rochas varia com a composição mineralógica, ou seja, quanto maior o percentual de minerais insolúveis (argilas, sílica, etc) na constituição da rocha, menor a sua solubilização e carstificação.

O segundo fator está relacionado ao grau de acidez da solução aquosa que atravessa o meio, podendo ser um ácido forte ou fraco, KRAUSKOPF (1972).

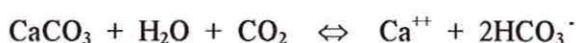
Um ácido forte dissolve o carbonato segundo a equação:



Na natureza, exemplos desta reação ocorrem quando no meio há presença e alteração química de minerais com sulfetos. Entretanto, em grande parte as condições de solubilização natural envolvem ácidos fracos, para o caso dos carbonatos, este é dissolvido pelo ácido carbônico, representado pela seguinte equação:



ou



Estas reações quando ocorrem de forma direta, irão dar origem as feições de dissolução (formas destrutivas), tais como os lapiás, cavernas ou formas de relevos cársticos. Quando o processo é inverso, as formas estão representadas pelos precipitados marinhos e espeleotemas.

Além destes fatores, há outros que também influenciam na dissolução dos carbonatos, tais como o pH;  $\text{CO}_2$ ; temperatura; pressão; atividades orgânicas e decomposição orgânica.

O efeito do pH na solubilidade do meio, quando com baixos valores, favorece a dissolução, e, quando com altos valores, favorece a reação inversa, ou seja, a precipitação.

Qualquer processo que aumente a quantidade de  $\text{CO}_2$  disponível para a solução daquele meio, faz com que mais  $\text{CaCO}_3$  seja dissolvido. em caso contrário, tende a precipitar o carbonato.

A consequência geral do aumento da temperatura é provocar maior solubilidade, embora, em águas puras, o carbonato diminui sua solubilidade com o aumento de temperatura. Isto se explica porque o  $\text{CO}_2$  é menos solúvel em águas com temperaturas elevadas, em relação as águas frias. Na realidade, a temperatura tem pouca influência direta, pois o que realmente afeta a solubilidade é a quantidade de  $\text{CO}_2$  dissolvido na água.

Em profundidade, a pressão aumenta a solubilidade independentemente do teor de  $\text{CO}_2$ . Entretanto, próximo a superfície, as variações barométricas tem efeito quando associadas a produção de  $\text{CO}_2$  por queimadas, indústrias, atividades vulcânicas, etc.

O desenvolvimento de atividades orgânicas é maior quando a solução está próxima da saturação de  $\text{CaCO}_3$ , provavelmente porque as plantas verdes removem o  $\text{CO}_2$ , pela fotossíntese, causando a precipitação dos carbonatos.

A decomposição da matéria orgânica forma grandes quantidades de  $\text{CO}_2$ , em consequência, torna o  $\text{CaCO}_3$  mais solúvel.

Em resumo, a solubilidade dos carbonatos, na natureza, é controlada pelo equilíbrio entre  $H_2CO_3$ ,  $HCO_3^-$  e  $H_2O$  que dependem das variações do teor de  $CO_2$  dissolvido na solução que transpassa o meio rochoso, que pode ser originado pela decomposição orgânica e aquele contido na atmosfera.

Outros fatores indiretos, também são essenciais para a carstificação das rochas, entre estes destaca-se o clima, em particular pela temperatura e precipitação, pois controlam: (1) a quantidade de água disponível para a realização dos processos; (2) a produção e a concentração de  $CO_2$ ; e (3) a produção vegetal e a decomposição vegetal; (4) o relevo; (5) os aspectos geológicos estruturais e litológicos.

#### **4.1.2 PROCESSOS MECÂNICOS**

Os processos mecânicos atuam através da erosão, ou seja, pelo lento e contínuo desgaste das rochas, sendo diretamente relacionados a intensidade e duração do agente que tem relações intrínsecas com os fatores climáticos e as condições hidrogeológicas.

A erosão ou corrasão, está vinculada ao tipo de escoamento (turbulento ou laminar), ao gradiente hidráulico e aos materiais sólidos transportados pelas águas de circulação.

De uma maneira geral, os processos mecânicos estão vinculados as zonas de fraquezas do maciço rochoso, tais como, juntas, falhas, planos de estratificação, zonas de dobramentos e contatos litológicos, pois constituem, na maioria dos casos, zonas mais favoráveis a percolação da água subterrânea.

Outros aspectos relevantes que intensificam a ação mecânica na erosão de rochas carstificáveis, são devidos aos tipos de uso e ocupação do solo, por exemplo: desvios de canais de drenagem (concentração de águas), e sistemática de bombeamento de poços tubulares profundos (constante elevação e rebaixamento do nível de água).

### **4.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE ROCHAS CARBONÁTICAS CARSTIFICÁVEIS**

#### **4.2.1 CALCÁRIOS**

O comportamento das rochas calcárias frente aos processos de dissolução, estão diretamente relacionados como grau de impureza dos constituintes mineralógicos das rochas.

Dessa forma, BÓGLI (1980), apresenta, Tabela 12, alguns tipos de calcários e suas respostas a dissolução, ou seja, à aptidão dessas rochas frente a carstificação.

TABELA 12- Aptidão de rochas calcárias conforme o conteúdo de argila e sílica: (a) Razão de calcário/argila; (b) Razão de calcário/sílica.

(a) CALCÁRIO/ARGILA	IMPUREZAS (%)	APTIDÃO CÁRSTICA
Calcário muito puro	0 - 5	Excelente
Calcário	5 - 10	Boa
Marga calcária	10 - 30	Lapiás; Formação de dolinas; algumas pequenas cavidades; Mais de 20% não há carstificação
Marga/Ardósia margosa	30 - 70	Impermeável, não forma carste
Marga argilosa	70 - 85	Impermeável; plástica
Argilito	85 - 100	Impermeável; plástica
(b) CALCÁRIO/SÍLICA	IMPUREZAS (%)	APTIDÃO CÁRSTICA
Calcário	0 - 10	Excelente a boa
Calcário com <i>cherts</i>	5 - 30	Boa
Calcário com areia quartzosa fina	10 - 30	Fracamente ou não carstificável
Calcário silicoso	30 - 50	não carstificável
Arenito com matriz carbonática	50 - 90	não carstificável
Quartzito	90 - 100	não carstificável

Fonte: BÓGLI, 1980

GERSTENHAUER & PFEFFER\* apud JAKUCS (1977) submeteram várias amostras de calcários (46 amostras), de diferentes composições e idades, em água saturada com o CO<sub>2</sub> atmosférico a temperatura ambiente, durante 28 horas. E concluíram que a diferença de solubilidade não pode ser atribuída somente a razão de Ca:Mg ou outros elementos não carbonáticos, mas também há a participação da textura e estrutura dos minerais constituintes daquelas rochas. A Figura 40 mostra este comportamento da dissolução daquelas amostras, em função do tempo, embora de uma forma geral percebe-se que a dissolução apresenta uma relação direta com o tempo de duração da água de percolação .

\* GERSTENHAUER, A.;PFEFFER,P. (1966) - Beiträge zur Frage der Lösungsfreudigkeit von Kalksteinen in verschiedenen Klimaten. *Zeitschr. f. geomorph.*, Suppl. Bd.2, Berlin.

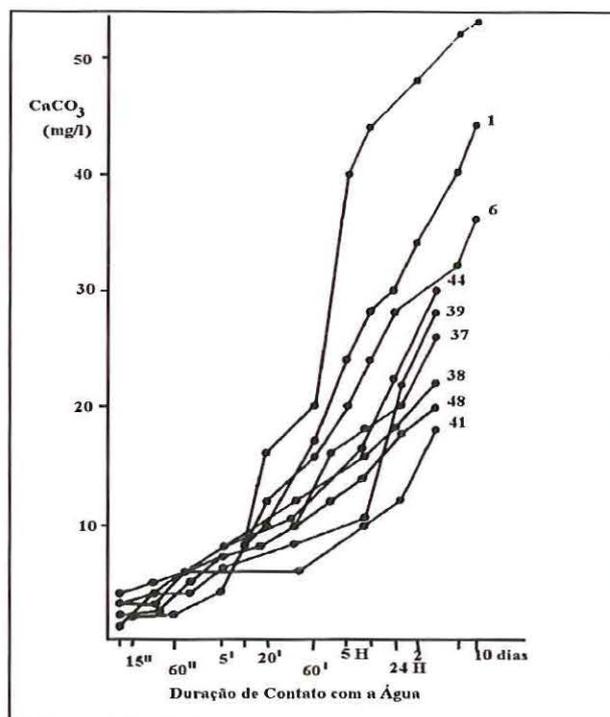


FIGURA 40 - Razões de dissolução de algumas rochas carbonáticas, GERSTENHAUER & PFEFFER (1966).

## 4.2.2 DOLOMITOS

### 4.2.2.1 DOLOMITOS PRIMÁRIOS

São aqueles formados durante a deposição, seja pela precipitação direta do mineral, ou seja, pela substituição de outros minerais previamente formados.

Estas rochas perfazem pequenas áreas, restritas a antigos lagos e lagunas isoladas, onde há o papel fundamental das algas verdes e, secundariamente de bactérias anaeróbias, que renovam o  $\text{CO}_2$  e aumentam o PH, de tal modo, que a calcita e magnesita se precipitam, as vezes associadas a brucita, SUGUIO (1973).

Outros estudos em depósitos dolomíticos recentes, em regiões hipersalinas, mostraram que a dolomita precipita-se diretamente nos poros de lamelas aragoníticas, FRIEDMAN & BORCH apud SELLEY (1992). Entretanto, BUTTLER apud SELLEY (1992), interpreta os dolomitos recentes como substituição da aragonita e calcita.

Os depósitos recentes são caracterizados por uma matriz micrítica, criptocristalina, camadas concordantes, baixa permeabilidade, bandas de estromatólitos, pelóides fecais e evaporitos.

Em termos de estruturas exibem gretas de contração. Estas evidências são transportadas para explicar os antigos depósitos de dolomitos primários.

Em dolomitos paleozóicos, também podem ocorrer bandamentos de calcita e dolomita, atribuído por SARIM apud SUGUIO (1973), à morte periódica de algas nas fácies carbonáticas, pela invasão de águas dolomíticas.

#### 4.2.2.2 DOLOMITOS SECUNDÁRIOS

As evidências para reconhecimento dos dolomitos secundários são observados pela presença de camadas irregulares, discordantes, estruturas de estratificação cruzada, além de que, frequentemente são porosos (poros inter cristalinos conectados). características estas não evidentes em dolomitos primários.

Os dolomitos secundários são originados pelo processo marinho de dolomitização, que ocorre após a sedimentação, convertendo o calcário em dolomito. Este processo pode ocorrer sob várias formas, STEIDTMANN\* apud CAROZZI (1964):

- 1- Substituição de lamas carbonáticas
- 2- recristalização do MgO - esqueletos de calcita e aragonita
- 3- Cristalização dos sedimentos de fundo oceânico pelo refluxo das águas.

Destes, o modelo mais aceito para explicar a dolomitização é o mecanismo do refluxo por infiltração (*seepage flux*).

O mecanismo, refluxo por infiltração, pode ser explicado quando existe águas em regiões áridas e com altas taxas de evaporação. A presença destas águas geralmente está associada a braços abortados; lagos originados pelo enchimento pelo avanço das marés, ou na forma de águas conatas.

As altas taxas de evaporação promovem, através da ação capilar, a ascensão da água intersticial até a superfície, onde os íons de cálcio contidos nessas águas são removidos pela secreção da lama, por organismos e pela precipitação da aragonita (calcita magnésiana) e da gipsita, conseqüentemente, aumentando a razão Mg:Ca. E, pela continuidade da evaporação, há a formação de uma salmoura com salinidade e densidade muito elevada.

Este aumento na densidade da salmoura provoca uma pressão diferencial, que por sua vez ocasiona um fluxo subterrâneo vertical e lateral (refluxo por infiltração), através dos

---

\* STEIDTMANN, E. (1917) Origin of Dolomite as Disclosed by Strains and Others Methods. Geol. Soc. America Bull, 28. 431-450.

recifes ou barreiras carbonáticas permeáveis, que se encontram entre a área lagunar e as águas marinhas, Figura 41.

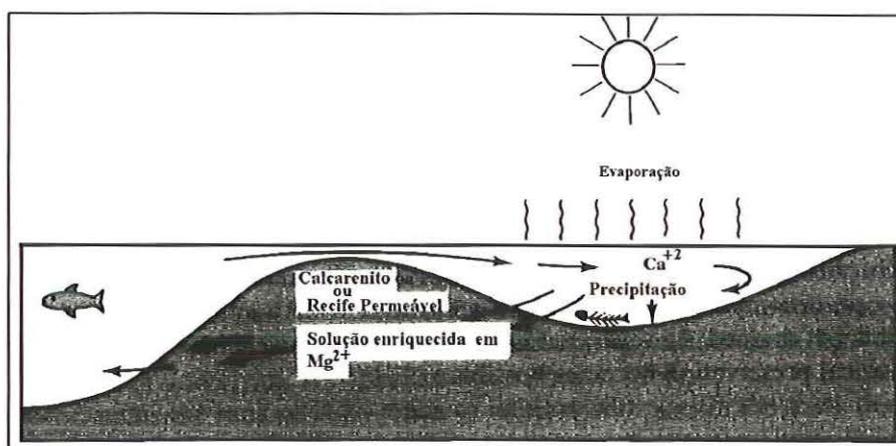


FIGURA 41 - Ilustração da dolomitização pelo processo de refluxo por infiltração SELLEY,1992.

Assim sendo, este fluido enriquecido em magnésio, irá então dolomitizar as rochas ou sedimentos carbonatados, pelos quais irá percorrer.

A progressiva ação do processo de dolomitização, resulta em perda de 12% do volume das rochas, propiciando a origem de fraturas e, portanto, da porosidade secundária, SUGUIO (1973).

A dolomitização é mais frequente em áreas de fraqueza crustal, por exemplo, em faixas de dobramentos, onde persistem grandes fraturas e, conseqüentemente, com mais fluxos de águas ascendentes. Obviamente, estas águas devem estar enriquecidas de íons de  $Mg^{++}$ , para que se origine a rocha dolomítica.

O processo inverso, ou seja, a conversão do dolomito em calcário também é possível, sendo conhecido como dedolomitização.

A dedolomitização pode ocorrer pela: (1) substituição metassomática da dolomita para a calcita; e (2) pela lixiviação, molécula por molécula, com remoção do  $MgCO_3$ . O resultado deste processo é um calcário com granulometria de areia, sem coesão.

As rochas dolomíticas são menos solúveis que os calcários e evaporitos, seja em água pura ou em água saturada com  $CO_2$ . A Figura 42 demonstra as relações de dissolução de um dolomito triássico e vários calcários submetidos a percolação de água saturada em  $CO_2$ .

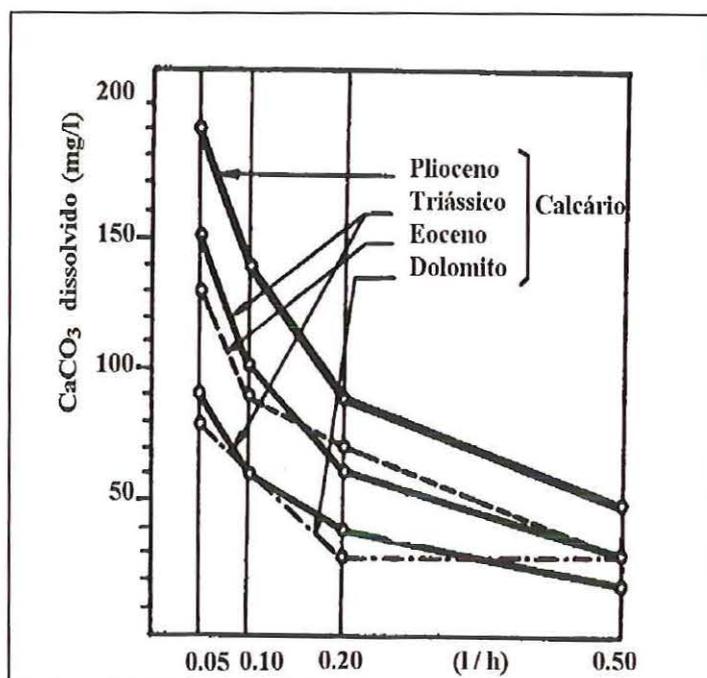


FIGURA 42 - Razões de dissolução entre dolomito e vários calcários. Na abcissa está representado o volume de água que percolou sobre a superfície da rocha, MANDY (1954).

MÁNDY\* apud JACKUS (1977) descobriu que sob a ação de águas mais frias ( $15^{\circ}\text{C}$ ), primeiro dissolve-se o cimento calcítico das rochas dolomíticas, que resultarão em um dolomito próximo a uma composição pura.

O experimento baseou-se em 5 amostras de dolomitos de diferentes localidades, determinando a solubilidade a temperatura de  $15^{\circ}\text{C}$  e a  $40^{\circ}\text{C}$ , saturadas em  $\text{CO}_2$  da atmosfera. Além disto, o autor submeteu estas amostras a diferentes fluxos, ou seja, a 0.05 e 0.20 litros/hora. Os resultados são apresentados na Tabela 13.

Estes resultados, segundo o autor, provaram que em temperaturas mais baixas dissolve-se mais  $\text{CaCO}_3$  do que  $\text{MgCO}_3$ , e que a quantidade de água que passa pelo sistema afeta as duas concentrações, sem contudo alterar a razão  $\text{CaCO}_3:\text{MgCO}_3$ , que manteve uma média de 2.07 em 0.05 l/h e 2.03 em 0.20 l/h.

A influência da temperatura pode ser observada na Figura 43, onde se apresenta a dissolução das cinco amostras analisadas, sob uma razão de fluxo de 0.05 l/h.

Por estas razões, os dolomitos associados a fontes termais, em climas temperados, levam a comuniação dos dolomitos, isto é, desintegração da rocha em forma de pó e fragmentos. O que não ocorre em climas tropicais.

\* MÁNDY (1954) segundo Jackus (1977) este trabalho não foi publicado.

TABELA 13 - Resultados da dissolução de dolomitos.

Temp °C	Fluxos (l/h)	Carbonatos dissolvidos mg/l									
		(1)		(2)		(3)		(4)		(5)	
		CaCO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>
15	0.05	93	32	37	25	169	93	103	34	46	40
	0.20	45	17	22	16	78	40	59	19	22	20
40	0.05	23	72	30	65	40	70	38	77	31	73
	0.20	20	34	21	39	27	41	25	44	20	30

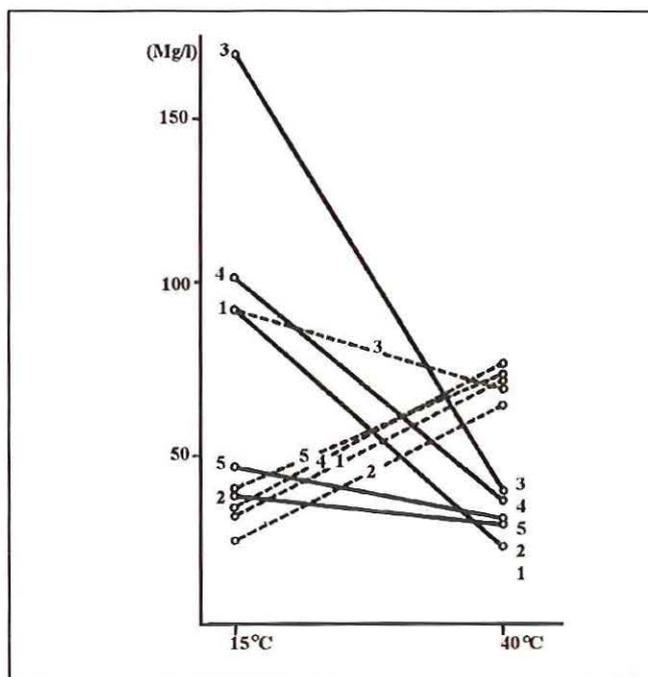


FIGURA 43 - Razões de solubilidade de vários tipos de dolomitos em água saturada de CO<sub>2</sub> da atmosfera em diferentes temperaturas. As linhas cheias representam a dissolução do CaCO<sub>3</sub> e as pontilhadas do MgCO<sub>3</sub>, MÁNDY, 1954.

#### 4.2.2.3 EVAPORITOS

Evaporitos são rochas que se originam a partir de lagos costeiros de clima quente e desértico, em regiões subtropicais e margens de regiões tropicais-bacias marinhas costeiras. Estes depósitos geralmente são encontrados em camadas, intercaladas em outros tipos de rocha, sendo constituídos principalmente por apenas um mineral: halita, anidrita ou gipsita.

As rochas salinas constituídas por potássio são raras pelas seguintes razões: apresentam alta solubilidade; alta plasticidade; baixa concentração inicial.

A halita (NaCl) forma rochas cristalina grosseira, fracamente bandada e sem juntas. Dada sua plasticidade em baixas temperaturas e pressões, formam os diápiros - domos salinos. Enquanto que a anidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) forma corpos rochosos granulares acamadados ou laminados, podendo também formar domos salinos.

A gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) é formada a partir da hidratação da anidrita. Durante este processo há uma expansão volumétrica entre 30-50%, podendo resultar camadas muito contorcidas e fraturadas. Por essa razão são facilmente dissolvidas, originando cavidades no interior dos depósitos, entretanto se recristalizados, formam pacotes rochosos maciços. Os depósitos podem ser constituídos por cristais finos a grosseiros, muito ou fracamente bandados.

As principais ocorrências dos depósitos de gipso e anidrita ocorreram principalmente no permiano, triássico e no terciário, BÖGLI (1980).

Os evaporitos são muito mais solúveis que os carbonatos, independentemente da presença de  $\text{CO}_2$ , pois apresentam elevado coeficiente de solubilidade em contato com a água; além de sofrerem grandes influências da temperatura, Figura 44. Dentre os tipos de evaporitos, ou seja, gipso, anidrita e halita, esta última destaca-se por não apresentar relações entre a temperatura e a solubilidade.

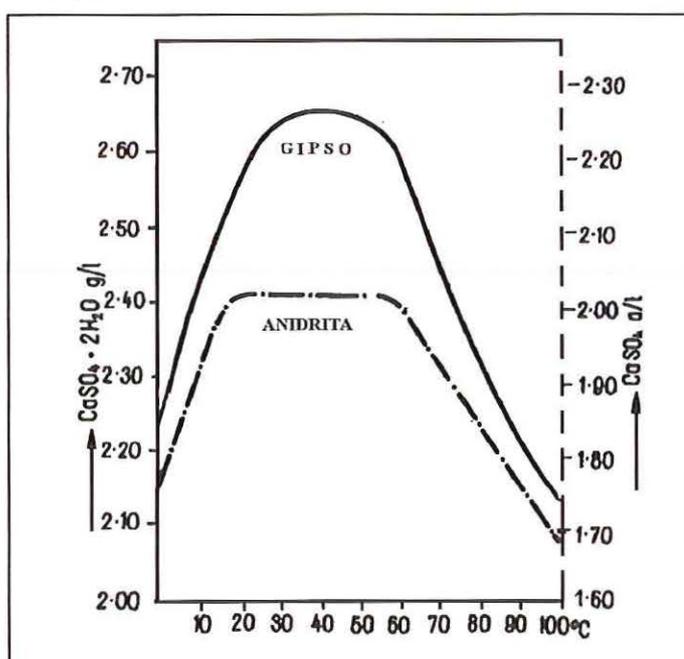


FIGURA 44 - Solubilidade da Gipsita e Anidrita em função da temperatura, JAKUCS, 1977.

## **PROBLEMAS AMBIENTAIS E GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS**

### **5.1 RECONHECIMENTO DOS PROBLEMAS CÁRSTICOS**

A vida humana sobre a Terra, procurando suas formas de civilização, invariavelmente, causa modificações nos ciclos naturais terrestres, principalmente em se tratando do meio subaéreo, que compreende a zona atmosférica, toda a extensão da superfície terrestre, e algumas dezenas e/ou centenas de metros de profundidade na crosta terrestre.

As áreas carbonáticas, no mundo, vem sendo progressivamente ocupadas e exploradas, seja para fins agrícolas, matéria prima para industriais, obras de engenharia e turismo.

Portanto, também sujeitas à ação antrópica, com prejuízos sócio-econômicos à sociedade e ao meio ambiente.

As consequências destas ocupações, fatalmente resultam em impactos ambientais e problemas geológico-geotécnicos, sempre envolvendo altos custos sócio-econômicos, quando não perdas de vida humana.

Os principais problemas relacionados a terrenos cársticos referem-se a colapsos, subsidências e contaminação dos mananciais hídricos.

A grande maioria destes problemas que se desenvolvem em terrenos cársticos, desde que por ação antrópica, não apresentam registros precedentes de sua ocorrência, ao contrário do processo natural, tendo em vista que em alguns casos a atividade antrópica acelera demasiadamente a ocorrência destes processos, por exemplo, o rebaixamento do nível das águas subterrâneas.

Normalmente, existem uma série de elementos que possibilitam reconhecer e auxiliar um processo de avaliação de terrenos carstificáveis, por exemplo:

- Estrondos semelhantes ao ruído de trovoadas; estalos frequentes dentro de alguma obra; ruídos parecidos ao contorcimento de madeiras, etc;

- Formação de depressões em solos ou pavimentos com ou sem acúmulo de água;
- Recalques, deformação por flexão, saída do prumo, ou arqueamento de ferrovias, estradas, cercas, sarjetas, colunas, postes e outras estruturas horizontais ou verticais;
- Pequenos buracos que se formam ao longo da superfície do terreno, em períodos relativamente curtos;
- Infiltração repentina de água de escoamentos superficiais concentrados ou não;
- Mudança brusca para água suja de um poço tubular profundo que sempre bombeava água limpa;
- Variações nas percentagens dos sedimentos, durante o bombeamento, indicam migração de solos;
- Ocorrências microbiológicas em água coletada em poços bem construídos, podem indicar relações do aquífero com águas superficiais, por canais abertos de dissolução;
- Rápida variação nos níveis dinâmicos e estáticos de um poço, quando sua retrospectiva era estável;
- Aparecimento inédito de uma nascente, com grandes vazões, ao longo de uma encosta, durante uma tempestade de chuva - isto se explica pelo fato dos materiais inconsolidados terem sido carregados, bloqueando antigas cavidades por onde a água fluía antes deste preenchimento;
- Variações anômalas no vigor vegetativo de uma área devido ao excesso ou escassez de umidade;
- Presença de pequenos ou grandes redemoinhos ao longo do curso de drenagens;
- Ruídos auscultados na superfície do terreno semelhantes a queda de água de uma cachoeira;
- Rápido desaparecimento de águas represadas;
- Depressões em áreas reflorestadas ou de mata natural, por vezes, há a exposição do sistema radicular, criando amplos espaços vazios sob a matéria orgânica que recobre a superfície do terreno;
- Variações na coloração da água, a jusante de barragens sem motivo aparente, tais como chuva, desmatamento, serviços de terraplanagem, etc.
- Feições e formas de relevo, como descritas anteriormente no capítulo II.

## **5.2 PROBLEMAS AMBIENTAIS CAUSADOS PELA ATIVIDADE ANTRÓPICA**

Naturalmente, entre as causas geradoras do impacto ambiental destaca-se o efeito da urbanização, e suas consequências advindas da implantação de rodovias, ferrovias, pedreiras,

atividades industriais, vibrações do terreno, elevação de estruturas, etc, que de uma forma ou de outra, deverão rebaixar os níveis de águas subterrâneas e alterar os padrões do escoamento superficial das águas pluviais, WHITE et al (1984).

A seguir faz-se uma descrição dos principais impactos causados pelo uso e ocupação de áreas cársticas, destacando-se: (1) Atividades da construção civil; (2) Implantação de pedreiras; (3) Vibrações; (4) Implantações de aterros sanitários; (5) Mudanças nos regimes hidrológicos (superficiais e subterrâneos); (6) Desmatamentos; (7) Inundações; e (8) Alterações físicas, químicas e biológicas em parques turísticos - cavernas e campos de lapíás.

### 5.2.1 ATIVIDADES DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Se por um lado as obras de engenharia apresentam grande contribuição ao desencadeamento dos fenômenos cársticos, pela implantação estruturas, serviços de terraplanagem, estradas, fundações, barragens, desvio de cursos de água, coletores de águas pluviais, etc, por outro, auxiliam no reconhecimento do potencial de uma área à ocorrência de problemas cársticos. Pois, por vezes, uma área cárstica aparentemente estável, sem registros de colapsos e/ou subsidência, pode ocultar um subsolo cavernoso somente detectado durante o processo construtivo de uma determinada obra.

Tendo em vista a grande variedade de tipos de obras da engenharia civil, tratar-se-à neste tópico apenas a influência devida aos canais de desvio de drenagens, que são comuns a maioria das obras de engenharia. Outras atividades da engenharia, tais como fundações e estradas, são abordados em itens específicos.

#### *Desvio de drenagem*

A execução de uma obra geralmente está associada a construção de desvios de drenagem, que tendem a concentrar o fluxo das águas superficiais, acarretando pontos ou pequenas áreas de recarga induzida.

Entende-se por canais de desvio de drenagem as obras enterradas (redes de distribuição ou coletora), coletores de drenagens pluviais, canalização de córregos, etc.

A influência destes canais na evolução de dolinas ocorre porque existem vazamentos nas obras enterradas, carreando os materiais inconsolidados para o interior das fraturas abertas ou cavidades subjacentes, e dando origem a erosão retroativa subterrânea (*piping*), ou obstruindo canais subterrâneos de percolação.

Uma consequência comum dos canais superficiais coletores de água é sua descarga em bacias de acumulação, que irão saturar o meio, podendo acelerar um processo de formação de dolinas. Isto ocorre porque intensificam os processos de corrosão; aumentam a sobrecarga (peso próprio), e conseqüentemente causar a perda de capacidade de suporte. Sem dúvida é um processo lento, porém deve ser considerado, pois uma determinada área coletora pode estar prestes a sofrer determinados tipos de colapso ou subsidência.

Geralmente nas áreas de represamento ou embaciamento das águas, irão formar-se dolinas por colapso, devido a sobrecarga provocada pela água, além do umedecimento do solo que irá provocar a perda de coesão do solo; incremento da erosão mecânica; aumento na velocidade de percolação; e intensificação da dissolução química.

Obviamente, estas situações acontecem quando existem fraturas ou cavidades abertas na subsuperfície, caso contrário o processo poderá ser lento.

### 5.2.2 PEDREIRAS

A extração de rochas carbonáticas tem sido intensificada, ao longo dos anos, tanto em sua demanda quanto nas técnicas de escavação, transporte e processamento.

As formas de extração de carbonatos evoluíram desde as técnicas de extração manual; extração por explosivos de baixa potência - pólvora negra, até, atualmente, por explosivos de alta potência com grande controle de desmonte.

Atualmente, requer-se o terceiro grupo, pois o objetivo é extrair o máximo de volume de rocha com segurança e com máxima fragmentação, conseqüentemente com maior ação de fadiga sobre as rochas circunvizinhas.

Assim, o efeito da detonação tem como principal impacto a erosão, seja pela remoção da rocha ou seja pela remoção da vegetação, GUNN & BAYLEY (1993). além disso, outras implicações estão associadas, quais sejam:

#### *Remoção da cobertura*

A remoção cobertura é a primeira atividade na implantação de uma pedreira, e envolve tanto a destruição da vegetação subaérea, como também os horizontes do solo, considerados como material estéril ao objetivo da mineração. A extensão deste impacto é proporcional a dimensão da pedreira.

Desta forma, o principal problema encontra-se na recuperação dessas áreas, uma vez que a forma de exploração geralmente é feita em degraus (bermas/patamares), criando-se

dificuldades óbvias para o desenvolvimento vegetativo, tanto na base como no parede rochosa da frente de lavra.

#### *Rebaixamento do lençol freático*

O rebaixamento do lençol freático às margens da pedreira, quando obrigatória, faz-se por meios de técnicas adequadas de rebaixamento, sendo esta ação, ou seja, a dinâmica do processo e a perda de suporte dos materiais, a causa comum do aparecimento de dolinas de colapso e subsidência, no interior e nas vizinhanças da mineração, GUNN & BAILEY (1993).

#### *Localização da pedreira*

A implantação de pedreiras pode ser executada em áreas planas, ao longo de vales ou encostas. Geralmente, são estabelecidas ao longo de encostas por minimizar os custos de exploração, justamente onde ocorre maior impacto geomorfológico, sendo este proporcional ao tamanho da pedreira, GUNN & BAILEY (1993). Por outro lado, quando em áreas planas com implantação de cavas, o impacto geomorfológico é menos intenso, mas haverá maior vulnerabilidade a contaminação dos aquíferos, pois tornam-se bacias coletoras de águas superficiais, que normalmente carregam elementos em solução ou sólidos em suspensão para o seu interior, afetando diretamente as águas de subsuperfície, principalmente quando o maciço rochoso mostrar algum grau de fraturamento.

#### *Destruição de cavidades*

Esta situação é muito comum em áreas de extração de rochas carbonáticas, não se dando o devido valor ao potencial turístico, espeleológico e arqueológico. além de provocarem alterações do ecossistema; sob o aspecto da evolução do ciclo cárstico regional e, da possível influência no sistema hidrológico.

Isto ocorre porque quando cavidades são encontradas, não existe o interesse das partes envolvidas com a mineração, em notificar pesquisadores ou órgãos competentes.

### **5.2.3 VIBRAÇÕES**

O processo de desmonte por explosivo, o tráfego urbano e regional e as operações de máquinas industriais, criam ondas vibratórias que se propagam no ar e, no interior dos maciços terrosos e rochosos. Assim, para este caso, o elemento que causa o impacto ambiental é a vibração dessas ondas através do meio rochoso.

Estas vibrações, sob o ponto de vista do impacto geológico-geotécnico, poderão causar colapsos e subsidências no terreno, danos a construções e escorregamentos. Enquanto que sob o ponto de vista ambiental (ecológico), os elementos poluidores são os ruídos, a poeira e os gases decorrentes daquelas atividades.

As consequências desses movimentos oscilatórios, sob o enfoque geológico-geotécnico, acarretam um estresse dinâmico dos meios sólidos - fadiga, culminando em desastres ambientais.

O impacto causado pela ação dos explosivos, é proporcional a frequência das detonações e ao número de pedreiras existentes, sendo mais danosas quanto mais próximas aos centros urbanos, mas também dependentes das leis que regem a propagação das ondas daqueles meios de materiais. Isto implica dizer que: cada pedreira localizada em um determinado local, apresenta seu próprio grau de comprometimento ao meio ambiente.

No Brasil, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) juntamente com a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) e o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), segundo MIDÉA & De PAULA (Sem Data), vem promovendo a elaboração de critérios sobre a influência dos explosivos no meio ambiente – os resultados destes trabalhos não foram encontrados na literatura brasileira.

Quanto as vibrações oriundas do tráfego rodoviário e ferroviário, em áreas urbanas, LOKSHIN (1990) registrou na Rússia, que a influência destas vibrações atingem áreas de 100 a 300m, dependendo da intensidade da fonte, ou seja, da composição do fluxo (número, classe e velocidade dos veículos); estado e propriedades construtivas da estrada e condições geológicas locais.

#### **5.2.4 DESMATAMENTO**

Os desmatamentos de áreas cársticas, são executadas para várias finalidades, tais como: implantação de rodovias, fazendas, centros urbanos, chácaras, indústrias, mineração, extração de carvão vegetal, madeira para fornos, etc, e da mesma maneira que a exploração de outras áreas não carstificáveis, também alteram o meio ambiente.

Estudos comparativos entre terrenos cársticos e vulcânicos, realizados por HARDING & FORD (1993), chegaram as seguintes conclusões:

- A perda do solo e a superfície de rocha exposta é muito maior em terrenos cársticos;

- A erosão torna-se muito mais significativa nos carbonatos, quando a extração vegetal é seguida por queimadas, porque produzem CO<sub>2</sub>, além de tomarem as águas da chuva com maior teor de acidez;
- Ao longo das encostas constituídas por rochas carbonáticas, onde a cobertura por materiais inconsolidados é pouco profunda, praticamente toda a cobertura do solo é carregada pelas primeiras chuvas que atingem aquela área, expondo o manto rochoso à ação direta das águas de chuva, seja pela própria precipitação, escoamento superficial e infiltração, quando o maciço for fraturado;
- Quando a zona do epicarste for bastante desenvolvido, parte do solo é retido no interior das feições cársticas (lapiás), podendo ocorrer a revegetação natural. Embora esta afirmação tenha cunho paradoxal, pois a erosão é mais intensa sobre os terrenos carbonáticos, deve-se considerar que a revegetação é pontual, portanto, não recobrando toda a superfície;

Além das alterações de um ecossistema, outro grave problema oriundo do desmatamento, é o aumento da taxa de evaporação, que poderá provocar o desaparecimento de fontes naturais de água, FORD (1993), além de favorecer o condicionante a salinização daquela área.

### 5.2.5 ATIVIDADES TURÍSTICAS

Os recursos turísticos proporcionados pelas feições e formas cársticas, devem-se principalmente aos campos de lapiás e cavernas.

Dentre estas, os maiores impactos ambientais estão relacionados as cavernas.

As cavernas, sob a perspectiva da proteção ambiental e administração das cavernas turísticas, são agrupadas em três categorias, CIGNA (1993):

- a - Cavernas onde o fluxo de energia no interior da caverna excede o fluxo energético provocado pela visitação. Neste caso, classificam-se as cavernas sujeitas a frequentes inundações e, portanto, sem impacto ambiental antrópico.
- b - Cavernas que apresentam fluxo de energia natural semelhante ao da visitação, havendo então um equilíbrio ambiental.
- c - Cavernas onde o fluxo de energia causado pelos turismo é maior que o natural. Neste caso, fatalmente a caverna sofrerá alterações em seu ambiente interno, comumente destruindo espeleotemas e alterando meio biótico.

Entende-se por fluxo de energia, as variações de temperatura, umidade relativa, pH, concentração de CO<sub>2</sub>, luminosidade, etc. A temperatura tem papel de maior destaque em

climas frios, ao contrário, em climas tropicais, pois o interior das cavernas geralmente apresentam temperaturas semelhantes a superfície.

Outros fatores pertinentes a exploração turística, é a implantação da infra-estrutura no interior dessas cavernas, tais como a abertura artificial de entradas, elevadores, sistemas de ventilação, holofotes, obras de engenharia (escadas, corrimões), que também influenciam no equilíbrio energético da caverna.

### 5.2.6 INUNDAÇÕES

O processo de inundação natural em áreas cársticas, normalmente está associado às formas de relevo - poljés.

Entretanto, também pode ser originado pelas atividades antrópicas que são experimentadas em uma determinada área.

CRAWFORD (1984), relaciona este tipo de impacto ambiental a dois processos fundamentais:

- 1 - Obras de engenharia dentro da área de influência de uma dolina.
- 2 - Elevação do nível freático provocado por: (1) práticas indevidas do uso do solo, acarretando no carreamento de sedimentos para interior de canais subterrâneos, obstruindo-os; (2) preenchimento proposital de dolinas com entulhos, bota-foras, etc; e (3) pela urbanização, que resulta na impermeabilização superficial do terreno com obstrução de capturas naturais, bem como pela concentração de águas pluviais.

### 5.2.7 EXPLORAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Os mecanismos hidrológicos que levam a ocorrência de subsidências e colapsos do terreno, segundo NEWTON (1987) e PRANDINI (1987) são: (1) a perda de capacidade de suporte entre os materiais inconsolidados e dos tetos de cavidades em rochas, devido o rebaixamento dos níveis de água; (2) incremento da velocidade da água subterrânea; (3) aumento nas variações do níveis de água subterrânea; e (4) áreas de recarga localizadas ou induzidas.

#### *Perda de suporte*

Os níveis de água subterrânea apresentam duas situações bastante distintas entre si:

- (1) o nível freático que está relacionado ao nível de água, sob pressão atmosférica, próximo a superfície do terreno está intrinsecamente relacionado ao escoamento básico.

(2) o nível potenciométrico que representa o nível de água que se encontra sob pressão hidrostática, por camadas confinantes, pode estar abaixo ou sobre o nível de água freático. Este nível dá origem aos poços surgentes ou jorrantes, vulgarmente chamados de poços artesianos.

Dessa forma, a relação intrínseca da origem de subsidências e colapsos é o rebaixamento dos níveis de águas subterrâneas, Figuras 45 e 46, seja por variações naturais ou por poços de bombeamento, pois a água subterrânea funcionava como suporte daqueles espaços vazios.

Assim, quando há o declínio do nível freático sucedem-se colapsos, provocados pela ruína dos tetos de cavidades no interior do maciço rochoso ou terroso. Além disso, pode ainda ocorrer a migração dos solos ou materiais incoerentes para o interior de fraturas preexistentes nas rochas subjacentes, Figura 45, demonstrando que a pressão hidrostática exerce sobre o meio uma determinada força, que atua como suporte nos materiais saturados.

#### *Aumento da velocidade de percolação*

Para as condições de um aquífero livre, o rebaixamento do lençol freático pela migração do fluido a maiores profundidades ou pela extração por bombeamento, fazem com que o a velocidade da água aumente, provocando um aumento no gradiente hidráulico.

O resultado destas ações é a remoção e o carreamento de sedimentos para fraturas abertas, que por sua vez iniciam o desenvolvimento de uma dolina.

Para as condições de um aquífero confinado, o rebaixamento da superfície potenciométrica (piezométrica), Figura 46, também resulta num aumento da diferença de carga hidráulica e, conseqüentemente, no aumento da velocidade de percolação da água. Entretanto, neste caso, aumenta a velocidade de recarga do aquífero confinado, podendo não desenvolverem-se dolinas sobre a camada confinante.

Todavia, nas condições de rebaixamento do nível piezométrico, poderão desenvolver-se alguns tipos de dolinas quando a diferença de carga for suficiente para romper seções enfraquecidas, que possam existir no topo da camada confinante, por exemplo, fraturas preenchidas com materiais pouco resistentes, variação petrográfica, etc.

#### *Flutuações do nível de água subterrâneo*

Qualquer fenômeno que altere a pressão do nível freático ou piezométrico das águas subterrâneas, provocará uma elevação ou diminuição de suas superfícies, TODD (1959).

Desta forma, poderão ocorrer variações seculares ou sazonais - flutuações devidas a recarga pelas chuvas, irrigação ou mesmo pela exploração de águas subterrâneas em épocas de estiagem.

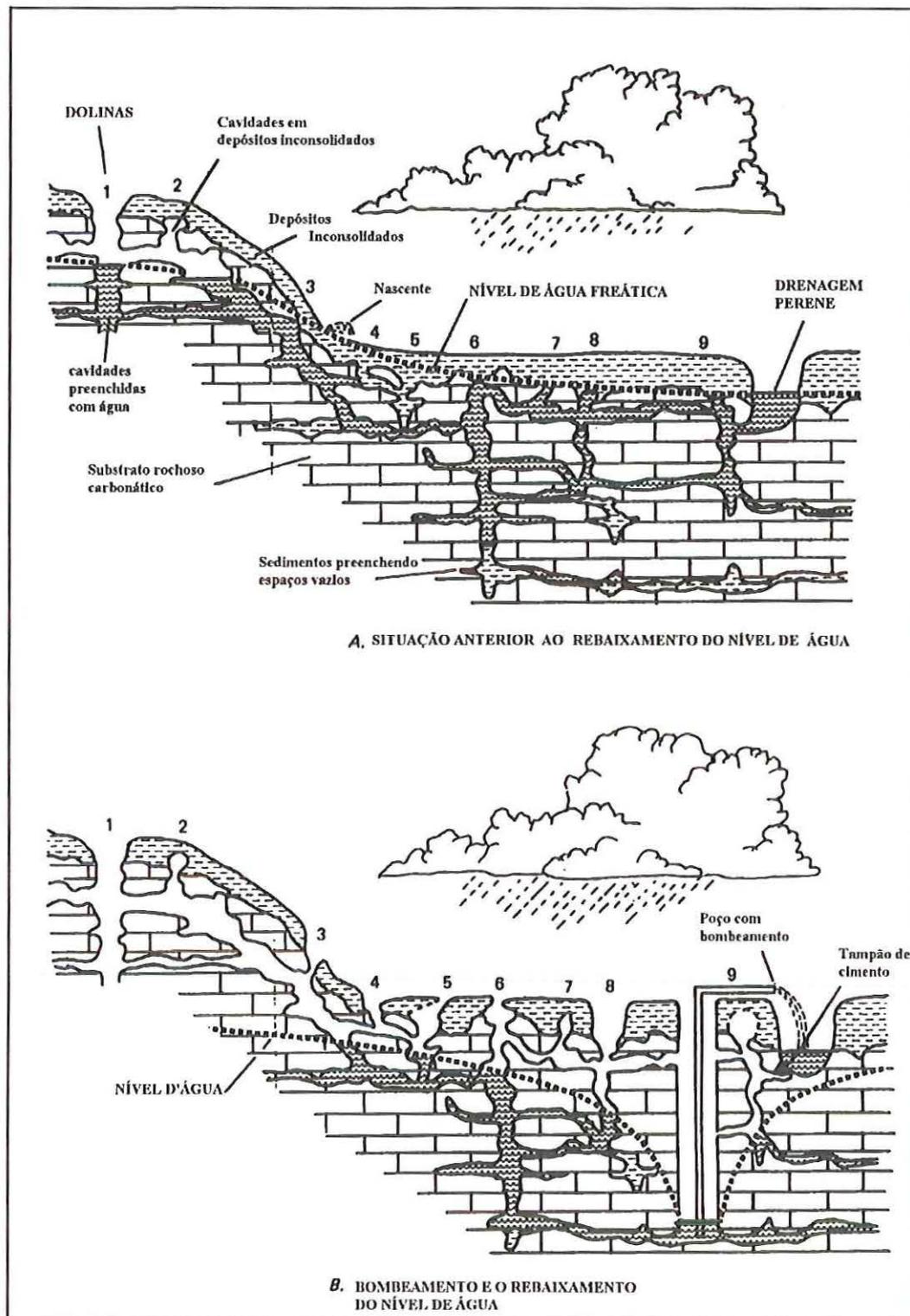


FIGURA 45 - Seções esquemáticas do terreno apresentando o rebaixamento do nível freático com conseqüente formação de dolinas, NEWTON, 1987.

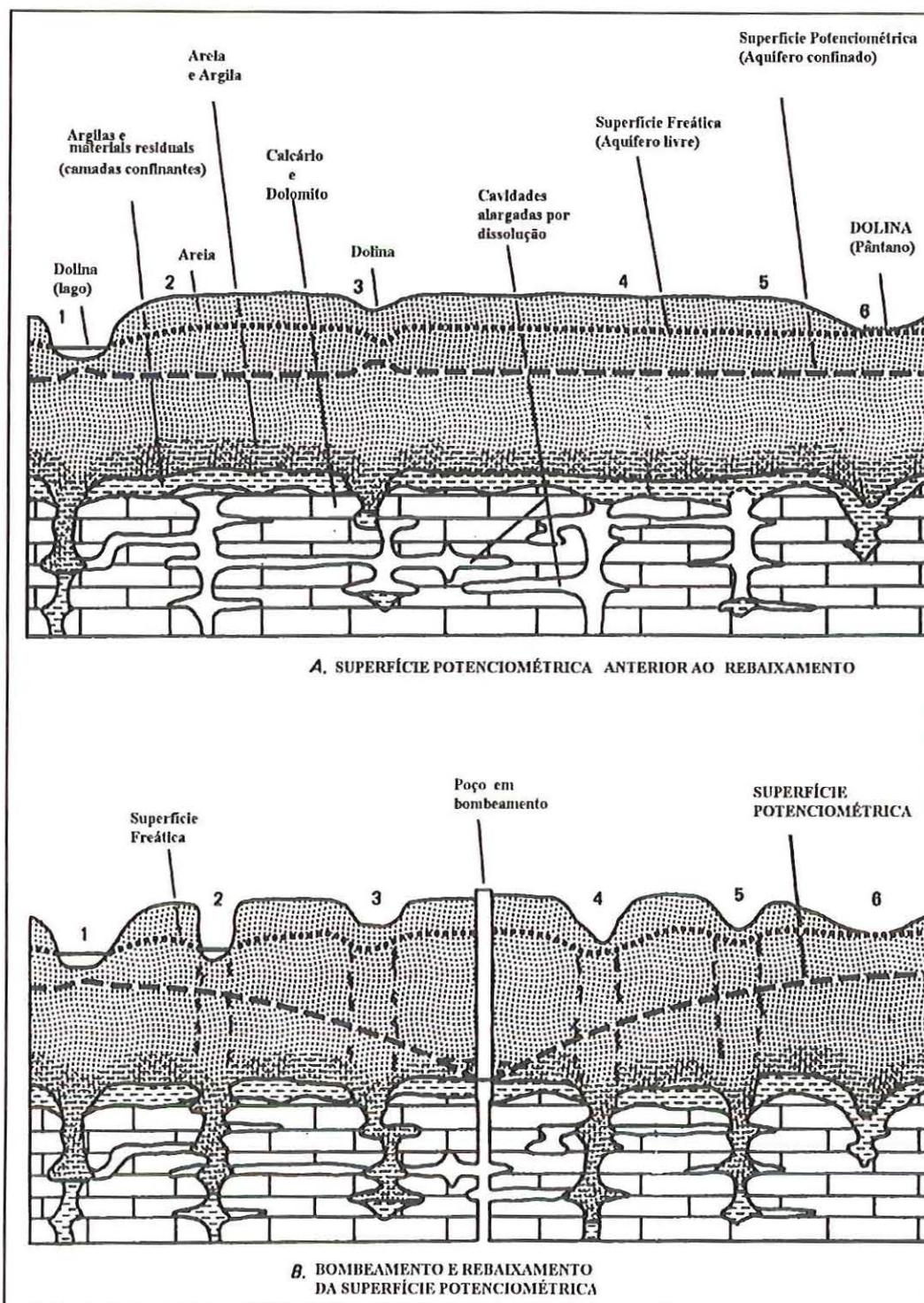


FIGURA 46 - Seções esquemáticas apresentando o rebaixamento do nível potenciométrico com conseqüente formação de dolinas, NEWTON, 1987.

A precipitação pluviométrica não deve ser considerada um indicador preciso, pois dependem das condições de escoamento superficial, intensidade de chuva e, principalmente do tempo de infiltração da água para atingir determinado aquífero.

Outros fatores que afetam a variação dos níveis freáticos, em menor escala, são a pressão atmosférica, tráfego de trens e caminhões pesados, marés, terremotos e evapotranspiração.

O desenvolvimento de dolinas, relacionado à estas flutuações, pode se dar a curto ou a longo prazo, porque os níveis de água sofrem um movimento oscilatório e repetitivo.

A formação de dolinas de colapso ou num curto prazo, estão relacionadas a grandes magnitudes de flutuações diárias dos níveis de águas subterrâneas, causadas pela intensa exploração por meio de poços tubulares profundos, ou pela rápida extração da água que preenchia uma cavidade no meio rochoso ou terroso.

A longo prazo, por causas naturais ou aceleradas pela ação antrópicas, o movimento ascendente e descendente da água provoca uma fadiga dos materiais, que pela constante saturação e secamento, fazem com que estes materiais desagreguem-se e migrem para o interior das cavidades do maciço rochoso. Provocando assim um sensível alargamento das zonas de saturadas periodicamente.

#### *Áreas de recarga*

Uma área de recarga natural dos aquíferos pode ter influência da precipitação direta, cursos de água e lagos, podendo ainda ter outras contribuições artificiais que são aquelas oriundas do excesso de irrigação; redes de distribuição de água e/ou esgoto; canalizações em geral; tanques de disposição de rejeitos fluidos; recargas induzidas por poços; sondagens que ultrapassam camadas impermeáveis sobrejacentes ao aquífero carbonático, intercomunicando a superfície com camadas subterrâneas.

Em se tratando de uma área de recarga natural, para aquíferos cársticos, é de se esperar que ocorram as feições e formas de relevos anteriormente descritas. Entretanto, deve-se salientar outros fatores que apresentam certa relevância quanto a aceleração dos processos de dissolução, provocado por recargas induzidas.

Também o aparecimento de uma dolina ou pequenos sumidouros em áreas rebaixadas topograficamente, que antes apresentavam um fluxo de água superficial perene ou intermitente, tornam-se pontos isolados de recarga por onde toda a água irá infiltrar-se e, conseqüentemente, acelerar os processos de carstificação.

A aceleração destes processos ainda pode ser resultante da evolução natural do terreno, além da atividade animal ou vegetal que também exercem papel fundamental. Como exemplo citam-se os buracos oriundos da ação escavadora de determinados animais, e apodrecimento de raízes vegetais.

### 5.2.8 DISPOSIÇÃO DE REJEITOS

A execução de aterros sanitários, perigosos a saúde pública, sobre rochas carbonáticas é muito discutida, pois de qualquer maneira são uma ameaça ao meio ambiente, pois proporcionam (1) colapso e/ou subsidência pelo peso próprio, com a consequente destruição da integridade do aterro; (2) liberação rápida e contínua de contaminantes; (3) contaminação das águas subterrâneas e superficiais, HUGHES et al (1994). Estas razões predispõem estes terrenos à uma maior vulnerabilidade a contaminação, exigindo-se uma investigação mais detalhada.

Dessa forma, para a implantação de aterros em áreas cársticas, necessita-se um bom conhecimento do sistema hidrológico, e portanto da evolução das formas de dissolução.

O passo inicial na seleção de áreas para disposição de rejeitos, segundo os autores supracitados, inclui: - Seleção de um grande número de sítios dentro da área de interesse;

- Classificação em ordem de prioridade dos sítios escolhidos;
- Rejeição de áreas não apropriadas;
- Seleção de um ou mais sítios para avaliação geológica-geotécnica.

Esta fase inicial, envolve basicamente uma revisão dos trabalhos de geologia e engenharia, além de discussões com técnicos da iniciativa privada e órgãos públicos municipais, estaduais e federais. Os dados a serem levantados estão relatados na Tabela 14.

Na tabela, os autores não incluíram itens específicos, tais como a classificação das rochas, ensaios geotécnicos, condutividade hidráulica, etc, por entenderem que são ensaios à ser realizados apenas nos sítios selecionados, portanto incluem apenas as informações gerais.

Na realidade, a colocação dos autores supracitados é bastante genérica, pois abordam os temas geralmente estabelecidos em estudos para implantação de áreas para deposição de rejeitos. uma vez que em terrenos carstificáveis deve-se considerar com grande preocupação, a ocorrência comum de colapsos e subsidências, e conseqüentemente, a rapidez na contaminação da águas de subsuperfície.

As áreas que deverão ser rejeitadas, segundo HUGHES et al (1994), referem-se aquelas com recentes atividades cársticas; áreas com poços tubulares que denotaram formas de dissolução; áreas de recarga de aquíferos ou fontes; estruturas geológicas específicas, tais como certos tipos de dobras, falhas e lineamentos; áreas que contenham solos rasos; áreas de cabeceiras e de proteção pública; áreas próximas a aeroportos; áreas próximas a intensa exploração das águas subterrâneas para abastecimento público, industrial, mineração, etc; planícies de inundação; áreas alagáveis; falhas ativas; zonas sísmicas, etc.

TABELA 14 - Características de análise em terrenos cársticos, para fins de aterros sanitários, HUGHES et al, 1994

<p>ESTRATIGRAFIA Regional e Local</p>	<p>Coluna estratigráfica Espessura de cada unidade Espessura dos leitos não carbonáticos Tipos de acamamento Pureza de cada unidade   Calcário ou Dolomito   (Puros, arenosos, silicosos,   argilosos, silicosos, interbandados)</p>	<p>GEOLOGIA ESTRUTURAL Regional e Local</p>	<p>Camadas horizontalizadas Camadas inclinadas (homoclinais, Camadas dobradas (anticlinais,   sinclinais, monoclinais, domos,   bacias, outras) Fraturas (lineamentos, locação,   relações com a geomorfologia,   feições cársticas, estratigrafia e   feições estruturais) Sistemas de Juntas (grupos-   orientação, espaçamento,   continuidade, aberturas,   fechamentos, material de   preenchimento) Falhas (orientação, frequência,   continuidades, tipos, idades)</p>
<p>MATERIAIS INCONSOLIDADOS Solos e Saprolitos</p>	<p>Distribuição Origem (Sedimentos, solos   residuais, outros) Características e variabilidade   (espessuras, propriedades   físicas e hidrológicas)</p>	<p>ATIVIDADES ANTRÓPICAS</p>	<p>Construções Escavações Uso de explosivos Vibração Carregamentos (aterros, edificações) Mudanças na drenagem   rebaixamento dos níveis de águas   (poços, exploração, irrigação)</p>
<p>HIDROLOGIA</p>	<p>Águas superficiais   Vazão (variações sazonais) Águas subterrâneas   Fluxo difuso, fluxo dirigido,   fluxo fissural, recarga,   armazenamento e vazão Flutuações dos níveis de água   superficial e subterrâneo Relações entre as águas superficiais e subterrâneas</p>	<p>GEOMORFOLOGIA Regional e Local</p>	<p>Relevos e Encostas Rede e densidade de drenagem Características das drenagens   (padões, intermitência,   perenização) Terraços Nascentes ou sumidouros Lagos e áreas alagáveis Planícies de inundação, pântanos Feições e formas cársticas - evolução   histórica</p>
<p>CLIMA</p>	<p>Precipitação (sazonal, anual e séries históricas)</p>	<p>Temperatura (diária, sazonal, anual, série histórica)</p>	<p>Evapotranspiração e Vegetação</p>

### 5.3 ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES

As condições ideais para minimização de custos, frente aos problemas nas fundações de obras em áreas cársticas, obviamente, seria a não implantação de edificações em terrenos dessa natureza litológica. Entretanto, o crescimento das áreas ocupadas, a progressão gradual da concentração urbana-industrial, e o desenvolvimento tecnológico rural, tomaram-na, um processo irreversível, proporcionando um grande desafio também à Engenharia de Fundações.

No Brasil, alguns casos são citados, apontando vários problemas ocorridos em áreas urbanas, como é o caso de Cajamar (SP); Sete Lagoas (MG); Curitiba (PR); Nobres (MT).

Em nosso país, são poucos os casos divulgados, enquanto que noutros países, técnicas de investigação e casos históricos são intensamente estudados, e divulgados em Congressos e Simpósios específicos, para tratar sobre os mais variados problemas, e técnicas de investigação e recuperação das áreas afetadas.

#### 5.3.1 INVESTIGAÇÃO DO TERRENO CÁRSTICO PARA IMPLANTAÇÃO DE FUNDAÇÕES.

Para a elaboração de um projeto de fundações na Flórida/EUA, uma investigação típica, segundo GARLANGER (1991), consiste em:

- Estudo geológico e hidrogeológico;
- Análise de risco, obtida através do mapeamento das dolinas e seu histórico de evolução no local da obra e áreas circunvizinhas. Salienta-se que, em toda a Península da Flórida, existe um banco de dados computadorizado que registra toda a evolução das dolinas, ou seja, sua distribuição em Km<sup>2</sup> de acordo com a época do seu aparecimento, bem como sua expansão geométrica;
- Mapeamento das descontinuidades rochosas;
- Aplicação de métodos geofísicos, tais como, *Ground Penetration Test* (Radar); Condutividade Eletromagética e Sísmica,
- Sondagens de simples reconhecimento, preferencialmente através do Penetrometro de Cone, pois é mais rápido, e também mais sensível às variações de densidade do subsolo quando comparado ao ensaio SPT,
- Uso do Piezocone Elétrico por ser mais vantajoso na rapidez e sensibilidade em detectar o rebaixamento do nível de água.

WALTHAM & SMART (1988) baseados nas condições geomorfológicas de um terreno carbonático carstificável na China, estabeleceram um zoneamento de risco, Figura 47, como subsídio a implantação de obras de engenharia, relacionando a unidade de relevo com o tipo de obra mais favorável.

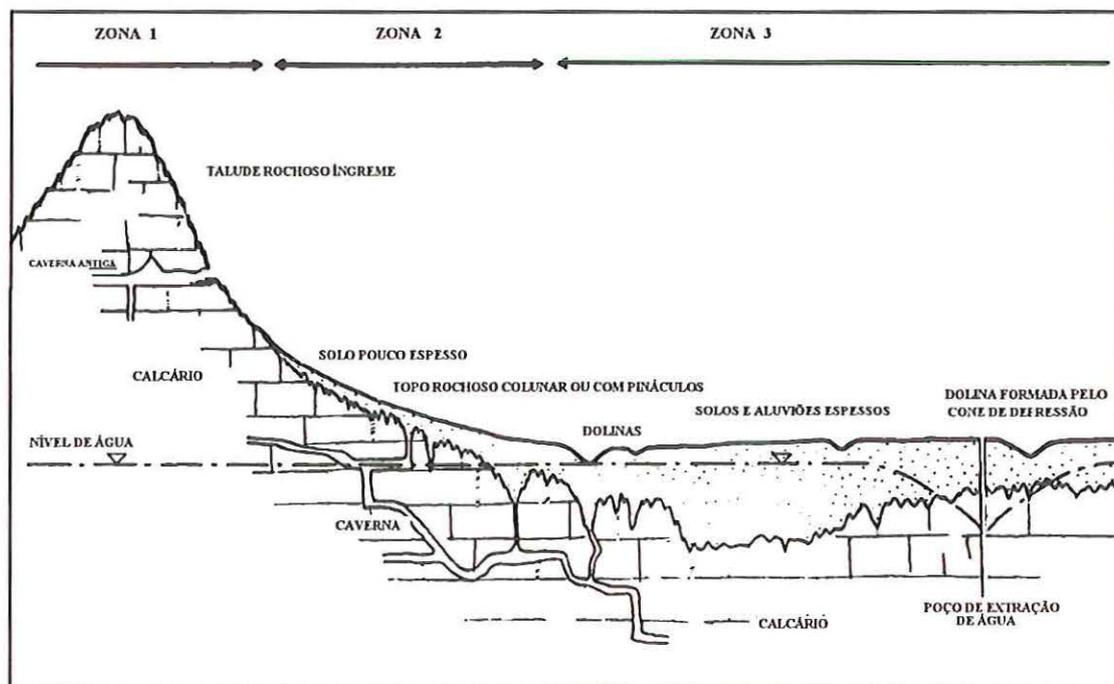


FIGURA 47 - Zoneamento Geológico-geotécnico de terrenos cársticos, WALTHAM & SMART, 1988.

*Zona 1-* As áreas rochosas com alta declividade, são mais apropriadas para construção de obras lineares, tais como rodovias e ferrovias.

*Zona 2-* Em encostas de baixo ângulo com fina cobertura de materiais inconsolidados, deve-se optar por edificações mais simples, que não exijam grandes transferências de carga para o terreno. Entretanto, na presença de lapiás colunares no subsolo, pode-se estabelecer fundações rasas ou profundas com grandes transferências de carga, sobre estas feições cársticas.

*Zona 3-* Consiste nas áreas representadas por fundos de vales e coberturas aluvionares. Nesse caso, o potencial de risco às fundações é bastante elevado.

WAGENER & DAY (1984), baseados em trabalhos desenvolvidos na África meridional, propuseram que para a implantação de obras, sobre rochas dolomíticas, estas devem ser classificadas em função dos intervalos de espessuras dos materiais inconsolidados.

Dessa forma, os autores correlacionaram diferentes tipos de fundações com classes do terreno, como apresentado na Tabela 15.

TABELA 15 - Métodos de fundação conforme a classe do terreno, utilizadas por WAGENER & DAY, 1984.

Métodos de Fundação	Classe do Terreno
Fundações convencionais (sapata corrida ou isolada)	Classe A, B, C
Leito de material selecionado	Classe A,B, C
Fundação sobre lapiás colunares	Classe A
Fundações profundas (estaca, tubulão)	Classe B, (C)
Consolidação dinâmica	Classe B, C
Terra ou solo armado (uso de fitas de aço)	Classe B, C

*Classe A:* Os lapiás colunares e matacões estão próximos a superfície do terreno (< 3m).

*Classe B:* Os lapiás colunares e matacões estão entre 3-15 metros de profundidade.

*Classe C:* Os lapiás colunares e matacões estão a mais de 15 metros de profundidade.

A seguir, faz-se algumas considerações sobre os métodos de fundação relacionados na Tabela 15, comumente utilizadas em terrenos carstificáveis:

#### Fundações convencionais

Estes tipos de fundações (sapata corrida ou isolada) são usadas nas três classes para obras de pequeno porte, tais como residências e estruturas metálicas leves.

Recomenda-se, para estes terrenos, sempre usar tijolos reforçados em todas as paredes e, quando espera-se recalques diferenciais maiores que 10 mm, utiliza-se *split construction* - comumente usadas sobre argilas expansivas e areias colapsíveis.

#### Leito de materiais selecionados

Este tipo de estrutura, para implantar uma edificação, tem os seguintes objetivos: (1) controlar os recalques; (2) reduzir as tensões abaixo do leito (colchão); e (3) reduzir o risco de formação de dolinas.

O método construtivo, para a implantação de um leito de materiais selecionados, em linhas gerais, consiste em:

- remoção do material até 1 metro abaixo do topo dos lapiás colunares e dos grandes matacões, às vezes com uso de explosivos;
- inspeção do terreno, reaterro, umedecimento e compactação do material com pequeno rolo vibratório de massa estática (8 toneladas) ou manualmente. Para o caso específico do trabalho desenvolvido por estes autores, 10 passadas foram o suficiente para compactar até 1 metro de profundidade do material selecionado;
- o restante do terraço é constituído com material selecionado tipo *chert* e compactado sob condições controladas. salienta-se que o tipo de material selecionado é função direta da exigência de suporte da edificação.

#### **Fundações sobre lapiás colunares**

Neste caso, para a classe A do terreno, também pode-se optar por fundações que transmitam suas cargas diretamente sobre as colunas rochosas subsuperficiais. Entretanto, este método deve ser utilizado com reservas e, sempre, com execução de provas de carga antes de estabelecer-se a estrutura definitiva.

#### **Fundações profundas**

As fundações profundas podem ser adequadas para as classes B e C do terreno, seja pelo uso de estacas ou tubulões. O uso destes tipos de fundação requerem suas técnicas normais de construção, sendo sempre utilizadas quando da construção de obras sensíveis ao recalque do terreno, tais como: pontes, silos, torres de resfriamento, britadores, etc.

### **5.3.2 PROBLEMAS E TÉCNICAS DE ESTABILIZAÇÃO DO TERRENO CÁRSTICO FRENTE À ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES.**

A seguir, descreve-se algumas técnicas bastante utilizadas no mundo inteiro, para amenizar e/ou erradicar problemas que possam ser desastrosos às obras da engenharia.

#### **Compactação Dinâmica**

A técnica consiste na aplicação de sucessivos golpes de alta energia, sobre o terreno, por intermédio de um guindaste que solta um peso em queda livre. Esta técnica vem sendo usada na Europa desde 1960, GUYOT (1984).

A sua utilização conforme o autor supracitado, alcança três grandes objetivos:

- melhorar as condições dos materiais incoerentes,
- locação das cavidades subterrâneas e,
- proporcionar alta capacidade de suporte às fundações.

Quando do uso desta técnica, o primeiro parâmetro a ser analisado é a energia de queda ( $e = \text{peso} + \text{altura de queda}$ ), que é definida pela profundidade que se pretende atingir pela compactação.

A prática, segundo GUYOT (1984), mostrou que a profundidade atingida ( $p$ ), é igual a raiz quadrada da energia de queda ( $e$ ), ou seja:  $p = \sqrt{e}$ .

O tratamento do terreno é executado em pelo menos três fases, embora, fases adicionais geralmente são necessárias. Em todos casos as etapas obedecem os seguintes critérios:

*Fase 1* - a distância entre os pontos de aplicação variam inicialmente de 3 a 10 metros, dependendo do tipo de solo;

*Fase 2* - impactos nos pontos intermediários da fase anterior;

*Fase 3* - consiste em soltar o peso de tal distribuição que recubra toda a área do projeto.

Verificando-se as dimensões das pseudo-crateras, obtidas pelas pancadas em cada fase de compactação, obtém-se no final a deformação total do terreno.

A presença de uma cavidade, pode ser denunciada pelo aparecimento de uma depressão no terreno, localizada ou não, obtida pelas pancadas. Nesses locais, deve-se então executar uma sondagem de reconhecimento.

Este método tem sido usado com grande sucesso, entretanto, quando a superfície de compactação for constituída por material competente, como é o caso de *cherts*, as camadas subjacentes poderão não satisfazer as condições de compactação.

### Injeção de Caldas

A técnica de injeção de caldas (*Jet Grouting*) é amplamente utilizada na área de fundações; tanques coletores; elevação de leito de estradas; barragens; etc.

A técnica consiste na injeção, sob pressão, de uma calda através de poços ou furos de sondagens. Estes poços poderão ser revestidos ou não, dependendo das condições do terreno e da profundidade das cavidades que deverão ser preenchidas.

Para o uso dessa técnica em terrenos cársticos, deve-se as seguintes razões:

- 1ª Volume: Geralmente o volume gasto é maior que o volume projetado;
- 2ª Resistência da Pasta: para a elaboração da pasta, procura-se geralmente por materiais de baixo custo, como é o caso da brita, *filler* (pó de calcário), ou próprio solo do local.

3ª Sempre esperar uma razão de subsidência no terreno após o preenchimento da cavidade.

Uma relação Filler:Cimento (10:1), produz em média uma resistência de 500-600 *psi* (libra por polegada quadrada), entretanto, muitos projetos utilizam a calda cimento-bentonita com resistência final de 10-20 *psi*, RYAN (1984). Todavia, a resistência da calda deverá ser proporcional a exigência da obra.

A atenção para a viscosidade é fundamental. Pois, para uma baixa viscosidade da calda, poderá não penetrar em fraturas pequenas, enquanto que para uma alta viscosidade, poderá haver muita perda da calda à grandes profundidades.

Outro fator intrínseco a viscosidade, é a pressão de injeção da calda, que é em função do tipo de material a ser reforçado, ou seja, das dimensões das cavidades a serem preenchidas.

A fluidez da calda pode ser determinada pelo Funil de Marsh, ou pelo cone de Abrams.

### **Sistema Misto**

Quando as feições cársticas são bem caracterizadas em termos de dimensões e relações com o substrato rochoso e inconsolidado, pode-se optar primeiramente pelo lançamento, para o interior da cavidade, de areia limpa mal graduada com posterior injeção de uma calda.

Esta técnica é bastante promissora quando as cavidades estão próximas a superfície do terreno, e as obras à serem instaladas, não exigirem alta capacidade de suporte.

### **Escavação Manual**

Embora esta técnica seja muito utilizada na Ásia, na implantação de rodovias, WALTHAM & SMART (1988), relata que também pode ser aplicada às fundações rasas.

Este método rudimentar, consiste na escavação manual para a retirada do material de cobertura, até uma determinada profundidade em que lapiás colunares começam ser expostos. Esses lapiás colunares serviriam então como suporte para os tipos de fundação rasa, evitando os espaços preenchidos, comumente, por material bastante desagregado e de constituição variada.

Embora a técnica seja rudimentar, exige-se um bom conhecimento da geologia regional e local; dos sistemas de fraturamentos e das variações da espessura dos materiais inconsolidados. Para o caso da Ásia, a escavação é realizada até 4 metros de profundidade.

### **Terra ou solo reforçado**

O uso de solo reforçado, nas classes B e C do terreno, é recomendado quando quer-se ultrapassar uma determinada cavidade de dimensões conhecidas.

Para tanto, pode-se fazer uso de mantas ou telas de fio de metal, sobre a qual o solo é lançado. O reforço do solo é mais promissor quando constrói-se várias camadas alternadas de solo e manta, pois irá atuar como uma estrutura de tração.

Este método tem sido utilizado na reconstituição de rodovias na Pensilvânia, WAGENER & DAY (1984).

### **5.3.3 CASOS HISTÓRICOS**

A Tabela 16, apresenta vários casos onde ocorreram problemas relativos à instalação de fundações ou problemas em preexistentes. Esta tabela, enumera uma série de casos ocorridos em vários países, e retrata os tipos de problemas, as investigações e soluções adotadas.

TABELA 16 . Exemplos de casos relacionados aos problemas de fundação (ALBRECHT, 1998)

LOCAL	TIPOS DE OBRAS					DATA DO	PROBLEMA	CAUSA	ESTUDOS POSTERIORES	RESULTADO DOS ESTUDOS	SOLUÇÃO ADOTADA	AUTOR
	USO	PRE-INSPEÇÃO	TIPO DO TERRENO	TIPO DA FUNDAÇÃO	DATA	PROBLEMA OCORRIDO	PROBLEMA					
Chiefland	Escola Ginásial	?	Cárstico	Sapata Corrida	1930	1991	-Existência de fraturas nas paredes -Recalques (15-30 cm) -Aparecimento de Dolinas	Chuva intensa 230 mm /48h	-SPT -Ground Penetration Radar	-Bolsões de areia solta -Cavidades	-Injeção de calda -Escoramento com estacas tubulares * Prédio abandonado	SPUTO, T. (1993)
Hudson	Hospital	SPT	-Areia siltosa -Fragmentos de rocha -Profundidade do substrato rochoso irregular -NA 1-2 m	-	-	-	Presença de dolinas	Dissolução da rocha	-Compactação dinâmica -Monitoramento piezômetros - Testes pressiométricos	-8895 pancadas -rebaixamento do terreno em 0,60 - 0,75 m -Compactação até 9m (profundidade) -Capacidade de suporte = 3Kg/cm <sup>2</sup> -Recalque máximo (0,6cm)	-Nivelamento do terreno -Recobrimento com manta de borracha	GUYOT, C.A. (1984)
Flórida	Usina Elétrica - carvão e nuclear (Torre de Resfriamento)	-Geologia detalhada -Intensa campanha de sondagem	-Faixa estreita de terra rodeada por pântano -Camada de chert -cavidades -materiais de bota-fora -rocha calcária	-Radier com pré-caldeamento e tubulões -Tubulões e fundação direta sobre a rocha aflorante	1980 (unidade 4 e 5)	Durante a construção	-Solos pouco coesos -Materiais granulares fofos -cavidades	-Área de disposição de bota-foras -Presença de feições cársticas	-20 provas com penetrômetro de cone estático -7 com amostrador de barrilete bipartido -20 rotativas	-Localização das cavidades e dos materiais incoerentes	-Escavação e aplainamento -Recobertura de pedra britada - Técnica <i>Vibroreplacemen t</i> com reaterro -Relocação dos tubulões (furos pilotos)	ALMALEH,L.J. et al. (1993)
Votorantm SP- Brasil	Fábrica de Cimento	-	meassedimentos	-	-	-	ampliação da área	cavidades preenchidas com argila mole	Sondagens rotativas	-remoção da argila mole -sondagens de verificação -controle de recalques das estruturas	injeção de mistura argila -cimento e/ou argamassa	Costa Nunes et al 1976
Capão Bonito, SP	Itabira Agro-industrial	-	calcoxistos, lentes de calcário	-	-	-	-	cavidades vazias e/ou parcialmente preenchidas com silte-arenoso	sondagens rotativas	remoção do amterial por lavagem cruzada em furos de sondagens	injeção de caldas	Costa Nunes et al 1976

LOCAL	TIPOS DE OBRAS				DATA	DATA DO PROBLEMA	PROBLEMA OCORRIDO	CAUSA	ESTUDOS POSTERIORES	RESULTADO DOS ESTUDOS	SOLUÇÃO ADOTADA	AUTOR
	USO	PRÉ-INSPEÇÃO	TIPO DO TERRENO	TIPO DA FUNDAÇÃO								
Malásia	Viadutos (Tráfego intenso e pesado)	10 SPT e 5m com rotativa quando atingia a rocha	-bolsões de areia -cavidades na rocha -NA 1.8 m	estacas metálicas (750-1280KN)	-	-	-cavidades -irregularidade do topo rochoso (Falso nível)-Estacas quebradas e curvadas -Baixo SPT	Presença de feições cársticas	-Análise estatística (Meyerhof) -Prova de cargas dinâmicas em estacas	-Engaste na rocha -Profundidade do substrato rochoso (16.7-22.8m) -FS=2 e 3	-Estacas metálicas -Microestacas (140 mm) -Estacas protendidas inclinadas (45°)	BERGADO, D.T. et al (1987)
Tampa, Flórida	Banco com área de estacionamento	-	-	-	-	-	Aparecimento de dolinas no estacionamento	Feições cársticas subterrâneas	-Técnicas geofísicas (?) -Sondagens	-Locação das cavidades	-Injeção de calda cimento-bentonita com furos verticais e inclinados (sob o prédio)	RYAN, C.R. (1984)
Tampa, Flórida	Barragem	-	Terreno calcário	Barragem de concreto	-	-	-Surgimento de depressões na ombreira -aumento do fluxo d'água através da ombreira	erosão do material para cavidades da rocha	Sondagens	-Presença de cavidades na rocha com posterior formação de vazios na ombreira	Injeção de calda cimento-bentonita	RYAN, C.R. (1984)
Campus S <sup>ia</sup> Cruz -Universidade da Califórnia	Prédio 12.830m <sup>2</sup>	SPT	-Xisto alterado - Camada de marga intercalada	Sapata	1991	1992	-Aparecimento de 2 dolinas (Ø=4m)	-Episódio de chuva -Feições cársticas na marga	-Geologia -Sondagens pneumáticas -trincheiras	-cavidades -paleodolinas preenchidas fragmentos de xisto	-Injeção monitorada (Manômetro e Laser Level) 81 pontos (248 m <sup>3</sup> )	GULARTE, F.B. et al. (1993)
Chepstow	Supermercado (1500m <sup>2</sup> )	-4 Sondagens -7 poços de investigação	-silte arenoso -Fragmentos de rocha -topo rochoso (0.7-4m)	escavação em escalonada para assentar a fundação	-	-	-Não detecção de cavidades subterrâneas, só percebidas quando da escavação					STATHAM & BARKER (1986)
Tallahase Flórida	Teatro e Arena (Área do terreno ≅ 5000 m <sup>2</sup> )	12 SPT	-argilo-arenoso -paleodolinas -Substrato rochoso (17-53m)	-	-	Durante a construção	-Altas variações na profundidade do topo rochoso	-Feições cársticas	-Execução de mais 110 sondagens	-Mapa de isópacas do topo rochoso -Descoberta de mais 3 dolinas	-Estacas tubulares (Ø=305mm)	GARLANGER, J (1984)

Autor: Kurt João Albrecht (1998)

#### 5.4 EXEMPLOS ESQUEMÁTICOS DE TÉCNICAS CORRETIVAS

Os problemas relacionados a engenharia de fundações está relacionado a estruturação do maciço rochoso e terroso, podendo ocorrer de maneira isolada ou conjunta. SOWERS (1984) apresenta algumas destas estruturas:

- Torres ou pináculos de rochas
- Alternância de estratos de rocha dura e solos moles
- Cavidades dômicas nos solos e, cavidades ou cavernas nas rochas
- Presença de solos compressíveis preenchendo espaços vazios, depressões,
- Aparecimento de dolinas envolvendo solos e colapsos de rocha, e conseqüente erosão dos solos

Assim SOWERS (1984) propôs uma série de medidas ilustrativas, que podem ser adotadas na elaboração de um projeto de fundação em áreas cársticas. Estas medidas foram agrupadas em cinco categorias, que estão representadas por figuras explicativas na Figura 48:

- 1- Feições estruturais naturais de alto risco (Figuras 48.1 a 48.4);
- 2- Otimização na locação do sítio (Figura 48.5);
- 3- Medidas corretivas ou mitigadoras (Figuras 48.6 a 48.13);
- 4- Fundações sobre superfície rochosa ou terrosa (Figuras 48.14 a 48.16);
- 5- Fundações profundas atingindo o substrato rochoso, Figuras 48.17 a; 48.21);
- 6- Precauções, evitando explosivos (Figura 48.22), e minimização, com o uso de injeção de caldas, Figura 48.23).

Estas medidas não devem ser entendidas como ações inteiramente corretivas, pois requerem o entendimento dos mecanismos que controlam estes tipos de feições e formas cársticas, tais como:

- profundidade, espessuras e propriedades do solo e das rochas;
- níveis de água subterrânea e suas flutuações;
- locação das fraturas e cavidades e suas relações com os materiais inconsolidados sobrepostos;
- natureza e a extensão das formas cársticas e suas possíveis mudanças por processos naturais ou pela implantação de uma determinada obra.

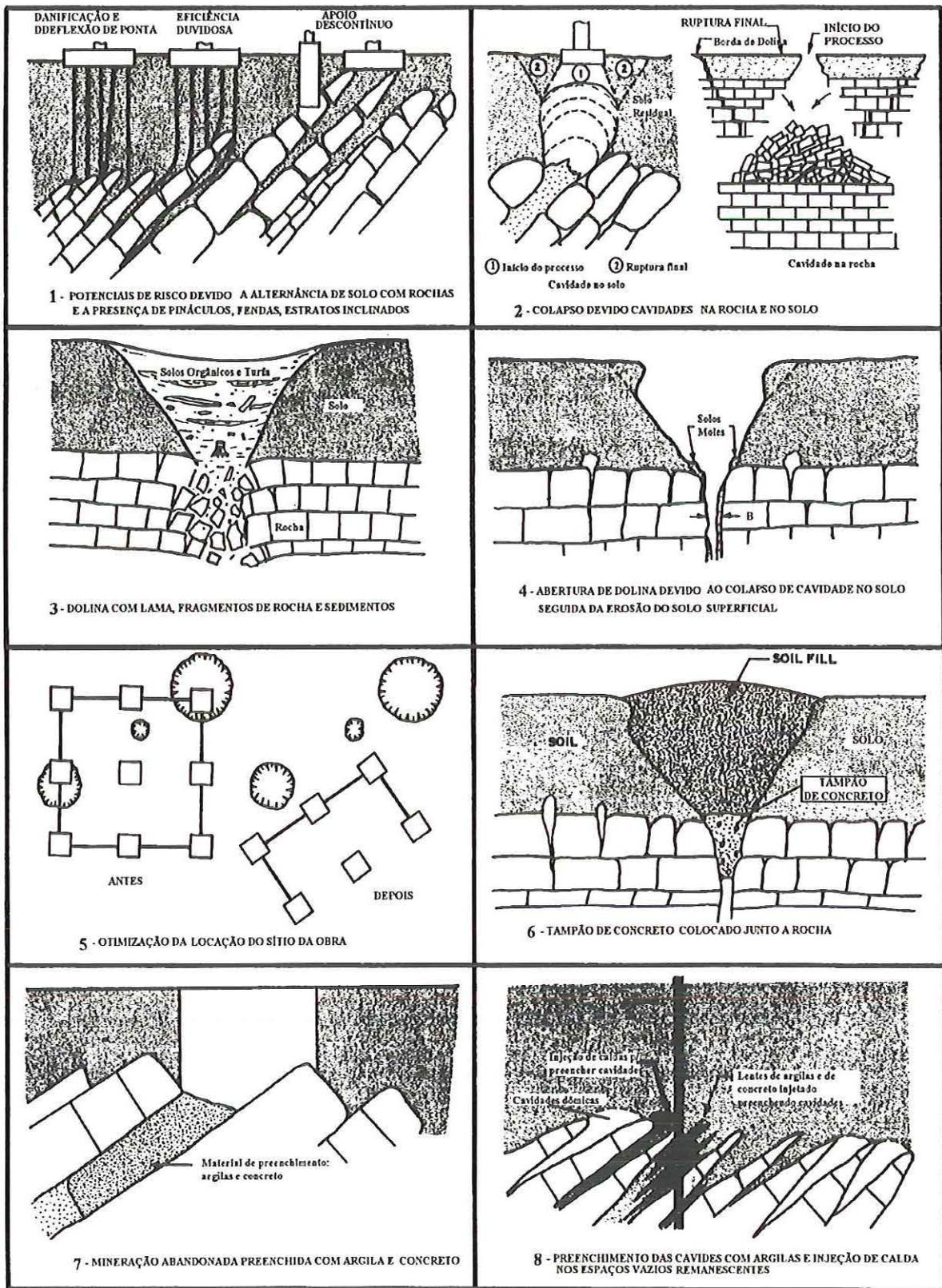
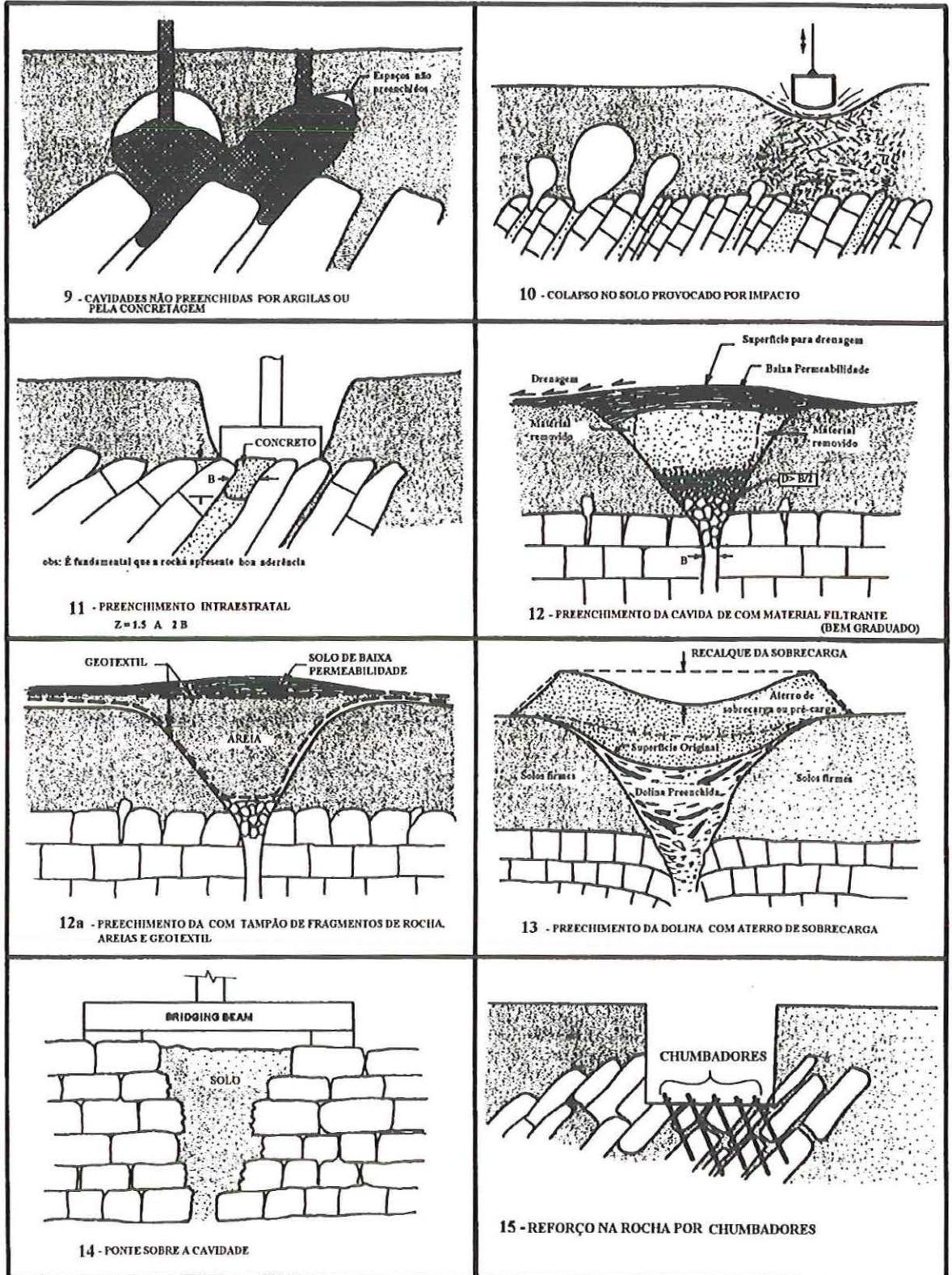
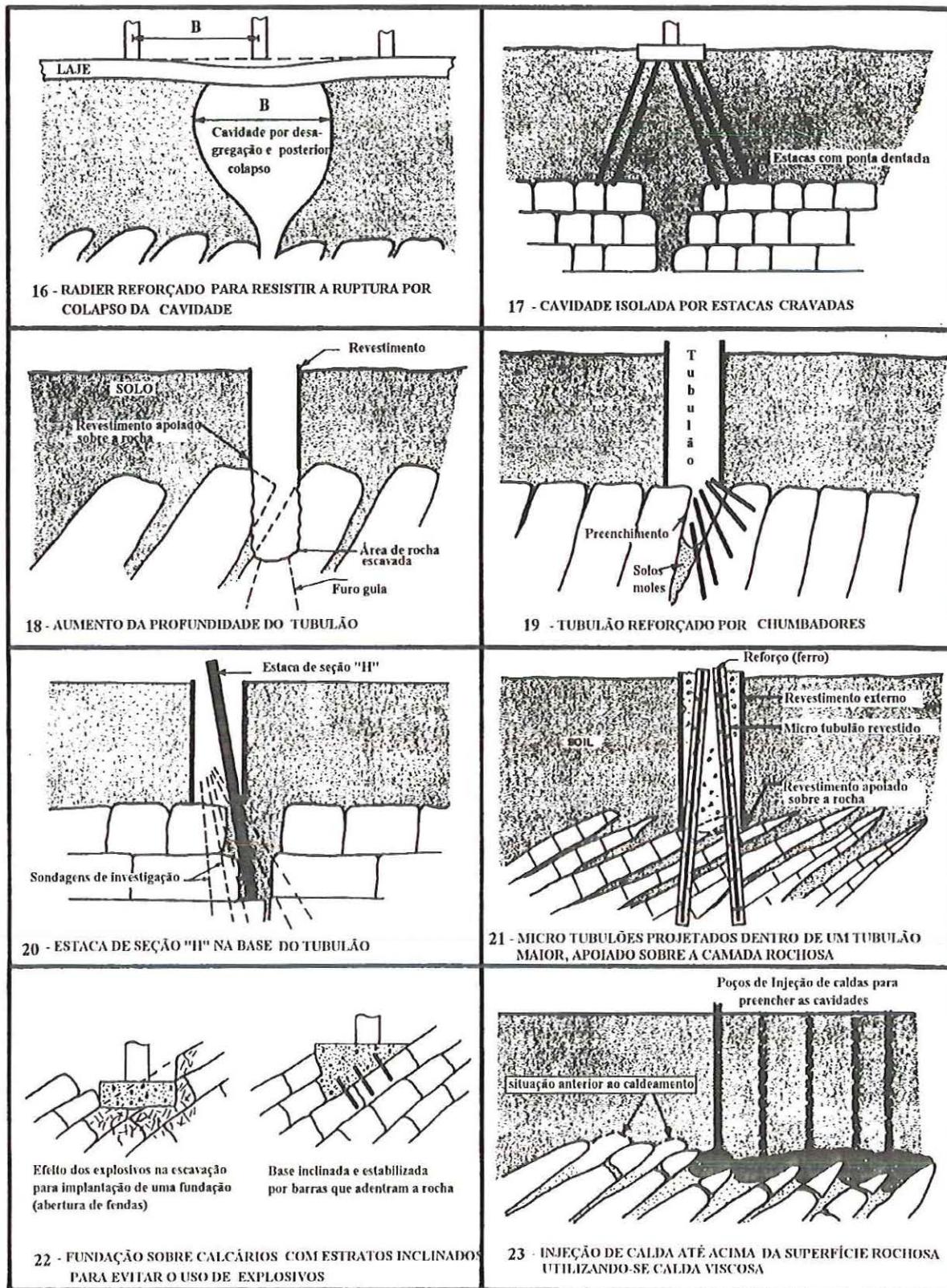


FIGURA 48 -Exemplos esquemáticos de tratamentos adotados em áreas cársticas para fins da engenharia de fundações, SOWERS, 1984.

continuação da FIGURA 48...



continuação da FIGURA 48...



## 5.5 ESTRADAS

Normalmente, para minimizar os custos para a implantação de traçados lineares, procuram-se áreas planas, fundos de vales. Entretanto, para condições de terreno cárstico esta regra não é aplicável. Pois, é justamente nestas porções topográficas do terreno onde se encontram os maiores problemas e formas de carstificação.

Todavia, ocorrem situações em que o traçado deverá obrigatoriamente ultrapassar tais regiões. Neste caso, FISHER et al (1993) apresentam as formas para a execução de projetos, e investigações necessárias e alguns métodos para remediação deste problema.

### 5.5.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE UM PROJETO DE ESTRADAS

Um projeto de estradas em áreas cársticas deve admitir muito mais que a simples existência de cavidades no subsolo, pois as rochas carstificáveis são suscetíveis a dissolução pelas águas circundantes, e por causas externas, que aceleram este processo. Pois segundo FISHER et al (1993), a dissolução por si própria, poderá não acarretar problemas durante a vida útil daquela estrada.

Estes autores, consideram que o carregamento da rodovia, estruturas afins e a remoção de rocha sã ou materiais inconsolidados são os fatores responsáveis pelos problemas decorrentes da obra. Portanto, a segurança e economia do projeto a ser executado, está fundamentalmente na sua elaboração preliminar.

Este projeto, estabelece várias fases de execução, quais sejam:

#### *A- Reconhecimento de Campo*

Como primeiro passo para selecionar um traçado, o investigador deverá utilizar-se de informações geotécnicas preexistentes, fotografias aéreas, imagens de satélite para trechos regionais e, conseqüentemente, organizar um banco de dados.

Os dados que devem ser obtidos, geralmente incluem:

- Mapeamento detalhado: nos EUA, os estados elaboram mapas de áreas cársticas com localização das dolinas e de áreas propensas a deflagração desses problemas.
- Mapeamento do rendimento dos poços tubulares profundos, pois normalmente, as grandes vazões estão associados a maior carstificação do terreno;
- Porcentagem dos vazios dos diferentes estratos de rocha carbonática - em alguns estados norte americanos estes dados estão disponíveis;
- Mapas das cavidades, desaparecimento de fontes e canais de drenagem;

- Classificação textural e dos constituintes químicos da rocha que ocorre na área de interesse;
- Quimismo das águas subterrâneas;
- Propriedades geotécnicas da rocha.

O uso de fotografias aéreas, de diferentes períodos, permite estabelecer a evolução das dolinas, ou mesmo perceber feições antes não verificadas, seja pela própria evolução, ou pelo atual uso e ocupação do solo. Outros dados pertinentes são os lineamentos estruturais e formas circulares na superfície do terreno.

A imagem de satélite também pode favorecer o reconhecimento do terreno, principalmente na banda do infravermelho, para indicar zonas úmidas, em épocas chuvosas.

### *B. Investigações Preliminares*

As investigações geotécnicas devem indicar (1) a locação, distribuição e dimensões das cavidades na rocha; (2) a locação, distribuição e dimensões dos vazios nos solos; (3) profundidade e configuração do topo do substrato rochoso; (4) variações nas características físicas dos solos e rochas; e (5) a qualidade das águas subterrâneas.

### *C. Projeto da Rodovia*

Na preparação de um projeto rodoviário, em terrenos cársticos deve-se estar atento para algumas recomendações, tais como:

- Planejar revestimento impermeável em cursos de água ou áreas alagáveis;
- Uso de asfalto em toda seção do pavimento;
- Uso de materiais impermeáveis nos interfaces da sub-base, juntamente com coletores de água que direcionam-na para bacias de captação. O objetivo é evitar infiltração de águas abaixo do corpo estradal;
- Quando o pavimento for rígido, pode-se fazer uso de pavimentos reforçados (*bridging beam*), para atravessar cavidades ou dolinas;
- Não acomodar condutos, canais de escoamento ou bueiros sobre pedra britada ou outros materiais permeáveis;
- Locar as bacias de captação de água longe da estrada e estruturas e áreas de recarga.

### *D. Medidas Corretivas*

O uso da compactação dinâmica tem tido bons resultados na implantação de estradas sobre terrenos cársticos, entretanto, deve-se frisar que é fundamental, para o sucesso da obra, o acompanhamento contínuo do Engenheiro Geotécnico durante a construção.

Quando faz-se uso da compactação dinâmica, algumas medidas podem ser exploradas, de forma isolada ou conjunta, entre elas destaca-se:

- Escavação do solo até a rocha com subsequente preenchimento da cavidade por concreto ou enrocamento, e reaterro controlado;
- Se o substrato rochoso for raso, bastante fraturado, e com formas de dissolução superficiais (epicarste), pode-se fazer a remoção desta seção e posterior selamento com caldeamento;
- Se o substrato e as formas de dissolução forem profundas, opta-se pelo uso de injeção de caldas através de furos de sondagem;
- Lançamento de caldas na superfície do terreno e nas rochas subjacentes, associado a estacas moldadas *in situ*;
- Uso de estacas e tubulões quando exige-se maior capacidade de carga.

Atividades construtivas sobre áreas constituídas por rochas carbonáticas sempre são problemáticas. Por isso, deve-se estar atento aos problemas que poderão acarretar ao meio físico, pois podem provocar a aceleração da carstificação.

Para o caso de construções de estradas, o principal problema consequente é o tratamento dado as drenagens, pois via de regra, tendem a concentrar o escoamento das águas.

MOORE (1984) discute alguns casos e apresenta algumas medidas, a fim de evitar a aceleração da carstificação, através de um tratamento da drenagem, por exemplo:

- Trincheiras ou valetas revestidas: são valetas revestidas para impedir o aumento da percolação das águas subterrâneas, e portanto, o acréscimo da erosão subsuperficial;
- Leito rochoso: consiste em retirar os materiais inconsolidados do leito estradal e substituí-los por blocos de rocha. A função deste procedimento é evitar a ascensão dos níveis de água, causados por inundação, que possam atingir o sub-leito da estrada;
- Meio fio e sarjeta asfáltica no aterro: tem a função de reduzir a intensidade de percolação, e consequentemente, a erosão;
- Canais de transbordamento: consistem na construção de drenos (drenagem positiva) a partir de drenagens coletoras, a fim de evitar transbordamento dentro da área de influência da estrada.
- Proteção de dolinas: evitar a entrada de águas superficiais dentro das dolinas é fundamental, para tanto, contornam-se suas bordas com gabiões, estruturas de concreto, aterros, cerca de detritos, etc.

## ASPECTOS DO PANORAMA CÁRSTICO MUNDIAL

### 6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

LAMOREAUX et al. (1997) consideram que as regiões cársticas constituem 25% da superfície terrestre, enquanto que, FORD (1993) diz que a superfície de rochas carbonatadas abrangem entre 7 a 10%. Quanto a população mundial, estimam que 25% dos habitantes do globo estão assentados sobre estes tipos rochosos.

A partir destes dados, embora com controvérsia, percebe-se a importância destas áreas no contexto geológico-geotécnico, uma vez que o número de habitantes é elevado.

A preocupação sobre os reflexos do uso e ocupação urbana em áreas carbonáticas existe há muitas décadas. Em Hanôver, no ano de 1973, foi realizado um simpósio especial sobre *Sinkholes and Subsidence related to soluble rocks*. Alguns anos depois, em 1978, na Pensilvânia/USA, sobre os problemas de engenharia em terrenos carbonáticos; e na Flórida, em 1984, aconteceria “*The First Multidisciplinary Conference on Sinkholes*”. No século XX este tema teve um grande impulso técnico-científico na maioria dos países, tanto que até a presente data, mais de 150 simpósios e congressos trataram especificamente sobre carste.

Atualmente, no mundo todo existem grupos de pesquisa vinculados a Universidades e órgãos governamentais que vêm se preocupando cada vez mais em relação a este assunto. Tanto, que pelo menos uma vez ao ano, em algum país, ocorre um evento de abrangência regional e/ou internacional, promovidos por uma série de órgãos estaduais, federais e comunidades científicas. Dentre algumas das atuais Associações Internacionais que desenvolvem trabalhos específicos sobre carste citam-se:

- *The International Geographical Union Commission on Environmental Changes and Conservation in Karst Areas / IGU*
- *The Karst Commission of International Association of Hydrogeologists / IAH*
- *The International Union of Speleology*
- *The Karst Waters Institute / KWI*
- *UNESCO*
- *International Bottled Water Association / IBWA*

Nos dias atuais os grandes projetos mundiais são incorporados pela UNESCO, onde participam pesquisadores das mais variadas instituições, que iniciaram seus trabalhos através do *International Geological Correlation Programme "Project 299" (Geology, Climate, Hydrology and Karst Formation)* durante os anos de 1992 a 1995. Este projeto, está tendo continuidade através do programa iniciado em 1995 com término em 1998, denominado de *"Project 379" (Karst Process and the Carbon Cycle)*.

## 6.2 EXEMPLOS MUNDIAIS DE ÁREAS CÁRSTICAS

As mais notáveis e extensas exposições de rochas carbonáticas do mundo estão concentradas no sudoeste da Ásia, leste dos EUA, e em algumas partes da Europa.

A primeira vista, imagina-se que todos terrenos cársticos estão repletos de feições de dissolução, proporcionando uma topografia ou paisagem cárstica típica. Entretanto, isto não pode ser generalizado, pois dependem das condições geológicas, climáticas, etc, ou seja, quanto maior o número de atributos favoráveis as condições essenciais ao desenvolvimento de uma paisagem cárstica, maior será o número de feições e formas de relevo. Além disso, também a terminologia, por vezes, é restrita a uma determinada região.

De uma maneira generalizada, pode-se dizer que os relevos cársticos, mais elaborados ou conhecidas mundialmente, encontram-se em regiões localizadas da Iugoslávia; sul da França; vários estados dos Estados Unidos da América, norte de Yucatán-México, Andaluzia na Espanha; Hungria; Oeste de Cuba; Grécia; Sul da China; Rússia, África do Sul; Ilhas de San Salvador, nas Bahamas; Alemanha; Malásia; Canadá; Belize, no mar do Caribe; Turquia; entre outras.

Obviamente, existem outras áreas menores que constituem formas endo e exocársticas muito bem definidas, mas para relacioná-las, ter-se-ia que citar centenas de áreas restritas geograficamente que, julgando pelo número de publicações científicas, ultrapassaria facilmente a centenas de casos.

A seguir, relatam-se aspectos de algumas áreas, exemplificando terrenos cársticos, medidas políticas e custos envolvidos em trabalhos corretivos.

### **ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA**

Nos EUA a principal causa dos abatimentos e subsidências é devido ao rebaixamento do nível das águas subterrâneas, associado a grande permeabilidade e porosidade das rochas

carbonáticas. Estes terrenos ocupam em torno de 25% da área territorial deste país, LAMOREAUX (1995).

Os problemas de subsidência e colapsos de terrenos cársticos nos EUA são encontrados principalmente nos estados de Alabama, Flórida, Geórgia, Missouri, Pensilvânia e em Tennessee. Além dos elevados custos financeiros envolvidos nas obras de recuperação e prevenção, também ocorreram várias fatalidades nestas regiões.

No Alabama, desde 1900 mais de 4000 dolinas induzidas foram registradas, sendo gastos várias dezenas de milhões de dólares para a recuperação das áreas afetadas, entre as obras que necessitaram de recuperação destacam-se: estradas, ferrovias, pontes e residências, CARTER & JONHSON (1989).

Na Georgia, as áreas relativas às dolinas ocupam 20% da superfície, sendo que desde 1950, foram registradas mais de 6500 dolinas e colapsos, WALTHAM (1987), sendo gastos mais de uma centena de milhões de dólares para a recuperação das obras afetadas, NEWTON (1987).

Em Tennessee a partir de 1975 até 1986 ocorreram mais de 250 dolinas de subsidências, com dimensões que variam de 0.30 a 200 metros, destas 60 % são maiores que 20 metros, KETTEL & NEWTON (1987).

Na Flórida, o esforço de vários cientistas fez com que a agência federal de proteção ambiental - *United States Environmental Protection Agency*, reconhece-se os problemas oriundos da carstificação; a *American Society of Civil Engineers*, decidiu por sessões técnicas para apresentação e discussão deste tema, e a *American Society of Testing Materials* se pronunciou no sentido da realização do monitoramento das águas subterrâneas. Entretanto, em 1992, um dos mais importantes institutos de pesquisa na área, *Florida Sinkhole Research Institute*, foi fechado vítima da recessão, BECK (1993). Este, criado na década de 80, para estudar a grande frequência dos colapsos que estavam ocorrendo.

Como exemplo da importância deste instituto na Flórida, ou similar em qualquer área carstificável, cita-se o estudo que o mesmo vinha desenvolvendo numa área com 200 residências. Os trabalhos foram interrompidos após seu fechamento, onde posteriormente, o governo teve custos superiores a 10 milhões de dólares para recuperação da área, BECK (1993).

NEWTON (1987) cita que o custo para reparos em 5 barragens, no leste dos EUA excederam aos U\$ 140 milhões.

HEJAZI (1987) exemplifica o caso de uma barragem em Tennessee, onde as primeiras evidências de carstificação manifestaram-se em 1962. Após 10 anos de pesquisas e trabalhos

de recuperação e instalação de 683 metros de parede diafragma de concreto, somaram custos em torno de U\$ 97 milhões.

LAMOREAUX et al. (1997) relatam que a *US National Research Council, Panel on Land Subsidence* tem recebido, em pelo menos 06 estados americanos, mais de U\$ 10 milhões anuais para reparar prejuízos e, mais outros 04 estados recebem entre U\$ 1 a 10 milhões.

#### **CHINA**

Na China existem 21 províncias, onde mais de 200 casos tem sido documentados, sendo que cada local apresenta vários tipos de dissolução, totalizando centenas de dolinas pontuais, que desde a década de 70 vem tendo destaque em pesquisas na área de Geologia de Engenharia. Nestas áreas, até o ano de 1987, mais de U\$ 8,3 milhões foram gastos em reparos, DAOXIAN (1987).

Na maioria dos locais ocorrem rochas carbonáticas compactas, envolvendo materiais inconsolidados sobrepostos (Carste Coberto).

#### **ÁFRICA**

No sul da África do Sul, onde ocorrem grandes extensões de rochas carbonáticas há perdas de solo de até mais de 100 metros de espessura, pois migram para o interior das cavidades subsuperficiais.

Outras formas de carstificação, do tipo dolinas, ocorrem nos carbonatos cenozóicos encontrados no deserto do Saara (noroeste da África), denotando condições paleoclimáticas favoráveis à dissolução químicas daquelas rochas.

#### **EUROPA**

Na Europa, os principais problemas oriundos da fenomenologia cárstica são associados aos terrenos constituídos por evaporitos. Pois estas rochas são as mais sensíveis frente a dissolução, portanto maior facilidade na formação de cavidades subterrâneas, mesmo com as características atuais do clima europeu, como percebe-se em alguns exemplos citados a seguir:

Na Europa Central as regiões cársticas apresentam formas geomórficas diretamente controladas pela Geologia Estrutural, representando uma sequência paralela de vales e montanhas.

#### **ESPANHA**

Na região de Zaragoza que tem uma precipitação média anual de 322 mm, as dolinas de colapsos apresentam diâmetros que variam de 3 a 40 metros e, as dolinas de subsidência,

mostram dimensões de até 1.000 metros. Sendo que a profundidade de ambas raramente ultrapassa a 10 metros, BENITO & GUTIERREZ (1987).

### *RÚSSIA*

A área territorial constituída por rochas carbonáticas abrange 40 % na Rússia, e apresenta, a exemplos de outros países, vários problemas advindos dos fenômenos cársticos. Embora com uma grande extensão de ocorrências carbonáticas, a literatura pesquisada não relata casos daquele país.

### *HUNGRIA*

Na Hungria, JUHÁSZ et al. (1995), descrevem que a carstificação é polifásica nos carbonatos do triássico superior, sendo as principais causas: infiltração das águas de chuvas, movimentos neotectônicos locais, atividades hidrotermais magmáticas recentes.

### *IUGOSLÁVIA*

A superfície carbonática iugoslava corresponde a 28 % do território nacional, onde são cadastradas mais de 10.000 dolinas, destas, a maioria encontra-se na Croácia, BOZICEVIC & PEPEONIK (1987).

### *ESLOVÉNIA*

Os terrenos cársticos constituem 43% do território, sendo que 1/3 da população habita sobre estas regiões carbonáticas.

Geomorfológicamente, são regiões que constituem platôs e depressões, com alta densidade de dolinas, podendo atingir até 100 dolinas /km<sup>2</sup>. Predominando as dolinas com dimensões entre 30-50 metros de diâmetro, e profundidades, entre 5-15 metros, SEBELA & MIHEVC (1995).

Os carbonatos são constituídos por calcários e dolomitos com alta resistência ao cisalhamento: 500KN/m<sup>2</sup>. Os ângulos dos taludes das estradas encontram-se entre 3:1 e 1:1, quando muito fraturados e carstificados 1:1,5.

### *INGLATERRA*

COOPER (1995), relaciona os maiores problemas geológico-geotécnicos, na Inglaterra, as ocorrências de rochas gipsosas de idade Permiana, seguidas pelas sequências de gipsos de idade triássica.

Com estes exemplos mundiais, percebe-se que mesmo com a variação litológica, estrutural e climática, pertinentes aos vários países, existem feições e formas de relevo típicas de dissolução. Este fato é possível porque sugere uma história paleoclimática diferente da atual, principalmente nas regiões áridas e semi-áridas.

Por outro lado, também deve-se ressaltar que em todo mundo, a carstificação apresenta seus aspectos positivos, com retorno econômico à alguns países, pois propiciam a exploração turística das cavernas; visitação em campos de lapiás; são rochas armazenadoras dos maiores volumes de água subterrânea, bem como produzem as mais significativas vazões, onde estão situados os mais famosos hotéis da Europa e dos EUA.

Além destes mananciais hídricos e turísticos, não deve-se esquecer que estas rochas, fornecem matéria prima para mais de uma centena de tipos de indústrias de transformação, e ainda, por serem excelentes armazenadores de gás e petróleo.

Outros usos, mais atuais dizem respeito ao aproveitamento dos espaços subterrâneos como a construção de túneis, ZHANG et al (1993), rodovias, ferrovias, condutos para passagem de energia elétrica, abastecimento de água, dutos telefônicos. Sem dúvida, a utilização de dutos naturais oriundos de rochas carstificáveis, exige um grandes cuidados e investimentos, pois os riscos são maiores quando comparados a rochas não carstificáveis.

É importante frisar também a ocorrência de acidentes naturais, Figura 49, bem como as perdas econômicas, Figura 50, registrados por organismos internacionais. Embora deva ressaltar, que a origem destes acidentes e desastres, são provenientes de várias causas geológicas, não restringindo-se aos terrenos carbonáticos.

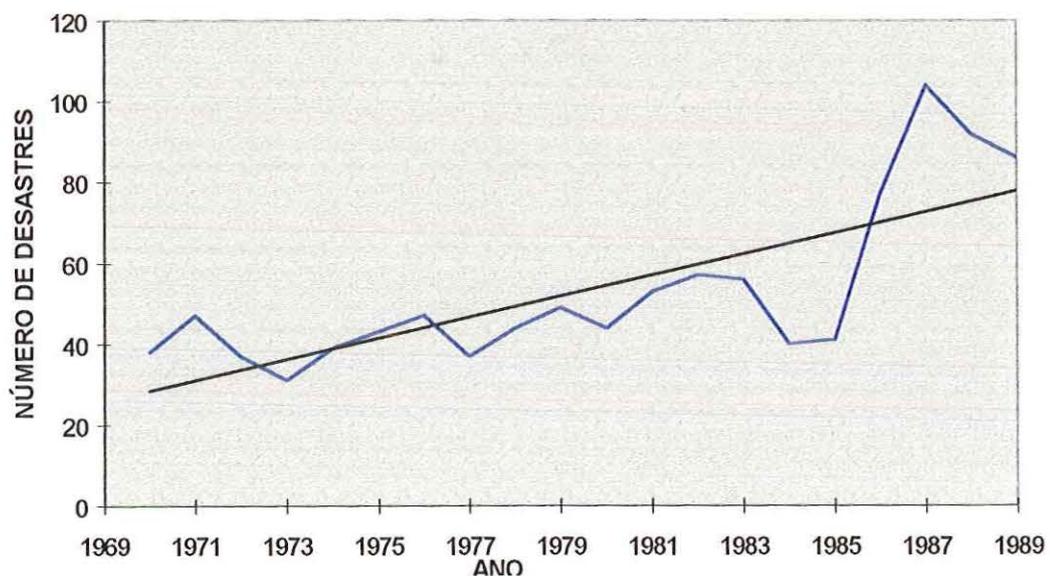


FIGURA 49 - Número de acidentes naturais no período de 1970-1989.

Fonte: SIGMA 2/90, Swiss reinsurance Company (1990) apud CERRY (1994)

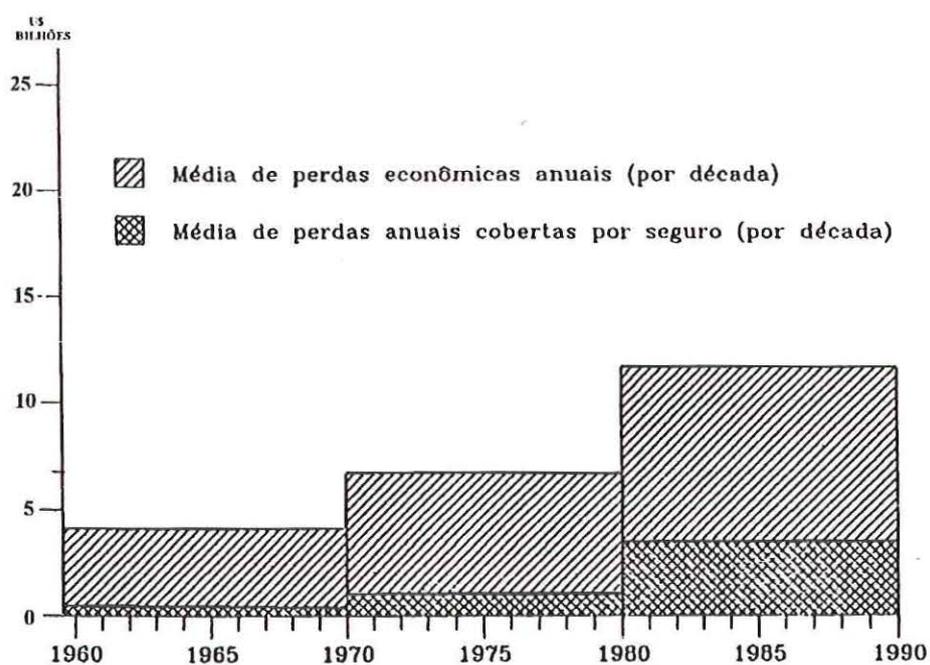


FIGURA 50 - Perdas econômicas e asseguradas causadas por desastres naturais no período de 1970-1989. Fonte: Organización de Las Naciones Unidas -ONU (1992) apud CERRY (1994).

## OS TERRENOS CARBONÁTICOS NO BRASIL

### 7.1. OCORRÊNCIAS DE ROCHAS CARBONÁTICAS NO BRASIL

KARMANN (1995), em uma estimativa preliminar, considera que o território brasileiro apresenta uma área carbonática entre 5 a 7 %.

A análise comparativa entre o Mapa Geológico do Brasil com o mapa de Províncias Espeleológicas do Brasil, mostra que há coincidência entre as ocorrências de rochas carbonáticas com as províncias espeleológicas brasileiras (cavernas - carste coberto).

NAKAZAWA et al. (1990), também mencionam este fato, além de alertarem que estas áreas são potenciais ao fenômeno de subsidências e colapsos, principalmente naquelas em que a urbanização e industrialização estão em franco desenvolvimento, e destacam aquelas que apresentaram problemas de colapso e/ou subsidência, tais como:

- A porção norte da região metropolitana de São Paulo
- A região urbanizada a norte de Curitiba
- As áreas urbanas a norte de Belo Horizonte

Além destes casos, cita-se ainda os problemas ocorridos na cidade de Nobres (MT) e na Chapada de Diamantina, município de Iraquara (BA).

Este último caso, divulgado pela imprensa no programa Via Brasil/Globo News, exibido dia 06/01/98, reportou sobre colapsos que vem ocorrendo na região desde 1932, quando toda sede de uma fazenda desapareceu repentinamente, dando lugar a um lago cárstico profundo. Além de que, ao longo da rodovia pavimentada que dá acesso à este município, está assentada sobre grandes cavernas num trecho de 23 km, e, em alguns locais, a espessura do calcário, entre leito da estrada e a base do teto das cavernas, é de apenas 3 metros. Como o tráfego é intenso e pesado, as vibrações provocaram fendas nos calcários e destruíram vários espeleotemas.

Como pode ser observado o número de ocorrências cársticas no Brasil é muito reduzido, porém este fato não quer dizer que problemas desta natureza não existam, mas porque não são divulgadas no meio técnico-científico ou imprensa. Pois, como exposto nas figuras abaixo, número de ocorrências carbonáticas no Brasil é significativa. Além de que, mais de 2000 cavernas estão cadastradas no país.

A seguir, relaciona-se as unidades geológicas com ocorrências de rochas carbonáticas, em território brasileiro, Figura 51, seja como litologia predominante, ou subordinada, representando depósitos de calcário, dolomito ou mármore. Os limites também não significam que sejam exatamente estes, pois podem não estar aflorando na superfície do terreno, NAKAZAWA et al. (1990). Os números apresentados no mapa correspondem as áreas de ocorrência destas unidades geológicas:

- |  |   |
|--|---|
| 1. CPT - Grupo Tapajós; Formação Itaituba              | 23. PMcd - Grupo Chapada Diamantina                                       |
| 2. Ka - Grupo Acre; Formação Rio Azul                  | 24. Pa - Faixa de Dobramentos Araçuaí                                     |
| 3. Pigm - Fm Rio Fresco; Un. Gemaque                   | 25. . Psb - Grupo Bambuí, Subgrupo Paraopeba                              |
| 4. PMb - Grupo Beneficiente                            | 26. PSrp - Grupo Rio Pardo  |
| 5. PZpb - Formação Pimenta Bueno                       | 27. Psu - Grupo Una   |
| 6. Plc - Complexo Colomi                               | 28. QPHc - Formação Caatinga  |
| 7. Pj - Formação Jurucutu                              | 29. PMet - Grupo Estrondo   |
| 8. Psub - Grupo Ubajara                                | 30. PMax - Grupo Araxá  |
| 9. PScd - Supergrupo Canudos                           | 31. PSSm - Gr. Serra da Mesa  |
| 10. PPjb - Grupo Jaibaras                              | 32. PMar - Grupo Arai   |
| 11. Cpi - Formação Piauí                               | 33. PMn - Grupo Natividade  |
| 12. Ppf - Formação Pedra de Fogo                       | 34. PSv - Formação Vazante  |
| 13. Jbr - Formação Brotas                              | 35. PMt - Grupo Tocantins   |
| 14. Kbh - Grupo Bahia; Kmz - Fm Marizal                | 36. PMcb - Grupo Cuiabá   |
| 15. Ku - Formação Urucutuca                            | 37. PSc, Psar - Gr. Corumbá, Fm. Araras                                   |
| 16. Ks - Grupo Sergipe; Fm Cotinguiba                  | 38. PI(U-B)a, PI(B)ps - Gr. Amparo, Comp. Paraíba do Sul                  |
| 17. Kco - Supergrupo Coruripe                          | 39. Psj - Gr. São João del Rey  |
| 18. Kp - Grupo Paraíba                                 | 40. PSa, PSsr, PSe - Gr. Açungui, São Roque, Complexo Embu                |
| 19. Kap - Grupo Apodi                                  | 41. A(T)sm, A(B)rs - Comp. Sta Maria Chico, C. Metamórfico-migmatítico RS |
| 20. Ksa - Formação Santana                             | 42. PSbr - Grupo Brusque  |
| 21. A - Complexo Gnaissico-migmatítico de Minas Gerais | 43. Ppd - Grupo Passa Dois  |
| 22. Pim - Supergrupo Minas                             |   |



FIGURA 51 - Principais unidades geológicas constituídas parcialmente por carbonato. Mapa do Brasil 1:2.500.000, compilado por NAKAZAWA et al, 1990.

As Tabelas 17, 18, 19 e 20 pertencentes a este tópico, referem-se as ocorrências de carbonatos nos municípios brasileiros, e encontram-se no *Apêndice I*, apresentando os seguintes dados: na primeira coluna a *UF* (unidade de federação) brasileira; na segunda, o *Tipo de ocorrência*, que corresponde a forma de ocorrência destas rochas, que podem constituir-se de: reservas, depósitos, ocorrências, lavras em exploração ou abandonadas; nas terceiras e quartas, correspondem ao *Município* e os *Locais* onde estas rochas são aflorantes,

neste caso, podem estar relacionados a uma ou duas localidades, ou mesmo a várias. Por convenção, quando cita-se *vários*, significando dizer que naquele município existem no mínimo três localidades diferentes constituídas por rochas carbonáticas; a *Idade Geológica* está representada na coluna cinco, salientando-se que a maioria das ocorrências de calcários, de idade arqueana, foram remobilizadas no brasiliano; a última coluna, refere-se as *Litologias Associadas*, são os tipos litológicos em que as rochas carbonáticas encontram-se encaixadas ou justapostas.

Considerando o levantamento bibliográfico, tem-se no Brasil, pelo menos 968 municípios que apresentam pelo menos uma ocorrência de rocha carbonática, seja calcário, dolomito, mármore e/ou evaporitos (gipsita, halita e anidrita).

Este levantamento foi baseado nas seguintes consultas: (1) Banco de Dados da CPRM, via internet, atualizado em julho de 1997, onde estão cadastradas 2397 ocorrências de calcários; 326 de dolomitos; 331 de mármore e, em torno de 100 locais de evaporitos; (2) Associação Brasileira de Produtores de Cal/ABPC (1978); e na listagem de dados essenciais dos requerimentos de pesquisa e lavra, classificada pelo Sistema Código de Mineração/SICOM/DNPM, maio/1997.

O tratamento destes dados permitiu a elaboração de histogramas, que resumem a distribuição dos tipos carbonáticos por município, sendo apresentados a seguir nas Figuras 52, 53, 54 e 55.

A partir destes histogramas, concluiu-se que:

- dos 26 estados brasileiros, mais o do Distrito Federal, apenas no estado do Acre não foram encontrados, na literatura e banco de dados disponíveis, referências que citam sobre a ocorrências de quaisquer dados destes tipos rochosos.
- os estados de Minas Gerais e Bahia detém o maior número de municípios com ocorrências de rochas carbonáticas, seguidos pelos estados de SP, CE, GO, PE, RN, entre outros.

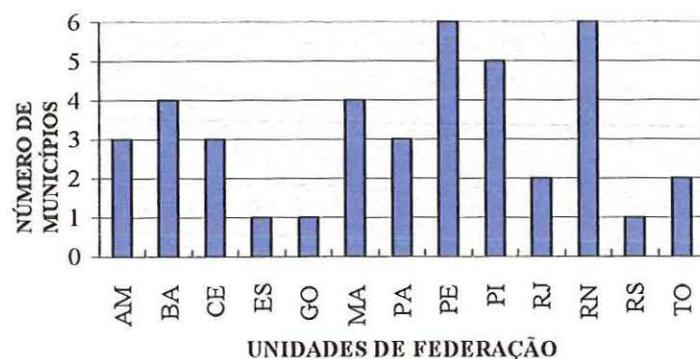


FIGURA 52 - Números de Municípios com ocorrências de **EVAPORITOS** por Unidades de Federação.

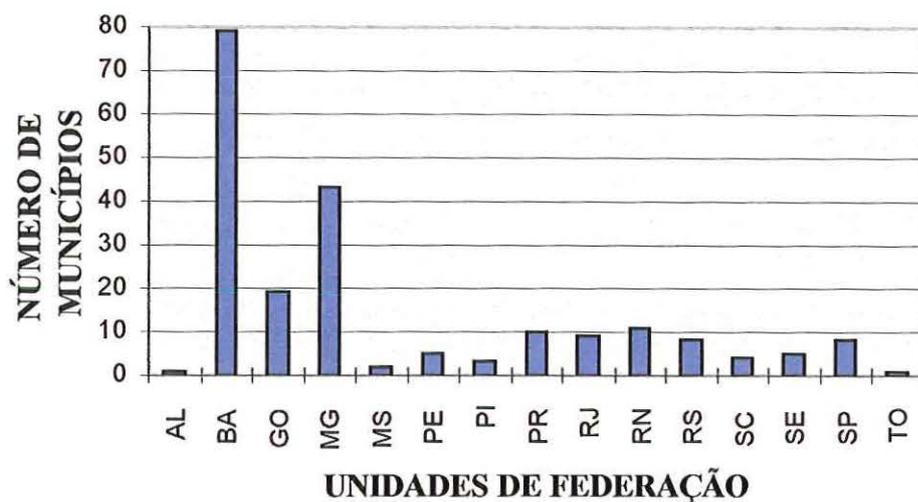


FIGURA 53 - Números de Municípios com ocorrências de **MÁRMORES** por Unidades de Federação.

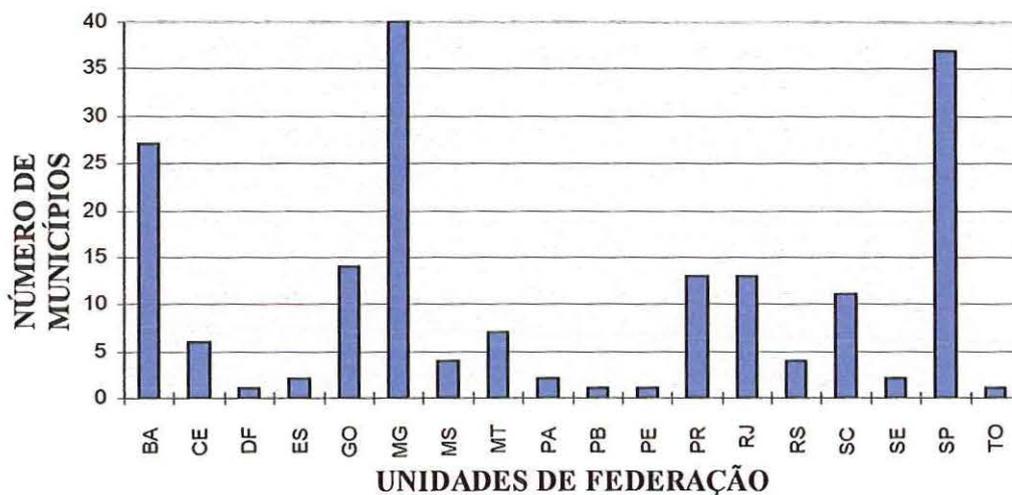


FIGURA 54 - Números de Municípios com ocorrências de **DOLOMITOS** por Unidade de Federação.

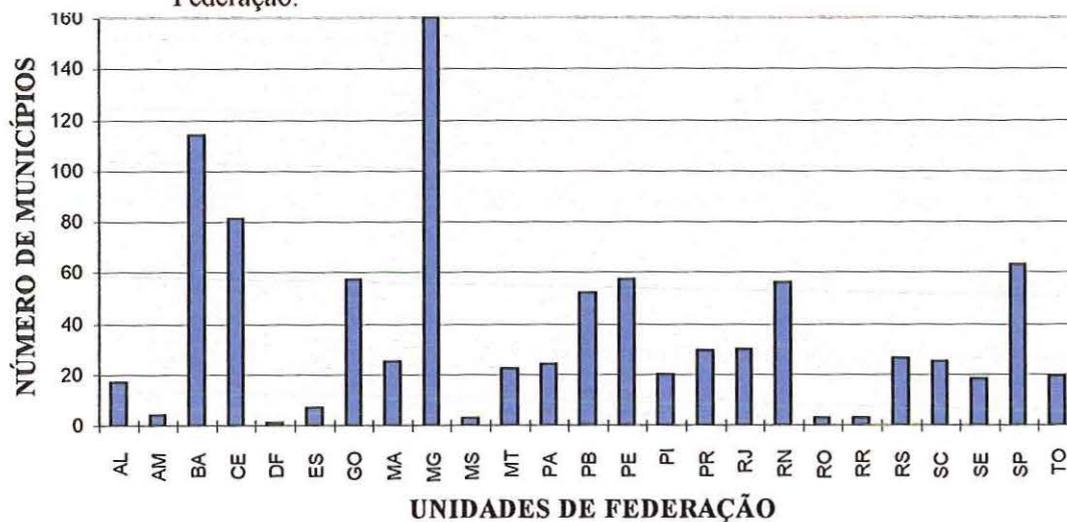


FIGURA 55 - Números de Municípios com ocorrências de **CALCÁRIOS** por Unidade de Federação.

Embora alguns estados brasileiros ocupem destaque em relação aos números de ocorrência, como assinalado nos quadros anteriores, a Figura 56 demonstra que não existe uma relação direta entre o volume das reservas de rochas carbonáticas, com o número de ocorrências em municípios brasileiros.

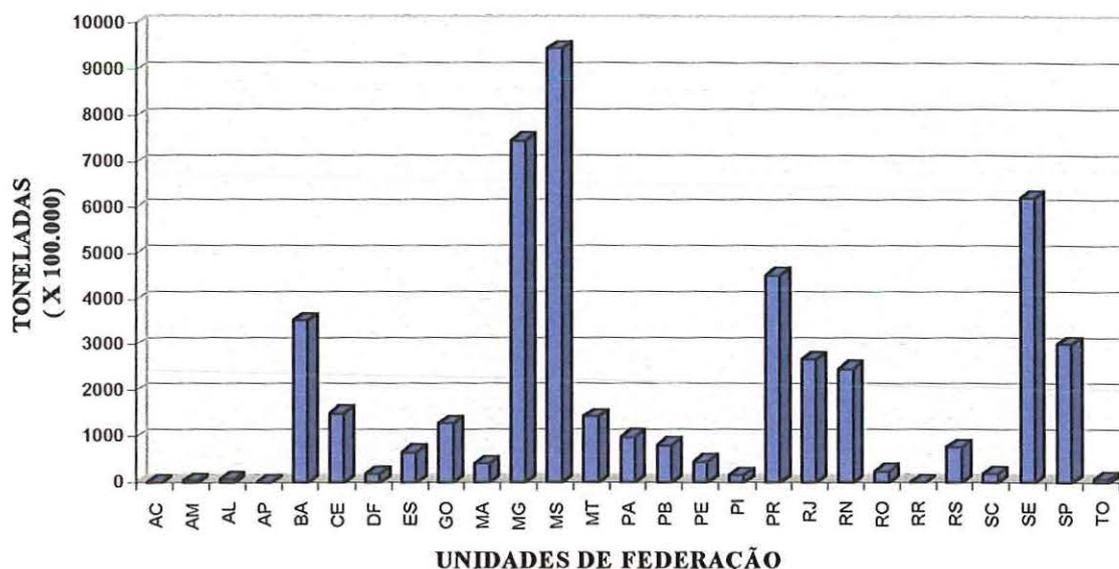


FIGURA 56 - Volume das reservas brasileiras de rochas carbonáticas por Unidade de Federação. Fonte: DNPM, 1991.

Na Figura 56 estão incluídos os quatro grandes grupos de rochas carstificáveis, ou sejam, calcários, mármore, dolomitos e evaporitos. Para o caso do estado de Sergipe, deve-se ressaltar que os evaporitos constituem 90 % das reservas, nos demais predominam calcários.

Concluindo-se, segundo dados do Departamento Nacional de Produção Mineral/DNPM (1991), as maiores reservas carbonáticas encontram-se, em ordem decrescente, nos estados de Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Sergipe, Paraná, Bahia, São Paulo, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, entre outros. Estes dados estão relacionados ao volume das reservas brasileiras, não significando que o mesmo ocorra em relação a extensão territorial que ocupam no Brasil.

## 7.2. TRABALHOS SISTEMÁTICOS SOBRE CARSTE NO BRASIL

Os trabalhos sistemáticos realizados em áreas cársticas brasileiras, sob o enfoque da Geologia de Engenharia, são bastante escassos, e como exemplo destes estudos preventivos e/ou corretivos de colapsos e subsidência, citam-se:

- A primeira avaliação geotécnica, em terrenos cársticos, provavelmente foi realizado por COSTA NUNES et al. (1976), nas cidades de Votorantim e Capão Bonito, ambas no estado de São Paulo, para corrigir problemas de fundações.
- Em 1986/87, utilizando-se métodos da cartografia geotécnica, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo - IPT, na cidade de Cajamar, SP. Estes trabalhos foram publicados por PRANDINI et al. (1987), NAKAZAWA et al. (1990).
- Em 1988, na cidade de Sete Lagoas, os trabalhos foram coordenados conjuntamente pela Universidade Federal de Minas Gerais, Prefeitura Municipal, Defesa Civil, Polícia militar, Cruz Vermelha e voluntários, sendo publicados por SILVA (1988).
- Estudos de viabilização para construção de barragens, foram realizados pelo IPT em 1989 e 1990, nos vales dos rios São Francisco e Ribeira do Iguape, e tiveram como objetivo avaliar as áreas com possíveis fugas de água, NAKAZAWA (1994).

Entretanto, existem outras pesquisas realizadas que merecem destaque, e que poderão auxiliar estudos regionais de Geologia de Engenharia em terrenos carbonáticos, tais como:

- “Estudos das Regiões Cársicas” elaborado por DOLABELA (1958), que aborda desde alguns aspectos teóricos, espeleológicos, humanos e históricos, bem como ilustra e explica algumas formas de carstificação ao norte de Belo horizonte, MG,
- Na região norte de Minas Gerais, o aquífero cárstico do Jaíba foi estudado visando estabelecer as potencialidades hidrogeológicas, e definir aspectos metodológicos de interpretação dos dados dos aquíferos cársticos, em clima semi-árido, SILVA (1984).
- A Carta Geotécnica da Grande São Paulo (1985), chama a atenção aos fenômenos cársticos naquelas áreas onde as rochas carbonáticas são aflorantes, sem comentar sobre o castre coberto, NAKAZAWA (1990).
- KOHLER (1989), realizou estudos geomorfológicos que abordam os processos responsáveis pela dinâmica e evolução do relevo cárstico em regiões tropicais. Quanto a ocupação destes terrenos o autor apenas cita sobre o uso racional do meio físico no planejamento agrário, urbano e aos problemas advindos da ocupação em relação a poluição dos aquíferos.
- O livro CAVERNAS - O Fascinante Brasil Subterrâneo, LINO (1989), expõe aspectos conceituais sobre o carste; ambientes cavernículas; fenômenos espeleológicos; espeleotemas; paisagens cársticas e um panorama das cavernas brasileiras,
- KARMANN (1995) abordou aspectos geomorfológicos, geoespeleológicos, hidrológicos e hidrogeológicos no alto do Vale do Rio Ribeira do Iguape, entre os municípios de Apiaí e Iporanga, SP. O autor definiu zonas fluviocársticas; estimativas de idade dos vales fluviais e condutores subterrâneos; sequência evolutiva da espeleogênese de sistemas de cavernas;

monitoramento hidrológico e hidroquímico de um sistema de caverna; a relação entre o condicionamento estrutural e hidráulico da morfologia subterrânea; e avaliou a previsibilidade do local de ocorrência de cavidades e da provável profundidade de condutos cársticos.

- A Carta Geotécnica do Estado de São Paulo (1995), relata que neste estado os fenômenos cársticos, em sua grande maioria, concentram-se no Vale do Ribeira.

Ainda existem outras pesquisas, apresentadas sob forma de dissertações, relacionadas a carstes regionais, tais como:

- GUERRA, A.M., Processos de Carstificação e Hidrogeologia do Grupo Bambuí na Região de Irecê, BA. Dissertação de mestrado. UFBA. 1986.

- FERRARI, J.A. A Interpretação de Feições Cársticas na Região de Iraquara, BA. Dissertação de mestrado. UFBA. 1990.

- SEABRA, G.F. Estudo Geomorfológico da região cárstica de Andaraí. Uma contribuição à conservação e cavernas. Dissertação de mestrado. UFPE. 1991.

Sob o ponto de vista espeleológico, existem no Brasil, uma grande variedade de trabalhos, realizados tanto pela Sociedade Brasileira de Espeleologia, como também pelos vários grupos espeleológicos distribuídos pelo país.

### **7.3 DESCRIÇÃO DOS PRINCIPAIS TRABALHOS REALIZADOS EM CIDADES BRASILEIRAS COM PROBLEMAS CÁRSTICOS**

Publicamente, as notícias de ocorrências de subsidências e/ou colapso nas cidades brasileiras são bastante restritas, pois referem-se aos casos de Mairinque/SP - 1981; Cajamar/SP - 1986/1987; Sete Lagoas/MG - 1987/1988; Curitiba/PR e Nobres/MT - 1992.

Provavelmente, as razões de tão poucas ocorrências de acidentes geológicos, considerando-se o número de ocorrências e a área de abrangência de carbonatos no território brasileiro, estejam relacionadas aos seguintes aspectos:

- a grande maioria das áreas carbonáticas esteja ocupada para fins agricultura e pecuária, e, nestes casos, quando estes fenômenos ocorrem ficam restritos ao conhecimento da população local;

- em relação aos assentamentos urbanos sobre estes terrenos, embora não exista nenhum estudo específico, podem sugerir que ainda não interferiram na aceleração dos fenômenos cársticos. Principalmente, porque a grande maioria dos municípios brasileiros apresentam pequena taxa populacional e industrial;

- um problema cultural dos representantes do poder público, ou seja, pelo receio que a

divulgação destes problemas provocará uma demanda sócio-econômica do município.

Outro aspecto fundamental que deve ser abordado no Brasil, é a elaboração de um estudo das condições essenciais para o desenvolvimento das características geomorfológicas, estruturais, litológicas e climáticas, a fim de estabelecer um macrozoneamento em função destes atributos, para então avaliar sua condição atual de carstificação.

A seguir, faz-se uma breve descrição dos acidentes geológicos ocorridos em áreas urbanas, e citados na literatura brasileira:

Dentre estes centros urbanos, apenas os estudos em Sete Lagoas e Cajamar foram publicados com a descrição dos trabalhos corretivos e preventivos que foram realizados, na época do acontecimento dos problemas geológicos, descritos a seguir:

### **CAJAMAR**

A área urbana constitui-se de um carste coberto, onde foi elaborada uma Carta de Risco, na escala 1:2.000, sendo delimitadas três zonas por PRANDINI et al. (1987):

- 1- *Zona Desprovida de Risco*, que corresponde às áreas não sujeitas a carstificação por não apresentarem vestígios de calcários,
- 2- *Zona Sob Observação*, são áreas sujeitas a subsidências e colapsos, com indícios de carstificação, mas sem evidências da aceleração do problema. Constituem áreas impróprias a ocupação urbana, sujeitas a acompanhamento sistemático da evolução dos fenômenos e liberada temporariamente a ocupação,
- 3- *Zona Condenada*, são áreas que apresentam evidências de franca e acelerada evolução dos fenômenos. Interditada à ocupação urbana.

Para atingir estes resultados, foram executadas as seguintes etapas de trabalhos:

- Levantamento geológico,
- Mapeamento e instrumentação das trincas, em solos e edificações, com clinômetros e extensômetros,
- 26 sondagens mecânicas a percussão em solo e, 12 rotativas em rochas,
- Nivelamento geométrico de precisão, em 172 marcos topográficos,
- Estudos Geofísicos
- Estudos hidrogeológicos como acompanhamento das variações de nível d'água nos poços tubulares profundos e em 29 piezômetros simples ou múltiplos, instalados em furos de sondagens a várias profundidades, além de testes de bombeamento.

### **SETE LAGOAS**

O abatimento na área central de Sete Lagoas iniciou-se com dimensões de 2 metros de diâmetro e 3 de profundidade. Após 06 horas, suas dimensões chegaram a 09 metros de

diâmetro e 05 metros de profundidade. Transcorridas 34 horas após a deflagração do problema, o diâmetro atingiu 22 metros e a profundidade manteve-se constante, e com o nível freático estabilizado a 04 metros.

A primeira medida foi retirar os moradores dos arredores e a construção de um enrocamento de pedras de grande diâmetro ao longo do talude em torno da área de colapso acompanhada por subsidência.

Para avaliar as condições naturais do terreno, foram realizadas 04 sondagens mecânicas; sondagens geofísicas (arranjo schlumberger e arranjo dipolo-dipolo); e interpretação de fotografias aéreas e imagens Landsat TM, para relacioná-las com as estruturas regionais.

As possíveis causas atribuídas ao fenômeno foram: (1) o rebaixamento do nível de águas subterrâneas, estimulado pela estiagem prolongada que ocorreu no ano anterior; (2) que a área urbana é bastante instável, apesar da profundidade elevada das cavidades, em torno de 50 metros.

O autor, SILVA (1988), também chama atenção para com as cidades vizinhas, onde há o mesmo comportamento geológico, e fenômenos semelhantes poderão acontecer.

### ***VOTORANTIM E CAPÃO BONITO***

Em relação ao tratamento do terreno para fins de implantação de obras, cita-se os casos ocorridos nas cidades de Votorantim, SP e Capão Bonito, SP. Os trabalhos foram realizados por COSTA NUNES et al. (1976).

Durante a fase de sondagens para ampliação das fábricas de cimento, foram encontradas cavidades subterrâneas. Em Votorantim, estavam preenchidas com argila mole, algumas a mais de 40 metros de profundidade e, em Capão Bonito, encontravam-se vazias ou parcialmente preenchidas com material silte-arenoso e micáceo fôfo.

Em ambos casos, o tratamento consistiu na retirada de todo o material inconsolidado até uma determinada profundidade, abaixo das fundações das estruturas, e na substituição por calda de cimento. A extração foi feita através da circulação de água e ar, em seguida, após a lavagem interna retornar limpa, fez-se a injeção de cimento. No caso das cavidades vazias, por razões econômicas, o material de preenchimento foi uma mistura de argilo-cimento ou argamassa.

Após este tratamento no terreno, foram realizadas sondagens mecânicas com coleta de amostras, para avaliar as novas condições da área de ampliação industrial.

## MÉTODOS DE INVESTIGAÇÃO INDIRETA

Os métodos de estudo aplicáveis à detecção e cavidades subterrâneas, tem sido amplamente abordados em vários encontros técnico-científicos no mundo todo, e demonstraram que não existe uma única metodologia ou técnica eficaz para assegurar resultados satisfatórios

Entretanto, é possível estabelecer determinados linhas e sequências de estudos para estabelecer-se as potencialidades do uso e ocupação de um terreno cárstico. Tema este abordado no Capítulo X.

De uma maneira geral os métodos utilizados nas mais diversas metodologias de avaliação de terrenos cársticos, envolvem (1) as técnicas indiretas, representadas pelos produtos do sensoriamento remoto e pelos métodos geofísicos, e (2) pelas técnicas diretas, representadas por sondagens mecânicas. Neste capítulo tratar-se-á apenas dos métodos indiretos de prospecção, uma vez que as técnicas diretas (prospecção geotécnica) são tratados no capítulo X, que estabelece uma proposta de avaliação geológica-geotécnica em terrenos sujeitos a problemas cársticos.

### 8.1 – USO DE SENSORES REMOTOS

Os produtos de sensoriamento remoto constituem-se em fotografias aéreas e imagens de satélite, estes últimos tem despertado grande interesse nos desde duas décadas atrás. E, são utilizados para estudos preliminares da investigação do terreno de áreas propensas ao risco de subsidência e colapsos, enquanto que, a exploração geofísica, a exemplo dos métodos diretos, permite informações mais detalhadas por extrapolação, KENNIE & EDMONDS (1988).

A fotografia aérea é um antigo recurso que tem grande valia na avaliação de terrenos cársticos, principalmente por permitir estereoscopia e por serem produtos de baixo custo para aquisição, permitindo uma análise direta e indireta das feições e formas de relevos cársticos.

destacando-se entre os vários tipos as fotografias coloridas por apresentarem melhores contrastes.

Entretanto, para as condições brasileiras, um grande entrave são as datas e as escalas que recobrem o território brasileiro, ou sejam, constituem fotografias em preto & branco tomadas na década de 60 (1964, 1965).

Quanto as imagens de satélite deve-se considerar que durante a avaliação destes terrenos, na maioria dos casos, esta técnica não permite reconhecer as feições do endo e/ou exocarste, tendo em vista a resolução espacial destes produtos, principalmente em se considerando trabalhos em escalas grandes (maiores que 1:10.000). Porém, possibilita inferir as condições litológicas, estruturais e geomorfológicas.

Desta forma, o uso de imagens de satélite constituem uma ferramenta de trabalho para avaliação de terrenos cársticos apenas quando algumas condições básicas forem atendidas, a saber: (1) a escolha adequada e compatível com a escala do trabalho de avaliação da área; (2) as épocas do ano da passagem do imageador; (3) utilização de técnicas adequadas de geoprocessamento, em consonância com as informações e limitações que podem ser obtidas em cada tipo de imagem de satélite.

A escala da imagem a ser utilizada é um aspecto fundamental, pois está condicionada aos objetivos do trabalho pretendido, ou seja, há uma relação direta com as características dos sistemas de satélite, onerando demasiadamente os custos do geoprocessamento em escalas de detalhe, tendo em vista o sistema de satélite à ser adotado, Tabela 21.

Quanto a época do ano, deve-se ter em mente que as imagens apresentam diferenças, que se devem ao teor de umidade e a cobertura vegetal. Desta forma, é salutar a obtenção de produtos em pelo menos duas épocas distintas para melhor reconhecer as características da área objeto de trabalho, assim como livres de ruídos, por exemplo, cobertura de nuvens.

Na escolha de uma determinada técnica de detecção remota deve-se ter atenção, não só nas características das informações, mas também às limitações de cada tipo de satélite. Isto é pertinente porque cada técnica é baseada na energia emitida ou refletida pelos corpos na superfície terrestre, numa gama específica de comprimento de onda do espectro eletromagnético, pois o tipo do sensor influencia no realce de determinadas características do meio físico.

Assim, na Tabela 21 faz-se uma descrição sucinta dos sistemas de satélite, devendo-se contudo lembrar das condições descritas nos parágrafos anteriores, para que se obtenha êxito nos objetivos propostos.

TABELA 21 – Exemplos de imagens aplicadas a estudos em terrenos cársticos (ALBRECHT, 1998)

SISTEMAS DE SATÉLITES	PAÍS/ANO	RESOLUÇÃO ESPACIAL	PERIODICIDADE	COBERTURA DA CENA	APLICAÇÕES
JERS-1 (Radar)	Japão/1992	18 metros	44 dias	-	- independe da iluminação solar - permite estereoscopia
ERS (Radar)	Agência Espacial Européia (ESA)	30 metros	33 dias	-	- independe das condições atmosféricas - traspasa copas de árvores - boa profundidade na superfície em comprimentos de ondas maiores e terrenos sem umidade
LANDSAT TM5 (Bandas 1 a 7)	EUA/1982	30 metros	16 dias	185 x 185 km	<i>Banda 1:</i> mapeamento de áreas costeiras; diferenciação solo e vegetação; mapeamento de florestas, manchas urbanas, rodovias... <i>Banda 2:</i> Feições agro-culturais; sensível a presença de sedimentos em suspensão; <i>Banda 3:</i> bom contraste entre áreas ocupadas; vegetação natural e culturas agrícolas, áreas urbanas, estradas; variação litológica com pouca cobertura vegetal; drenagens; <i>Banda 4:</i> Geobotânica, quantidade de biomassa; culturas agrícolas; geomorfologia, solos e geologia; <i>Banda 5:</i> Sensível ao teor de umidade;- stress hídrico, discriminação de nuvens, neve e gelo; <i>Banda 6:</i> Contrastes térmicos entre rochas, solos, vegetação e água: atividade geotermal; <i>Banda 7:</i> Geomorfologia, solos e geologia; umidade da vegetação e do solo.
SPOT (XS1, XS2 e XS3)	França/1986	20 metros (Multiespectral) 10 metros (Pancromática)	26 a 5 dias	60 x 60 km	Pancromática: Preto e Branco; boa estereoscopia; compatível a escala 1:50.000; Multiespectral (MSS) (colorida): XS1: Sensível a presença de sedimentos em suspensão XS2: Bons contrastes entre áreas ocupadas com ou sem vegetação; variação litológica com pouca vegetação; mapeamento de drenagens; uso e ocupação do solo; áreas agrícolas XS3: Geomorfologia; rugosidade das copas das florestas
EARLYBIRD	-/1997	3 metros (Pancromática) 15 metros (multiespectral)	1,5 a 5 dias	3 x 3 km (Pancromática) 15 x 15 km (multiespectral)	- Atualização da cartografia urbana - precisão cartográfica 1:10.000 - - precisão de informações do meio físico e biótico - permite geração de mapas temáticos

Autor: Kurt João Albrecht (1998)

## 8.2. PROSPECÇÃO GEOFÍSICA

Os métodos de prospecção geofísica possibilitam a obtenção de informações sobre as estruturas das rochas e outras características do terreno, através da medida de uma determinada propriedade física, por meio de fontes naturais ou artificiais.

Estas técnicas indiretas de investigação, apresentam algumas vantagens em relação aos métodos diretos de prospecção, por permitirem a aquisição de dados em períodos relativamente curtos. Em contrapartida, os resultados geofísicos podem possibilitar a elaboração de mais de um modelo geológico para uma determinada área, o que exige profissionais experientes para obtenção de resultados satisfatórios.

Além disso, o sucesso de uma campanha geofísica deve valer-se da escolha da técnica, ou do conjunto de técnicas, mais adequadas aos objetivos da investigação. Este procedimento, aumenta muito a probabilidade de êxito na detecção e caracterização das cavidades.

Dentre os principais métodos utilizados para a detecção de cavidades subterrâneas, destacam-se os métodos eletromagnéticos; gravimétricos; sísmicos; e eltroresistividade.

### *MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS*

Este método de prospecção geofísica baseia-se na indução de correntes elétricas em estruturas condutoras existentes na subsuperfície.

O método consiste em gerar ondas eletromagnéticas na superfície, através de um transmissor que pode ser uma bobina ou um cabo elétrico de corrente, ou uma antena que emite ondas eletromagnéticas.

As medidas de impedância podem ser realizadas utilizando-se uma corrente alternada, e forma de seno, que flui ininterruptamente durante a obtenção das medidas – Domínio da frequência; ou através de uma corrente contínua que é periodicamente ligada e desligada – Domínio do Tempo

Os métodos eletromagnéticos permitem bons resultados na detecção de cavidades, desde que contenham materiais mais condutores que a rocha encaixante, por exemplo, água, materiais inconsolidados, etc. O método também é aplicado na prospecção de dolinas, preenchidas por sedimentos mais condutores.

A Tabela 22 apresenta resumidamente, o princípio de funcionamento, os tipos de cavidades detectáveis, as vantagens e desvantagens desta técnica geofísica, quando aplicada em terrenos cársticos.

TABELA 22 - Métodos Eletromagnéticos.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	- medidas da amplitude do campo eletromagnético
TIPO DE CAVIDADE DETECTÁVEL	- todos os tipos
PROFUNDIDADE DE INVESTIGAÇÃO	- depende das características elétricas do terreno e da frequência utilizada
VANTAGENS	<ul style="list-style-type: none"> <li>- atinge profundidades de investigação em terrenos com condições favoráveis a propagação de ondas eletromagnéticas, a baixas frequências</li> <li>- detecta pequenas cavidades</li> <li>- detecta grandes cavidades próximas a superfície do terreno preenchidas com material mais condutor que a encaixante</li> <li>- são rapidamente executáveis</li> <li>- baixo custo operacional</li> <li>- dispõe de várias modalidades</li> <li>- aplicável em qualquer escala</li> </ul>
CONDIÇÕES DESFAVORÁVEIS	<ul style="list-style-type: none"> <li>- presença de terrenos de alta condutividade</li> <li>- presença de fraturas, cavidades com formas geométricas muito irregulares e de descontinuidades no interface solo-rocha, mascaram registros</li> <li>- as técnicas convencionais podem ser afetadas por linhas de alta tensão, etc</li> </ul>

modificado de MOREIRA, 1988.

Estes métodos apresentam variações de acordo com a frequência (alta ou baixa) e tipo da fonte (ativa ou passiva), entre eles destacam-se o SLINGRAM e VLF (*Very Low Frequency*), bem como a técnica do Radar – GPR (*Ground Penetration Radar*)

A técnica SLINGRAM tem grande aplicação na prospecção de cavidades, e de outras estruturas cársticas pouco profundas, principalmente quando associadas com a circulação de águas subterrâneas, VOGELSANG apud MOREIRA (1988). E, permite utilizar desde altas (5000 Hz) a baixas (500 Hz) frequências, o uso de alta frequência possibilita realçar a resposta de estruturas superficiais, enquanto que a baixa frequência ressalta os efeitos de corpos condutores profundos.

O sistema VLF de prospecção, utiliza-se de antenas para transmitir ondas eletromagnéticas primárias. É utilizado com bastante eficácia para indicar descontinuidades (falhas, fraturas), que podem ser evidências indiretas da existência de cavidades.

Este ensaio geofísico foi executado na Barragem de Balbina, Refúgio do Maroaga, no Brasil, utilizando-se uma antena NAA de Cutler, USA, com frequência de 17,8 KHz, para detecção de uma cavidade, entretanto, seus resultados foram mascarados por outra estrutura geológica regional do maciço, MOREIRA (1988). Este fato demonstra a importância que deve ser atribuída a interpretação dos dados geofísicos.

A técnica do radar GPR tem princípios diferentes de propagação eletromagnética. Neste caso, há a emissão de microondas numa frequência entre 1 a 1000 MHz, sendo a faixa entre 30 a 100 MHz, a comumente utilizada para prospecção de cavidades subterrâneas, BALLARD (1983).

MOREIRA (1988) mostra que a profundidade da estrutura reflectora pode ser expressa por:

$$h = Vt/2,$$

onde,

h - profundidade da anomalia reflectora

V - Velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas (EM) do meio (metros/segundos)

t - tempo de propagação das ondas EM em segundos,

E, quando a constante dielétrica do terreno for conhecida, h é obtido pela seguinte equação:

$$h = t/2 \sqrt{C/\epsilon_r}$$

onde,

h - profundidade da anomalia reflectora

C - Velocidade de propagação das ondas (EM) no ar ( $3 \times 10^8$  metros/segundos)

t - tempo de propagação das ondas EM em segundos,

$\epsilon_r$  - Constante dielétrica do terreno (adimensional)

Em determinados tipos de terrenos rochosos (arenitos, evaporitos e calcários), quando apresentarem baixo teor de umidade e pouca ou nenhuma argila, as microondas podem atingir várias dezenas de metros, observando-se facilmente as anomalias. enquanto que, em terrenos muito condutores e na presença de água, a profundidade de investigação é limitada, pois os materiais condutores atuam como barreiras a propagação destas ondas.

### **MÉTODOS GRAVIMÉTRICO**

A prospecção gravimétrica baseia-se na medição das alterações locais do campo gravitacional, consequentes da distribuição heterogênea de massas volumétricas na crosta terrestre. Estas variações, traduzem um excesso ou deficiência de massa em relação ao terreno que se está investigando. Suas características são apresentadas na Tabela 23.

Como a prospecção gravimétrica possibilita detectar variações do campo gravitacional, seu uso é possível para detecção de cavidades, pois estabelece relações entre cavidades preenchidas ou não, com o material encaixante.

Para a prospecção de terrenos cársticos, ou para outras finalidades na solução de problemas da Geologia de Engenharia, o método sofre uma modificação quanto ao espaçamento das estações, denominado de *prospecção microgravimétrica*, que consiste em

estabelecer uma malha de estações que não excedam alguns metros. O tratamento e interpretação dos dados são semelhantes a técnica convencional.

TABELA 23 - Método gravimétrico.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	- medidas de densidade total da rocha
TIPO DE CAVIDADE DETECTÁVEL	- todos os tipos
PROFUNDIDADE DE INVESTIGAÇÃO	- é em função do contraste de densidade - sensibilidade do gravímetro - das dimensões e geometria das cavidades
VANTAGENS	- detecta pequenas cavidades - permite uso em zonas urbanas - fornece informações quantitativas - aplicado em escala local ou regional
CONDIÇÕES DESFAVORÁVEIS	- requer excessivo rigor na condução dos trabalhos de campo - relevo muito irregular - custo do equipamento

modificado de MOREIRA, 1988

Para as questões de Geologia de Engenharia, a literatura estrangeira, recomenda-se o gravímetro com precisão de 0,001 milligal. Embora, o equipamento frequentemente utilizado tenha precisão de 0,01 milligal.

Os valores da atração gravitacional obtidos pelos trabalhos de campo são submetidos a várias correções, cujo objetivo é retirar os efeitos que não correspondem a anomalia. Estas correções incluem a correção ar-livre; Bouguer; relevo; interação Sol-Terra-Lua (marés); latitude e a deriva instrumental.

Após efetuadas as correções, os resultados são apresentados em mapas de isovalores, perfis ou gráficos tridimensionais. As cavidades geralmente são delimitadas pelos mapas de isovalores.

O mapa Bouguer representa a soma de todos os efeitos de massas, sejam profundas ou superficiais, razão pela qual é considerado como a soma do mapa de anomalia regional (efeito das massas profundas) com o mapa de anomalia residual (efeito de massas superficiais).

A gravimetria poderá trazer bons resultados se forem tomadas algumas medidas especiais durante o levantamento de campo, quais sejam: estabilização e calibração do gravímetro; levantamento geométrico e topográfico de alta precisão.

Isto se faz necessário numa campanha para a Geologia de Engenharia, porque as anomalias, geralmente estão em intervalos menores que 10 milligals, e sabendo-se que a variação gravimétrica do campo terrestre é de 0.3084 milligal por metro (altitude), pode-se atribuir uma anomalia pela simples variação topográfica do terreno.

Além disso, de uma maneira geral, antes de atribuir-se uma anomalia à uma cavidade vazia, deve-se considerar outras hipóteses sobre as variações de massa, que são comuns em terrenos cársticos, por exemplo:

- presença de várias e pequenas cavidades subterrâneas naquela seção vertical;
- cavidades preenchidas por água ou materiais inconsolidados;
- espessos depósitos superficiais absorvidos por uma dolina;
- mudanças na litologia dos depósitos superficiais;
- variação na profundidade do nível freático;
- interseção de canais de dissolução
- presença de zona intensamente fraturada.

### ***MÉTODOS SÍSMICOS***

Os métodos de prospecção sísmica baseiam-se na geração de ondas elásticas na superfície do terreno ou próximo a ela, através de fontes sísmicas (explosivos, queda de peso, martelo sísmico, rifles sísmicos).

As ondas geradas, (longitudinais-P, transversais-S, superficiais) propagam-se tridimensionalmente. Estas ondas, ao se propagarem, causam um pequeno movimento momentâneo, com deslocamento de partículas dos materiais.

As ondas P induzem às partículas, vibrações na mesma direção de sua propagação, provocando movimentos de compressão e dilatação. São ondas que se propagam em todos meios: sólidos, líquidos e gasosos, e representam as ondas de propagação mais rápida.

As ondas S movimentam as partículas na direção perpendicular à propagação, provocando movimentos cisalhantes. Enquanto que as ondas superficiais causam um tipo especial de movimento elíptico no solo, onde parte se propaga paralelo ao solo, e outra, perpendicular, provocando movimentos verticais e horizontais, MOONEY apud MALAGUTTI (1991).

O uso destas técnicas para a detecção de cavidades, está na razão de que a onda sísmica, quando encontra um espaço vazio ou materiais desagregados de preenchimento, diminui sua velocidade de propagação, em razão da impedância acústica dos materiais do interior da cavidade serem inferiores às da rocha encaixante.

Os principais métodos de prospecção sísmica são a reflexão e refração, e baseiam-se nas medidas das ondas longitudinais.

### Método da Refração Sísmica

O método consiste na determinação do tempo de chegada das ondas sísmicas, originadas por algum tipo de fonte, até os geofones dispostos e alinhados na superfície do terreno, segundo uma direção pré-determinada.

Os resultados da investigação são apresentados em curvas tempo-distância, onde a velocidade de propagação das camadas é acumulativa, ou seja, a refração sísmica não permite a detecção direta de cavidades.

Este método é amplamente empregada para determinar a profundidade do substrato rochoso, em projetos de estradas e túneis, e com reserva, para detectar cavidades, McMANN (1987).

Assim, apenas o uso deste método para a prospecção de cavidades não é recomendável, pelas seguintes razões: (1) os raios sísmicos quando refratados à uma superfície subjacente com cavidades, ou à uma camada de diferente espessura, poderão fornecer o mesmo tipo de anomalia no gráfico tempo-distância; (2) quando o diâmetro da cavidade é menor que a profundidade que ela se encontra, menor a resolução, ou seja, a anomalia pode ser perturbada pelos efeitos de alteração e topografia do substrato rochoso.

Outro cuidado especial que deve ser considerado, durante o levantamento de campo, é quanto ao espaçamento entre os geofones e as linhas sísmicas, pois se muito espaçados, não irão detectar pequenas cavidades. O mesmo irá ocorrer quando as linhas forem pouco espaçadas, não detectando grandes cavidades.

### Método da Reflexão Sísmica

No método de reflexão sísmica são registradas as ondas refletidas na superfície de separação entre dois meios, desde que apresentam diferentes impedâncias acústicas.

As ondas são geradas por uma fonte que chegam a receptores alinhados na superfície do terreno. Assim, estas ondas podem chegar ao receptor diretamente ou por reflexão quando atingem camadas subjacentes.

Os resultados também são apresentados em gráficos tempo-distância, entretanto, os tratamentos matemáticos são diferentes.

O maior problema associado a esta técnica é a baixa resolução, quando utiliza-se fontes sísmicas de baixa frequência, problemas estes semelhantes a refração sísmica. Isto ocorre porque quando o comprimento de onda incidente é maior que a cavidade, a energia refletida à superfície será muito baixa, dificultando sua identificação.

A Tabela 24, apresenta um resumo do princípio e funcionamento, tipo de cavidade detectável, profundidade de investigação, vantagens e desvantagens do método.

TABELA 24 - Métodos sísmicos.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	- medidas da velocidade das ondas elásticas
TIPO DE CAVIDADE DETECTÁVEL	- todos os tipos
PROFUNDIDADE DE INVESTIGAÇÃO	depende da: - frequência utilizada - do contraste da impedância acústica - das dimensões das cavidades - da técnica empregada (a reflexão sísmica atinge grandes profundidades) - da velocidade de propagação da rocha encaixante e do material de preenchimento
VANTAGENS	- dispõe de várias modalidades de prospecção - grande difusão na geotecnia
CONDIÇÕES DESFAVORÁVEIS	- em zonas urbanas é de difícil execução - a refração sísmica não detecta diretamente a cavidade - custos dos equipamentos - relevo muito irregular

modificado de MOREIRA (1988)

### **MÉTODO RESISTIVIDADE ELÉTRICA**

O método da eletroresistividade consiste em medir as variações das resistividades elétricas dos materiais subsuperficiais, através de um campo elétrico gerado artificialmente na superfície do terreno.

A resistividade ( $\rho$ ) está ligada aos mecanismos pelos quais a corrente elétrica se propaga no material, sendo que nas rochas são caracterizados pela sua condutividade ( $1/\rho$ ), que pode ser iônica ou eletrônica.

A *condutividade eletrônica* é devida ao transporte de elétrons na matriz da rocha, sendo sua resistividade governada pelo modo de agregação dos minerais e do grau de impurezas.

A *condutividade iônica* deve-se ao deslocamento dos íons existentes na água contida nos poros e fissuras das rochas.

Para o caso da prospecção geofísica por métodos elétricos, determina-se a resistividade aparente, pois o meio físico natural constitui-se por heterogeneidades e anisotropias, causando distorções no campo potencial.

Assim, o resultado obtido por este método traduz a diferença de resistividade de uma estrutura e o meio encaixante, sendo mais conspícua, quanto maior for esta diferença.

A Tabela 25, apresenta um quadro-resumo do princípio e funcionamento, tipo de cavidade detectável, profundidade de investigação, vantagens e desvantagens do método.

TABELA 25 - Métodos da eletroresistividade.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	- medição da resistividade aparente das rochas
TIPO DE CAVIDADE DETECTÁVEL	- todos os tipos
PROFUNDIDADE DE INVESTIGAÇÃO	- depende do contraste de resistividade; das dimensões e geometria da cavidade; e da configuração eletródica
VANTAGENS	- bons resultados - dependendo do dispositivo, pode fornecer resultados quantitativos (polo-dipolo) - pode atingir grandes profundidades de investigação - apresenta várias configurações - grande difusão na geotecnia
CONDIÇÕES DESFAVORÁVEIS	- afetado pela presença de de correntes telúricas (naturais) e de correntes artificiais (linhas e cabos elétricos) - a resolução diminui com aumento da profundidade e espaçamento entre eletrodos - relevo irregular

Fonte: MOREIRA, 1988.

MOREIRA (1988) enumera vários fatores que influenciam nos resultados obtidos pela eletroresistividade, e que devem ser considerados na utilização desta técnica para a detecção de cavidades:

1. O contraste de resistividade de certos tipos de calcários e evaporitos, por apresentarem resistividades aparentes elevadas, poderão mascarar cavidades vazias nos seus interiores;
2. Interferências de heterogeneidades geológicas e hidrogeológicas do subsolo, tais como: irregularidades nos interfaces, variações granulométricas, mudanças de fácies, zonas de cisalhamento, falhas, fraturas, variações piezométricas, variações da porosidade, etc, podem resultar em anomalias semelhantes as cavidades;
3. As irregularidades topográficas da superfície do terreno são proporcionais às distorções das anomalias, podendo conduzir a interpretações e localização errôneas das cavidades;
4. Configuração eletródica - a escolha do melhor arranjo de eletrodos deve considerar a configuração adotada, o espaçamento entre os eletrodos, e malha de investigação;
5. Interferências por fatores antrópicos - a atenção para este caso, é que algumas atividades antrópicas afetam a qualidade dos dados obtidos, tais como: cercas, linhas de altas tensão, condutos enterrados (água ou eletricidade), ou ainda as obras inerentes a uma zona urbana ou rural.

## **ESTUDO DE CASO:**

### **NOBRES, MATO GROSSO**

#### **9.1 HISTÓRICO**

Relatos de moradores registram que, na zona de ocorrências das rochas carbonáticas, pequenos colapsos vem ocorrendo há pelo menos 30 anos, percebidos geralmente ao longo das estradas e ruas. Também nas residências, esporadicamente, algumas trincas surgiam sem causa visível, a mais de uma década.

Informações obtidas no DNER do estado de Mato Grosso, sediado em Cuiabá, relatam que ao longo do eixo da rodovia BR 163/364, entre o trecho das cidades de Rosário Oeste e Nobres, é comum a ocorrência de recalques e colapsos, com constantes serviços de recuperação. Um destes colapsos, em frente a empresa de mineração Nobrecal, atingiu 06 metros de diâmetro, e 4 metros de profundidade.

Entretanto, foi na porção Sul da área urbana de Nobres, que em dezembro de 1992, após uma chuva alta intensidade e pequena duração, que surgiram vários colapsos e subsidências na superfície do terreno.

Como consequência, estes fenômenos resultaram prejuízos à população da área atingida, uma vez que suas residências ficaram danificadas, devido a rachaduras de dimensões centimétricas nas paredes e pisos, e aberturas de cavidades na superfície do terreno, com diâmetros máximos de 5 (cinco) metros, e profundidades até 2 (dois) metros.

Atualmente, é nesta área de ocorrência de colapsos que se dá o vetor de desenvolvimento urbano, pois estão sendo construídos os prédios de administração pública (Fórum, estação rodoviária, prefeitura), e residências de porte médio.

Outro aspecto que comprova a existência do endocarste é a existência de cavernas que existem próximas a área urbana. Estas cavernas, Tabela 26, estão inseridas na mesma formação geológica na qual a área urbana está sobreposta, ou seja a Formação Araras.

TABELA 26 - Relação das cavernas existentes nas proximidades da cidade de Nobres, MT.

NOME	LOCALIZAÇÃO (LatitudeS/LongitudeW)	DESNÍVEL (metros)	PROJEÇÃO HORIZONTAL (metros)
Gruta do Pedregulho	14° 35' / 56° 10'	-	400
Gruta de Nobres	14° 45' / 56° 25'	-	100
Gruta Dr. Aécio	14° 25' / 55° 35'	100	400
Gruta do Quebó	-	100	200
Caverna da Onça I	14° 30' / 55° 30'	150	260
Caverna da Onça II	14° 30' / 55° 30'	80	150
Caverna da Onça III	14° 30' / 55° 30'	70	10

Fonte: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 1991.

O desnível corresponde ao ponto mais elevado (acesso a caverna), e o mais rebaixado. Enquanto que a projeção horizontal é a somatória dos principais eixos, em planta, de cada galeria ou salão.

## 9.2 LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA

A cidade de Nobres localiza-se a 140 km a Norte de Cuiabá, capital do estado de Mato Grosso, conforme mostra a Figura 57.

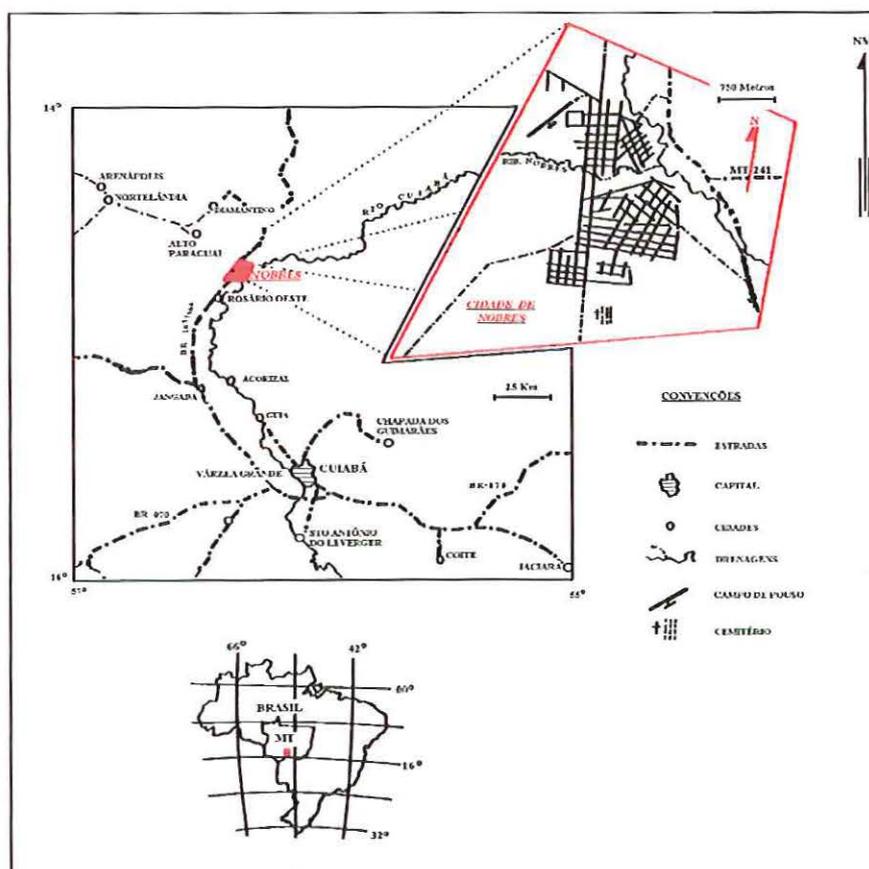


FIGURA 57 - Mapa de Localização do Estado de Mato Grosso; e do perímetro urbano de Nobres, MT.

O acesso à cidade pode ser feito a partir de Cuiabá, pela rodovia pavimentada BR 163/364, passando pelas cidades de Jangada e Rosário Oeste. Outro itinerário por meio da rodovia não pavimentada MT-241, passando pelas localidades de Rio Manso e Marzagão, sendo que esta em épocas chuvosas, apresenta péssimas condições de tráfego.

### 9.3 CONSIDERAÇÕES SÓCIO-ECONÔMICAS DO MUNICÍPIO

A descoberta do ouro e do diamante nos arredores da cidade de Alto Paraguai ocasionou as primeiras ocupações populacionais nessa região, que teve seu crescimento ligado a exploração do solo, por extrativismo mineral, a exemplo do que ocorreu em todo o Norte do estado de Mato Grosso.

Assim, o povoamento de Nobres tem suas origens para servir de pousada para os aventureiros que se dirigiam à região em busca de riquezas minerais.

Em 1943, Nobres foi elevada à categoria de distrito pertencendo a cidade de Rosário Oeste. A sua emancipação para a categoria de Município deu-se em 1963, pela Lei nº 1.943 de 11/11/1963, sendo sua área territorial desmembrada dos municípios de Rosário Oeste e Chapada dos Guimarães.

A agricultura de subsistência baseia-se no plantio de arroz, feijão, milho e banana, nas micro-regiões de solo fértil, principalmente sobre os depósitos de argila residuais das rochas dolomíticas e, intensificadas pelo regime regular das chuvas. A pecuária de corte vem gradualmente vem substituindo áreas agricultáveis.

Atualmente a região encontra-se bastante devastada, em detrimento aos tipos de uso do solo, embora antigamente a riqueza vegetal constituía-se de madeiras-de-lei: Angico; Aroeira; Cedro e Ipês. A existência destas madeiras deve-se pelo fato que esta área encontra-se na zona de transição para a Bacia Amazônica.

Outra fonte de renda do município provém das pedreiras, que fazem extração dos carbonatos, com desmonte semanal por explosivos. Estes materiais, após transformação, são utilizados para a brita, pó corretivo, e cimento Portland. Estas pedreiras instalaram-se na década de 70, sendo duas situadas no perímetro urbano.

Os dados populacionais obtidos pelo censo/1970, IBGE (1978), mostram que naquele ano a população era de 5.692 habitantes, e destes, 70,2% (3344 hab.) residiam na zona rural. Os dados da Secretaria de Planejamento de Mato Grosso/SEPLAN, em 1989, estipularam a

população total em 16.981 habitantes, destes 58% (9849 hab.) residiam na área urbana e, 42% (7132) na área rural. Isto mostra o significativo êxodo rural ocorrido entre 1970 e 1989.

Em 1996 a população era de 15.064 habitantes, em todo o município, e em 1989 de 16.981 habitantes, portanto, ocorreu uma diminuição da população.

Atualmente, a maior área da região constitui-se por cerrados e pastagens, conforme mostra o Mapa de Uso e Ocupação do Solo (Anexo I).

## 9.4 METODOLOGIA

### 9.4.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Esta etapa constitui-se numa revisão bibliográfica específica sobre o contexto geológico regional e a busca de informações geotécnicas da área. Quanto aos aspectos geológicos regionais há vários trabalhos de mapeamento geológico sistemático na escala 1:50.000, enquanto que dados geotécnicos e topográficos são ausentes, dificultando a sequência dos trabalhos realizados.

### 9.4.2 SENSORIAMENTO REMOTO

#### Interpretação de Fotografias Aéreas

Os trabalhos iniciaram-se pela fotoanálise de fotografias aéreas, escala 1:60.000, obtidas em 1966. Este fato limitou muito a realização de estudos nestes terrenos, pois: (1) não mostram as feições menores de dissolução, tais como colapsos, lapiás, etc; (2) a escala é muito pequena para avaliação de terrenos cársticos; (3) o sobrevôo é muito antigo, não permitindo uma análise temporal entre outros pares estereoscópios, principalmente em quando se trata de levantamentos detalhados.

Ainda assim, através da ampliação xerográfica das fotografias aéreas permitiu-se elaborar um mapa fotogeológico, a fim de subsidiar os trabalhos de campo posteriores. Neste mapa constaram os sistemas de drenagens na área urbana; limites geológicos dos materiais rochosos e inconsolidados; lineamentos estruturais, e as compartimentações do relevo.

#### Análise Digital do Terreno

Para análise digital do terreno adquiriu-se imagens de satélite (TM-Landsat 5), no Instituto de Pesquisas Espaciais/INPE, com resolução 30 x 30 metros, nível de correção 6, em CD-rom, constituído pelas bandas 2,3,4,5, e 7,. Também a banda 6 foi solicitada, entretanto,

por questões de tratamento da imagem desta banda pelo INPE, não foi incluída no pacote de aquisição.

Baseados nos objetivos propostos, adquiriu-se duas passagens (29/07/92 e 21/01/93), livres de ruídos, e do mesmo quadrante: base 227 e ponto 70D . Estas datas foram escolhidas porque correspondem, respectivamente, ao período anterior e posterior aos abatimentos do solo, além de enquadrarem-se em dois períodos climáticos diferentes, ou seja, um no período de seca e outro no período chuvoso.

Para o processamento digital das imagens, foram realizados utilizando-se o software ENVI/IDL 2.6, seguindo-se as seguintes etapas de trabalho:

- (1) georeferenciamento baseado em mapas topográficos do IBGE, escala 1:100.000 (únicos disponíveis);
- (2) aplicação de contrastes;
- (3) recorte de uma porção da imagem que abrangesse a cidade de Nobres, MT;
- (4) definição das regiões de interesse para a classificação;
- (5) a edição da imagem recortada, para a elaboração do Mapa de Uso e Ocupação do Solo, classificado pela técnica de Máxima Verossimilhança (MAXVER), com a combinação de Bandas TM 4-5-3.

Para a análise destas imagens através do geoprocessamento digital, foram aplicadas várias técnicas de realce como tentativas de melhorar os contrastes entre os materiais a fim de que fosse possível discernir algumas feições de dissolução das rochas carbonáticas, entretanto, face a resolução espacial destas imagens e as dimensões das formas cársticas na área, este trabalho não apresentou nenhuma conveniência.

Também realizaram-se testes com filtros direcionais para tentar estabelecer correlações das falhas de rasgamento com os colapsos na área urbana, e, da mesma forma que a anterior, não obteve-se sucessos com os resultados obtidos.

Através da aquisição de dois períodos de passagem da mesma cena, pretendeu-se relacionar, ou melhor, verificar as diferentes feições possíveis, tendo em vista que os períodos representam características de umidade da superfície do terreno bastante diferentes. Também neste caso não obteve-se sucesso para inferir alguma feição de dissolução, baseada em diferentes teores de umidade do terreno. As principais diferenças estavam relacionadas a planície de inundação do Rio Cuiabá, o que não constitui objeto deste trabalho

As razões pelas quais os resultados não foram satisfatórios, deve-se a escolha do tipo de sensor, ou seja, imagens de satélite LANDSAT TM5. portanto para a realização de

trabalhos posteriores, com uso de imagens de satélite, deve-se sempre seguir as condições elencadas no item 8.1 do capítulo VIII. O anexo IV ilustra uma imagem no triplete 7-5-3.

### 9.4.3 ATIVIDADES DE CAMPO

#### Mapeamento Geológico Básico

A partir do mapa fotogeológico, fez-se caminhamentos com coleta de amostras, para análises micropetrográficas, e levantamento das feições estruturais (acamamento, fraturas) que resultaram no Mapa Litológico da área urbana e de expansão da cidade de Nobres/MT, escala 1:10.000.

Ainda durante esta fase foram localizados, e reconhecidos, os tipos de feições cársticas e colapsos, bem como os problemas geológico-geotécnicos. Além de entrevistas aos habitantes, para reconhecer o histórico dos fenômenos.

#### Investigação Geofísica

A investigação geofísica foi realizada através do método gravimétrico, estabelecendo-se linhas microgravimétricas, isto é, pequena distância entre as estações de leitura.

No total, foram observadas 970 estações gravimétricas, compreendidas em 09 perfis e obtidas ao longo de 9700 metros lineares, portanto, com espaçamento de 10 metros entre as estações.

O equipamento utilizado foi o Gravímetro G-881, modelo "G", marca Lacoste & Romberg, com precisão de 0,01 milligal.

Como estação base para o levantamento e tratamento de dados utilizou-se o RN 740X, IBGE, coincidente com a estação gravimétrica 8051928, também do IBGE. Os dados desta estação, fornecidos pelo próprio IBGE são:

Altitude: 200,4939 metros

Latitude: -14° 43' 04,70" Sul

Longitude: -56° 19' 46,22" Oeste

Valor da gravidade (g): 978261,81 milligals

A redução dos dados foi tratada pelo *software GRAVPAC for DOS*, desenvolvido pela empresa Lacoste & Romberg. Uma vez obtidos os valores corrigidos, os dados foram transportados para planilha do *software EXCEL for windows*, para a construção dos perfis gravimétricas.

#### **9.4.4 ANÁLISE DOS DADOS**

Os resultados obtidos nas etapas acima discriminadas, permitiram elaborar um modelo cárstico preliminar para área urbana, e uma tabela de classificação, dos graus potenciais de carstificação das rochas carbonáticas e evaporíticas.

E, tendo em vista as dificuldades encontradas durante a realização deste trabalho, propôs-se uma metodologia para avaliação de áreas cársticas, sujeitas aos problemas geológico-geotécnicos que lhe são inerentes.

### **9.5 CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FÍSICO REGIONAL**

#### **9.5.1 CLIMA**

O tipo climático típico da região é Tropical Úmido - AW/CW, segundo a classificação de KÖEPEN (1957). Este clima é caracterizado por apresentar duas estações bem definidas: o período de seca que ocorre de Abril a Setembro (outono e inverno) e, o período chuvoso, entre Outubro e Março (primavera e verão).

A precipitação pluviométrica média anual varia entre 1000 e 1500 mm, e umidade relativa do ar por volta de 80%, com temperaturas médias anuais em torno de 30 °C.

#### **9.5.2 VEGETAÇÃO**

A cobertura vegetal é de cerrado e cerradinho, nas áreas mais elevadas topograficamente encontram-se arbustos contorcidos de pequeno a médio porte, caracterizando os cerrados pobres com solos ácidos. Nas áreas rebaixadas topograficamente, predominam as gramíneas, oriundas da ocupação para uso de pastagens.

A vegetação mais densa, e de maior porte, ainda é observada nas matas de galerias e sobre os morros de rochas carbonáticas, constituindo os cerradões.

#### **9.5.3 HIDROGRAFIA**

A área urbana é recortada por dois cursos de água: o Rio Serragem e o Rio Nobres, e seu afluente da margem direita, o Córrego Cocalzinho, Figura 58.

Estas drenagens são afluentes da margem esquerda do Rio Cuiabá, que está localizado a sul da área urbana. O Rio Cuiabá apresenta-se geralmente meandrante, com vasta planície de inundação que ora mostra depósitos de diques marginais, ora o leito é encaixado estruturalmente, podendo ainda apresentar pequenas corredeiras provocadas pelas litologias mais resistentes, cortando o canal transversalmente.

As drenagens efêmeras de pequeno porte, apresentam um sistema dendrítico, por vezes paralelo, pois seus leitos geralmente estão relacionados às variações litológicas e ao arcabouço estrutural. Nas áreas de descarga para outras drenagens, apresentam pequenos meandros, denotando uma superfície de baixa declividade do terreno.

As drenagens de primeira e segunda ordem, quando sobre a ocorrência de rochas carbonáticas, geralmente constituem drenagens secas (intermitentes) ou cegas (presença de áreas de infiltração ao longo de seus leitos – sumidouros).

#### 9.5.4 GEOMORFOLOGIA

A área está inserida em uma zona de transição geomorfológica, localizando-se sob o domínio de duas unidades distintas: (1) Baixada Cuiabana no extremo noroeste; e (2) Província Serrana, na borda leste-sudeste, Figura 58.

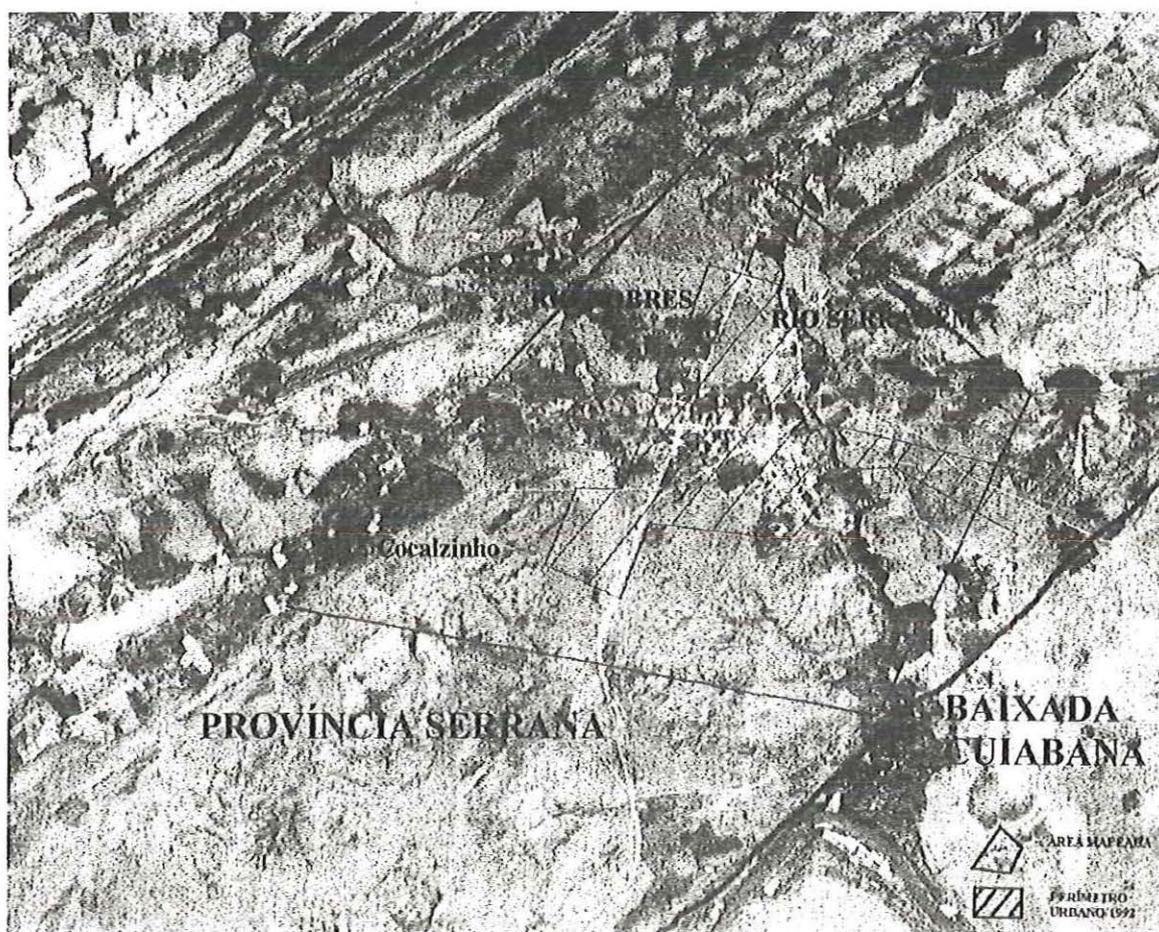


FIGURA 58 - Fotografia aérea das características geomorfológicas regionais.

#### *BAIXADA CUIABANA*

A Baixada Cuiabana caracteriza-se por apresentar relevos arrasados, devido longos processos erosivos que estiveram associados a intensa intemperização das rochas do Grupo

Cuiabá, e por morrotes suavemente ondulados pertencentes às rochas das unidades Bauxi, Puga e Araras, com amplos interflúvios, em ambos casos.

Tendo em vista as variedades litológicas, apresentam um relevo bastante dissecado, seja pela erosão diferencial, ou seja pelas variações paleoclimáticas.

Na faixa de transição entre a Província Serrana e a Baixada Cuiabana, verifica-se uma constante presença de depósitos de tálus, ao longo das encostas, e pequenos morros testemunhos de rochas carbonáticas recortados por pequenos vales fluviais.

### **PROVÍNCIA SERRANA**

A Província Serrana constitui-se por um conjunto de serras paralelas, com dobramentos e falhamentos de camadas areníticas e carbonáticas, separadas por vales encaixados em sinclinais e anticlinais arrasados.

A região de serras apresenta duas direções regionais predominantes, que mostram uma nítida inflexão estrutural. Uma direção se dá de NE-SW, mais precisamente na área que separa as Depressões do Alto Paraguai Cuiabana e, outra, E-W que divide a Depressão Cuiabana da Depressão Interplanáltica de Paranatinga.

### **9.5.5 CRONOESTRATIGRAFIA**

A região está inserida na Faixa de Dobramento Paraguai-Araguaia, constituída por rochas de idade proterozóica superior até paleozóicas, conforme mostra a Figura 59.

As unidades que compõem esta faixa de dobramento são: Grupo Cuiabá, Formação Bauxi, Formação Puga, Formação Araras, Formação Raizama, Formação Sepotuba, Formação Diamantino e Granito São Vicente. A distribuição de algumas destas unidades, podem ser visualizadas na Figura 60.

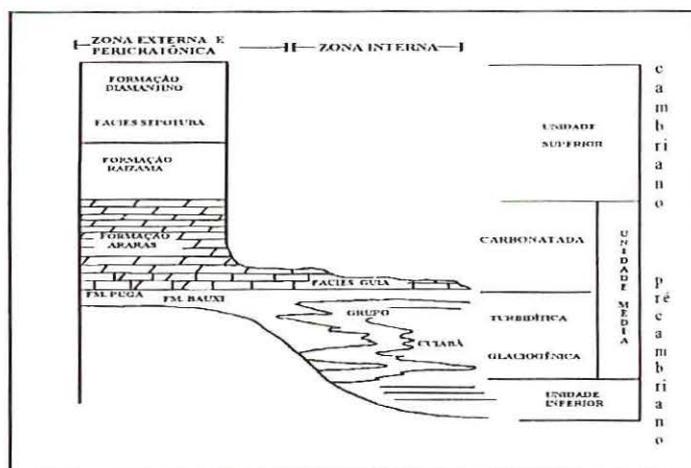


Figura 59 – Coluna Estratigráfica esquemática do Cinturão Paraguai em Mato Grosso, ALVARENGA (1988).

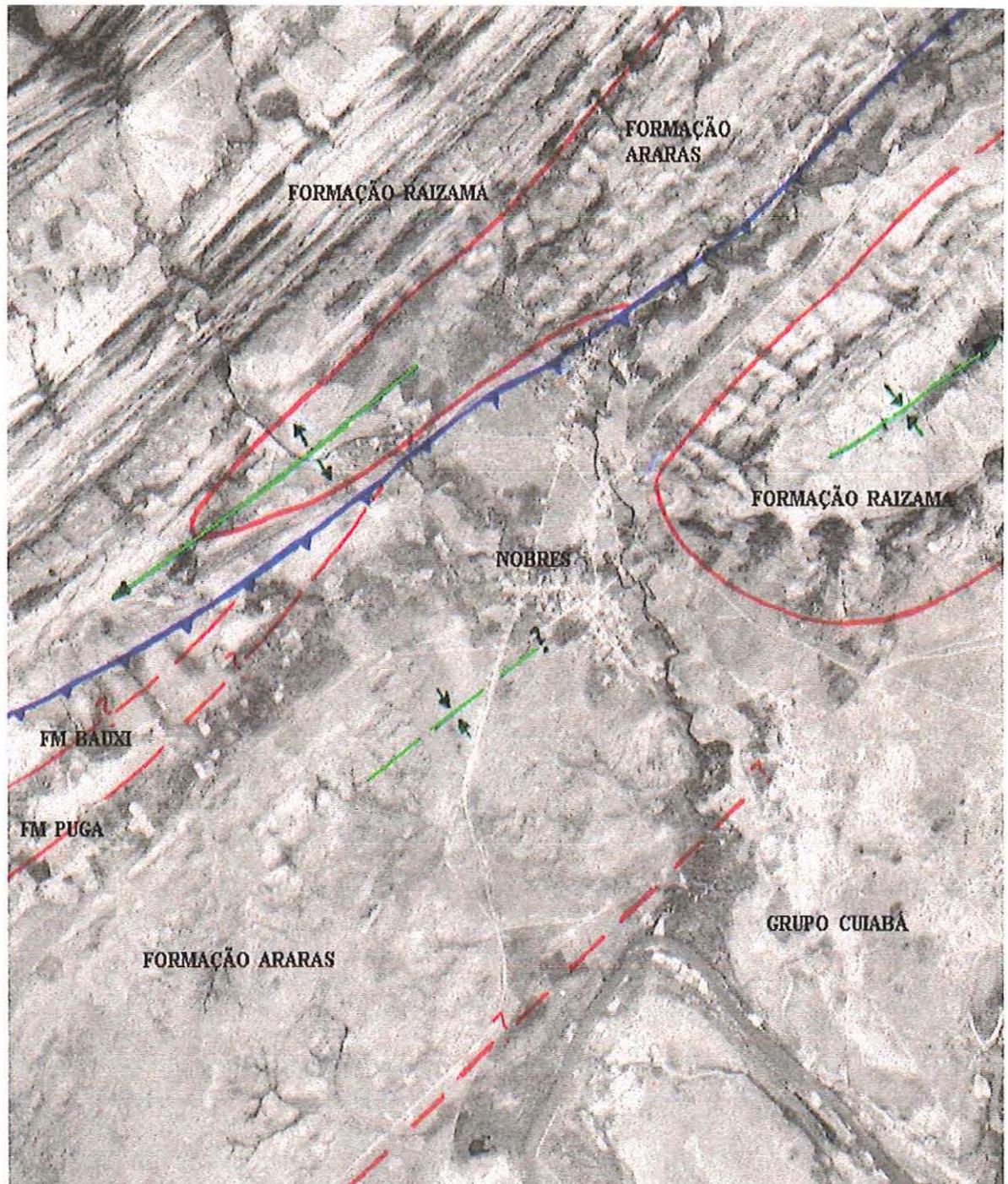


FIGURA 60 - Áreas de ocorrências das unidades geológicas da região de Nobres, MT

A descrição dos aspectos estratigráficos regionais são apresentados a seguir de maneira sintetizada e, baseados em ALVARENGA (1984) e LUZ et al (1978).

### **GRUPO CUIABÁ**

O Grupo Cuiabá está representado por uma sequência predominantemente de filitos com intercalações de quartzitos, metagrauvas, metaconglomerados e metaparaconglomerados, e localmente, com ocorrências de metacalcários e filitos calcíferos - *Fácies Guia*.

As características destas rochas estão relacionadas a: metamorfismo regional (Fácies xisto-verde); intenso tectonismo; escassez de vulcanismo - na região somente são conhecidos alguns plutões graníticos (granito São Vicente) e granodioríticos pós-tectônicos; espessa sedimentação predominantemente terrígena, psamopelítica; e espessa sedimentação de caráter turbidítico com grande contribuição de materiais psefíticos cratônicos, ALMEIDA (1984).

ALVARENGA (1988) levando em consideração as variações faciológicas de um sistema deposicional, identifica nas Formações Bauxi, Puga e parte do Grupo Cuiabá, fácies sedimentares distintas denominadas de Unidade Turbidítica Glaciogênica. Estas unidades geológicas seriam depositadas na mesma linha de tempo geológico, de forma a considerá-las como um depósito de uma mesma bacia marinha, durante um período de glaciação com sedimentação turbidítica para os metassedimentos do Grupo Cuiabá.

Os dados geocronológicos, atualmente disponíveis para as rochas do Grupo Cuiabá, são escassos e indicam apenas a sua idade mínima entre 470 - 400 m.a. Datações Rb/Sr efetuadas sobre os filitos indicam uma idade de  $484 \pm 19$  m.a, com razão inicial de  $Sr^{86}/Sr^{87}$  de 0.743, BARROS et al (1982). Estes autores interpretaram esta idade com os estágios termiais do Evento Geodinâmico Brasileiro.

### **FORMAÇÃO BAUXI**

A Formação Bauxi foi definida por VIEIRA, 1965 apud ALVARENGA (1984), para denominar uma sequência quartzítica da ordem de 190-340 metros de espessura, sobreposta aos filitos do Grupo Cuiabá e sotoposta aos conglomerados da Formação Puga, cuja seção tipo localiza-se próximo a Vila Bauxi, MT.

Litologicamente, esta Formação constitui-se de siltitos, arenitos, folhelhos, argilitos, grauvas e arcósios, com alto grau diagenético, apresentando localmente baixo grau metamórfico, de coloração avermelhada e marrom-amarelada, bastante compactos e ricos em estruturas sedimentares aquosas, tais como estratificações plano-paralelas, cruzadas, e marcas

de onda. Suas exposições podem ser encontradas entre as vilas Bauxi e Moenda até a nordeste da cidade de Nobres.

### *FORMAÇÃO PUGA*

A denominação Formação Puga foi atribuída por MACIEL, 1959 apud ALVARENGA (1984), para aqueles tilitos que afloram no morro do Puga, margem direita do Rio Paraguai e próximo a Porto Esperança, MS. Estas rochas apresentam, localmente, contato superior transicional/gradacional com as rochas carbonáticas (Formação Araras) da Faixa de Dobramento Paraguai..

As rochas que constituem esta Formação são intercalações entre folhelhos, siltitos e arenitos, podendo alcançar até 15 metros de espessura. Uma destas camadas de arenito apresenta estratificações plano-paralelas e cruzadas com seixos pingados de até 20 centímetros de diâmetro, provavelmente relacionados a ação das geleiras.

Esta unidade geológica é facilmente identificada em quase toda a região, geomorfologicamente denominada de Província Serrana.

### *FORMAÇÃO ARARAS*

Os afloramentos de calcários e dolomitos da Formação Araras, que ocorrem na Província Serrana foram reconhecidos por EVANS, 1894 apud ALVARENGA (1984) denominados de "Araras Limestones". Entretanto, trabalhos sistemáticos iniciaram-se com ALMEIDA (1964); OLIVEIRA (1964); VIEIRA (1965); RIBEIRO FILHO (1974); LUZ & ABREU FILHO (1978).

Esta sucessão de rochas carbonáticas apresenta uma sequência basal - Membro Inferior, com detritos clásticos subordinados, que inicia-se com uma variada alternância de margas, folhelhos vermelhos, e conglomerados com cimento margoso ou carbonático. São intercalações delgadas de cor cinza escuro, bancos maciços, localmente evidenciando estratificações plano-paralelas e, mais raras, estratificações cruzadas ou estruturas oolíticas.

O Membro Superior é constituído em quase toda a sua extensão, por dolomitos cinza-claros, localmente esbranquiçados, maciços e de granulação fina. Não foram identificadas estruturas em sacaroide, geralmente associadas a recristalização. Os autores supracitados citam que localmente observam-se estruturas sedimentares tais como estratificação plano-paralela, cruzada, brechas autoclásticas e estromatólitos. Também a silicificação, as vezes muito intensa, é freqüente nestas rochas.

A escassez de estruturas singenéticas, é explicada pelo processo da dolomitização que estas rochas sofreram.

ALMEIDA (1964) atribui, como origem destas rochas, um ambiente marinho nerítico de águas quentes sobre uma plataforma subsidente.

As rochas da Formação Araras são tidas como de idade Cambriana. Esta idade provém da ocorrência, nos calcários, de algas do gênero *Aulophicus*, encontradas a nordeste da cidade de Cáceres, MT, por VIEIRA (1965). SOMMER, 1957 apud VIEIRA (1965), concluiu que estas estruturas algáceas pertencem à uma espécie nova e mais recente que *Aulophicus lucianoi*, que são encontradas na região de Corumbá, MS, onde também afloram as rochas da Formação Araras.

No Grupo Corumbá, equivalente estratigráfico da Formação Araras, foram identificados fósseis que sugerem idade Vendiana para esta unidade, FAIRCHILD & SUNDARAM, 1981; WALDE et al, 1982, apud ALVARENGA (1984).

#### **FORMAÇÃO RAIZAMA**

A denominação Raizama foi dada por EVANS, 1894 apud ALVARENGA (1984), para representar os arenitos feldspáticos que superpõem os calcários da Formação Araras.

ALMEIDA (1964), diz que a sua maior espessura, na Serra do Tombador, está em torno de 1600 metros, adelgando-se em direção às extremidades da Faixa de Dobramento.

Embora sendo os arenitos feldspáticos que deram origem ao nome desta formação, as rochas predominantes são os arenitos quartzosos (ortoquartzitos), de granulação fina a grossa, podendo conter seixos centimétricos de quartzo que podem ocorrer de forma isolada ou em níveis conglomeráticos. Os arenitos feldspáticos pontualmente, e os arcósios só ocorrem na zona de transição para a formação sobreposta.

Estratificações cruzadas de várias dimensões são as estruturas sedimentares mais significativas, apresentando estratos de cores rósea a esbranquiçada. Quando a rocha apresenta-se inalterada, sob o ponto de vista intempérico, estes arenitos mostram-se bastante compactos e com cor cinza, como é o caso na cachoeira da Serra do Tombador, e nos boqueirões do Rio Jaucoara, ALMEIDA (1964).

Outros tipos de rocha também se fazem presente, tal é o caso dos siltitos e folhelhos micáceos de cor chocolate, que formam estratos de dimensões métricas, com estratificação plano-paralela, formando bancadas ao longo das vertentes, devido a erosão diferencial.

O contato para a Formação Sepotuba é do tipo gradacional, ou seja, apresentam camadas interdigitadas com alternância de litologias de ambas as formações geológicas.

### ***FORMAÇÃO SEPOTUBA***

A Formação Sepotuba foi denominada por ALMEIDA (1964), e constitui-se por uma seqüência de sedimentos pelíticos, predominantemente folhelhos, de cor vermelha, marron-chocolate e verdes; siltitos com arenitos finos subordinados. Ocasionalmente, ocorrem níveis de nódulos de calcário.

Vários autores que desenvolveram trabalhos regionais na Faixa de Dobramentos, enquadram esta formação na Formação Diamantino.

### ***FORMAÇÃO DIAMANTINO***

Esta denominação deve-se a ALMEIDA (1964), para definir os folhelhos e siltitos micáceos finamente estratificados, frequentemente calcíferos, onde intercalam-se bancos de arcósios finos, vermelhos e marron arroxeados. O limite inferior desta formação, ou seja, o contato com as formações basais é estabelecido quando encontram-se camadas de arcósios cinza esverdeados, por vezes, diretamente sobreposta as rochas da Formação Raizama.

### ***GRANITO SÃO VICENTE***

Este corpo intrusivo ocorre a aproximadamente 60 Km a sudeste de Cuiabá, MT, tratando-se de rochas graníticas, com tonalidade rósea, heterogranular. Seu contato se faz com os metassedimentos do Grupo Cuiabá, com desenvolvimento de fenômenos termometamórficos, evidenciado pela presença de hornfelds.

Geocronologicamente, vários autores indicaram uma idade entre 483 e 503 m.a.

## **9.5.6 ESTRUTURAS GEOLÓGICAS REGIONAIS**

### **9.5.6.1 AS GRANDES ESTRUTURAS DA FAIXA DE DOBRAMENTOS**

A Faixa de Dobramentos Paraguai, localizada a sudoeste do Cráton Amazônico, é constituída por um longo cinturão de metassedimentos dobrados e metamorfizados, que em direção ao cráton, passam progressivamente às coberturas sedimentares, atingindo mais de 1500 Km de extensão abrangendo os estados de Mato Grosso do Sul e Mato Grosso.

ALVARENGA & TROMPETTE (1993) utilizando-se das denominações estabelecidas por ALMEIDA (1984) para a zona adjacente do cráton e, para toda a Faixa de Dobramentos, caracterizaram três zonas estruturais: (1) Cobertura Sedimentar de Plataforma; (2) Zona Externa Dobrada, com pouco ou sem metamorfismo e (3) Zona Interna Metamórfica

com intrusões graníticas, Figura 61. Uma grande parte das rochas, e sobretudo às da zona interna da faixa, encontram-se recobertas pelas bacias sedimentares pós-ordovicianas, quais sejam: Bacia do Paraná, Bacia do Parecis e Bacia do Pantanal.

As rochas depositadas no domínio cratônico (Formação Puga, Araras, Raizama, e Diamantino) são afetadas por suaves ondulações e uma tectônica rúptil, não penetrativa que se manifesta por falhas normais. Estas falhas são parcialmente reativadas até o Cretáceo.

A Zona Estrutural Externa, dobrada pela orogenia brasileira, é caracterizada por dobras abertas cortadas por falhas inversas. O contato entre as rochas sub-horizontalizadas da plataforma cratônica e as rochas dobradas da zona externa estão cobertos por sedimentos terciários e quaternários da Bacia do Pantanal (Vale do Rio Paraguai). Na área da Província Serrana, correspondente a zona externa, as rochas foram localmente afetadas por um metamorfismo muito fraco, anquizonal, ALVARENGA (1990). Afloram nessa zona externa as Formações Bauxi, Puga, Araras, Raizama, Sepotuba e Diamantino.

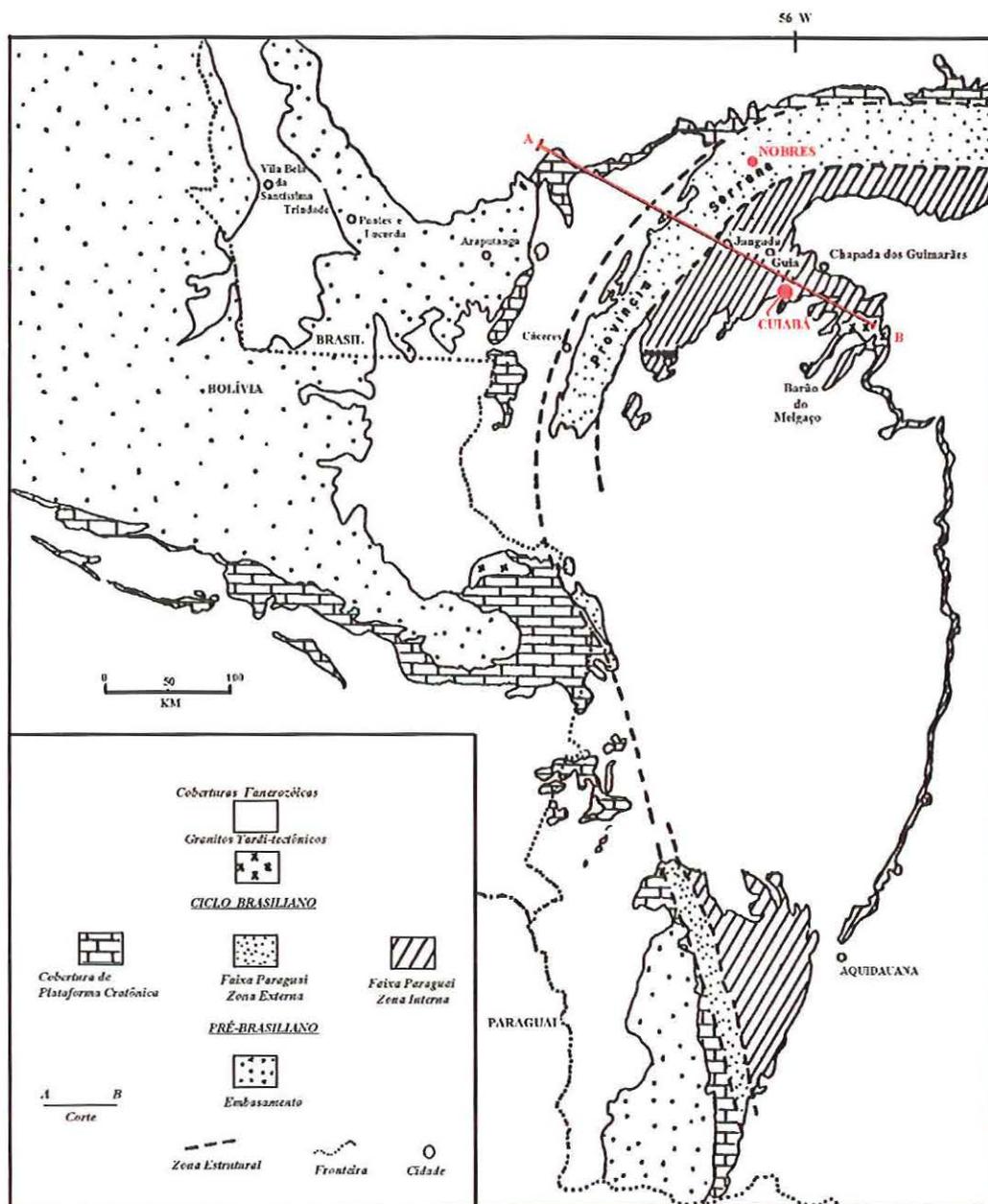
A Zona Estrutural Interna é na sua maior parte representada pelas rochas do Grupo Cuiabá, e localmente, por alguns afloramentos de calcários da Fácies Guia, correspondente lateral da Formação Araras. Esta zona foi afetada por metamorfismo de baixo grau.

O contato entre as zonas estruturais externa e interna dobrada se dá por falhas inversas de alto ângulo, enquanto que na porção oriental suas relações não são reconhecidas por estarem recobertas pelas rochas sedimentares da Bacia do Paraná.

As principais direções estruturais da Faixa de Dobramento Paraguai (eixo de dobras, clivagens e falhas), na região de Cuiabá, MT, estão orientadas em torno de N25E, passando gradualmente para N60-70E na região de Nobres, MT, demonstrando uma inflexão nos contornos da borda cratônica.

#### **9.5.6.2 AS FASES DE DEFORMAÇÃO TECTÔNICA DA FAIXA PARAGUAI**

Baseados nos trabalhos de ALVARENGA (1990) e ALVARENGA & TROMPETTE (1993), pode-se dizer que na região encontram-se quatro fases sucessivas e superpostas, com deformação de idade brasileira. Essas deformações de caráter contínuo foram individualizadas em quatro episódios sucessivos (fases  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ , e  $D_4$ ), entre os quais, as deformações mais marcantes estão relacionadas aos dois primeiros eventos:



FAIXA PARAGUAI E SUAS COBERTURAS CRATÔNICAS ADJACENTES segundo Alvarenga, 1990  
modificado de Barros et al. 1982; Del'Arco et al 1982; Araujo et al, 1982; Litherland et al, 1986.

PERFIL GEOLÓGICO A - B



FIGURA 61 – A Faixa Paraguai e suas Coberturas Cratônicas Adjacentes. ALVARENGA & TROMPETTE, 1993.

**FASE D<sub>1</sub>**

A primeira fase representa a principal fase de deformação em toda a faixa, sendo esta,

o traço estrutural mais marcante, tanto nas zonas internas como externas.

As dobras  $D_1$  tem uma evolução geométrica e contínua na faixa, caracterizando-se por dobramentos abertos nas zonas internas, passando a dobras fechadas, inversas e isoclinais no extremo leste da zona interna. O mergulho alto dos planos axiais  $70^{\circ}$ - $90^{\circ}$  SE na zona externa, passam para  $40^{\circ}$ - $60^{\circ}$  W nos metassedimentos do extremo leste da zona interna, desenhando um meio leque, Figura 61. O eixo dos dobramentos tem caimentos que não ultrapassam  $15^{\circ}$  NE, localmente, estes caimentos podem estar para SW.

A foliação  $S_1$  é uma clivagem de plano axial associada as dobras da fase  $D_1$ . Esta clivagem é bem desenvolvida na zona interna, mostrando uma penetratividade mais forte nas direções Leste e Sul, em seu interior. O plano de clivagem  $S_1$  mergulha para NW com ângulos entre  $40^{\circ}$ - $50^{\circ}$ , podendo localmente apresentar planos próximos a horizontal. Na franja NW da zona interna, os planos  $S_1$  mostram um alto mergulho ( $70^{\circ}$ - $90^{\circ}$ ), ora no sentido NW, ora no sentido SE.

Estes planos de clivagem  $S_1$ , com direções concordantes com as estruturas regionais da faixa, apresentam uma variação na sua intensidade, mostrando uma intensidade crescente da fábrica xistosa  $S_1$ , de WNW para ESE.

Paralelamente a direção regional da faixa dobrada ocorrem pequenos alinhamentos, representados por falhas inversas, com direções quase paralelas aos acamamentos e clivagem  $S_1$ .

Estas falhas inversas são de alto ângulo (superior a  $45^{\circ}$ - $50^{\circ}$  com mergulho para NW). O paralelismo mostra que estas falhas são contemporâneas ou talvez tardia aos dobramentos  $D_1$ . Associadas a estas falhas, algumas faixas miloníticas podem ser vistas próximo a cidade de Cuiabá, MT, com espessuras em torno de 03 metros.

Na zona estrutural interna, a leste da cidade de Cuiabá, também observadas zonas de falhas inversas, acompanhadas da formação de veios de quartzo, de direções concordantes com a estrutura regional  $D_1$ , e com mergulho entre  $25^{\circ}$ - $40^{\circ}$  NW, indicando deslocamento do bloco de NW em relação a SE.

### *FASE $D_2$*

A segunda fase de deformação é encontrada no domínio da zona interna, onde se manifesta pela presença de uma clivagem  $S_2$ . Esta clivagem de crenulação é bem desenvolvida nos filitos e fracamente marcada, ou ausente, nas camadas mais arenosas (quartzitos). Nos filitos a clivagem  $S_2$  está associada à recristalização de minerais filitosos, muitas vezes acompanhados pela reorientação de alguns destes filossilicatos. Geograficamente, esta

clivagem é encontrada em afloramentos de filitos na Grande Cuiabá, e na região W-NW da cidade de Poconé, MT. Nesta última ocorrência, as direções preferenciais são N35<sup>0</sup>-50<sup>0</sup>E com mergulho entre 30<sup>0</sup>-45<sup>0</sup>W, mostrando uma clara vergência para SE.

Em alguns afloramentos que ocorrem na Grande Cuiabá, observa-se deslocamentos de blocos através de planos paralelos e sub-paralelos a S<sub>2</sub>, com vergência para SE. Nestes casos, a clivagem de crenulação SE, pode estar relacionada a uma tectônica de cisalhamento.

### ***FASE D<sub>3</sub>***

A terceira fase de deformação mostra uma vergência para W-NW, ou seja, em direção ao Cráton Amazônico, com clivagem de crenulação plano-axial S<sub>3</sub>, desenvolvida em filitos e ausentes nas camadas de quartzitos e metassiltitos do Grupo Cuiabá. as dobras D<sub>3</sub> são pouco marcadas e com flancos abertos.

A fase D<sub>3</sub> é considerada por ALVARENGA (1986) e, LUZ et al (1988), como responsável pelos dobramentos que incluem as rochas do Grupo Alto Paraguai e as Formações Araras, Puga e Bauxi.

### ***FASE D<sub>4</sub>***

A quarta fase de deformação esta relacionada as dobras de grande comprimento de onda, reconhecidas nos mapas geológicos, pelos seus eixos perpendiculares aos eixos das três primeiras fases de deformação.

Em escala de afloramento, o principal traço estrutural da fase D<sub>4</sub> é um forte fraturamento encontrado tanto na zona interna, externa, e na zona cratônica. O fraturamento tem atitudes N50<sup>0</sup>-70<sup>0</sup> NW com mergulhos entre 80<sup>0</sup> SW a vertical.

Estas fraturas individualizam *microlitons*, inferiores a 2 centímetros de espessura, nas rochas mais plásticas (siltitos, filitos e argilitos), além de provocarem pequenos deslizamentos entre estes.

O granito São Vicente, intrusivo no grupo Cuiabá, apresenta o fraturamento relacionado a fase D<sub>4</sub>.

Este fraturamento indica que ele se estabeleceu após o resfriamento das rochas Grupo Cuiabá e das rochas graníticas. Assim, considerando o caráter tardio-tectônico da intrusão granítica, o fraturamento D<sub>4</sub> foi o último registro rúptil e distensivo, portanto, sendo conseqüente do resfriamento.

Os veios de quartzo que ocorrem na zona interna geralmente estão preenchendo as fraturas de direção NW, sendo muitas vezes mineralizadas com ouro, ALVARENGA (1986), onde é comum o extrativismo por garimpeiros.

### 9.5.6.3 EVOLUÇÃO DA GEOLOGIA ESTRUTURAL REGIONAL

As deformações sucessivas D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub> e D<sub>4</sub> enquadram-se na orogenia brasileira, destacando-se a fase D<sub>1</sub> como a principal orogênese brasileira, enquanto que as fases D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub> e D<sub>4</sub> representam episódios sucessivos de deformação.

Desta forma, as três primeiras fases desenvolveram-se de modo coaxial, orientadas segundo a estrutura regional de direção NE. Enquanto que a deformação mais tardia (D<sub>4</sub>), superpôs-se transversalmente às anteriores, orientada segundo a direção NW, desenvolvendo dobras amplas de comprimento de onda regional, ALVARENGA (1986).

O fraturamento resultante da fase D<sub>4</sub>, segundo ALVARENGA & TROMPETTE (1993), é tardi-tectônico, provavelmente resultante do resfriamento crustal, pois atinge as rochas do Granito São Vicente (granito tardi-orogênico).

O modelo da evolução tectônica da Faixa Paraguai, parece, segundo alguns autores, não se enquadrar nos modelos clássicos de geossinclinais. Pois esta Faixa, mostra um sistema de dobramentos D<sub>1</sub> que a medida que se torna mais intenso, em direção as zonas internas, apresenta dobras assimétricas a isoclinais, com nítida vergência para as áreas internas da faixa dobrada e, conseqüentemente, em sentido oposto ao cráton, ALVARENGA (1990). Por outro lado, dados de atitudes de dobras e de clivagens, que induzem essa vergência contrária ao Cráton do Guaporé, são também registradas por ALMEIDA (1964); LUZ et al (1980); ALVARENGA (1986) e ALVARENGA & TROMPETTE (1993).

### 9.5.6.4 EVOLUÇÃO DO ARCABOUÇO GEOLÓGICO REGIONAL

Estudos sedimentológicos do grupo Cuiabá e de seus equivalentes cratônicos mostram uma evolução lateral de sedimentação que pode ser interpretado como: (1) característica de uma margem passiva, desenvolvida na borda oeste de um oceano de idade brasileiro; (2) acumulação em borda de aulacogeno ou, (3) de um *rifft* intracontinental, ALVARENGA & TROMPETTE (1993).

A deformação destas rochas pode ser interpretada como resultado de uma orogênese de colisão com o desenvolvimento completo de um ciclo de Wilson ou como fechamento de um

aulacógeno, ou ainda, como um *rift* intracontinental, possivelmente com reduzida oceanização. De acordo com a primeira hipótese, o Grupo Cuiabá representaria um paleo-prisma sedimentar em uma antiga margem passiva ou, de acordo com a segunda, um paleo-prisma na borda oeste de um aulacógeno. Nenhum vestígio de crosta oceânica ou de arcos magmáticos de litosfera oceânica foram, segundo ALVARENGA (1990), identificados na região de Cuiabá, MT.

Quanto ao ambiente sedimentar Proterozóico Superior, três grandes unidades litoestratigráficas são individualizadas entre as coberturas sedimentares cratônicas da borda SE do Cráton Amazônico e os metassedimentos da Faixa Paraguai, ou sejam: uma unidade glaciogênica, uma unidade carbonatada e outra, arenítica.

A unidade glaciogênica, contemporânea a glaciação do Proterozóico Superior, foi depositada simultaneamente sobre o talude da plataforma continental, e dentro da bacia - na base do talude. A influência glacial é mais facilmente observada nos sedimentos de cobertura de plataforma (Formação Puga), se comparadas aqueles da zona interna da faixa (Grupo Cuiabá), que foram depositados em uma bacia marginal, e desenvolvida na escarpa da plataforma continental com domínio de uma sedimentação turbidítica.

A unidade carbonatada marca o final da glaciação e inicia sua sedimentação com a elevação do nível do mar. Os calcários escuros e laminados da base desta unidade passam a dolomitos (doloarenitos) que se intercalam com sedimentos arenoso no topo. Estes carbonatos, pertencentes a Formação Araras, caracterizando sedimentação de plataforma marinha rasa, em regime de deposição progracional, culminando com a sedimentação dos arenitos da unidade superior - Formação Raizama. No interior da bacia, esta unidade detrítica, pode ter seu correspondente nos metassiltitos e metaargilitos laminados que se encontram sobrepostos a Formação Guia (unidade carbonatada no interior da bacia).

## **9.6 CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FÍSICO URBANO - NOBRES/MT**

### **9.6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS**

A área urbana está localizada num vale, sobre um substrato de rochas carbonáticas recoberto por sedimentos areno-siltosos, com cobertura pedogênica oriunda destes sedimentos, e com declividades menores que 10 %.

As características climáticas são semelhantes aos dados pluviométricos regionais, ou seja, estações secas e chuvosas bem definidas, e com altas taxas de precipitação. Estas características são descritas a seguir:

## 9.6.2 SUBSTRATO ROCHOSO – *ESTRATIGRAFIA*

Os tipos litológicos encontrados na área urbana de Nobres, MT, pertencem a: (1) Formação, Araras, representada pelo Membro Superior constituído essencialmente por dolomitos; (2) Formação Raizama, onde predominam rochas areníticas; e os materiais inconsolidados, a (3) Coberturas Sedimentares Recentes, que recobrem as encostas e os fundos de vales. Estas unidades, descritas a seguir, estão delimitadas no Mapa Litológico da Área Urbana de Nobres, MT, Anexo II.

### 9.6.2.1 FORMAÇÃO ARARAS

#### *ESTRUTURAS SEDIMENTARES*

O Membro Superior da Formação Araras é constituído predominantemente por dolomitos esbranquiçados e acinzentados, geralmente microcristalino, com intercalações subordinadas de siltitos, arenitos e argilitos calcíferos.

Os tipos de estruturas sedimentares das camadas, geralmente em forma de bancos, são laminações plano-paralelas, evidenciadas pelas lâminas de cores rosa, branca e cinza, sendo que localmente são observados pequenos basculamentos destas laminações, Figura 62A. Também as laminações onduladas e estratificações cruzadas fazem-se presentes, Figura 62B.

A sequência é rica em outras estruturas, tais como concreções silicosas, milimétricas a centimétricas, sob a forma de leitos irregulares, concordantes com a laminação; níveis contorcidos, descontínuos e discordantes; nódulos de sílex; estilólitos, Figuras 62C, 62D e 62E.

Estruturas brechóides foram encontradas na porção SW da área mapeada, mais precisamente nas frentes de lavra das minerações NOBRECAL e COPACEL, onde é encontrada, na parte média da seção, uma camada de aproximadamente 10 metros de espessura de calcarenitos finos, maciços e fortemente fraturados.

#### *PETROGRAFIA*

As seções delgadas constataram que os dolomitos são de natureza cristalina a microcristalina - micrito, Figura 63A, com granulação predominante variando de 0,08 a 0,1 mm, apresentando cristais de dolomita e calcita em mosaicos aproximadamente equigranulares, com alguns cristais bem formados, nítida clivagem ao redor de pequenas cavidades.



A - Laminações plano-paralelas em calcário, com pequenas falhas preenchidas com calcita..



B - Estratificações cruzadas em dolomitos.



C - Concreções silicosas contorcidas em dolomitos.



D - Concreções silicosas ao longo dos planos de estratificação.

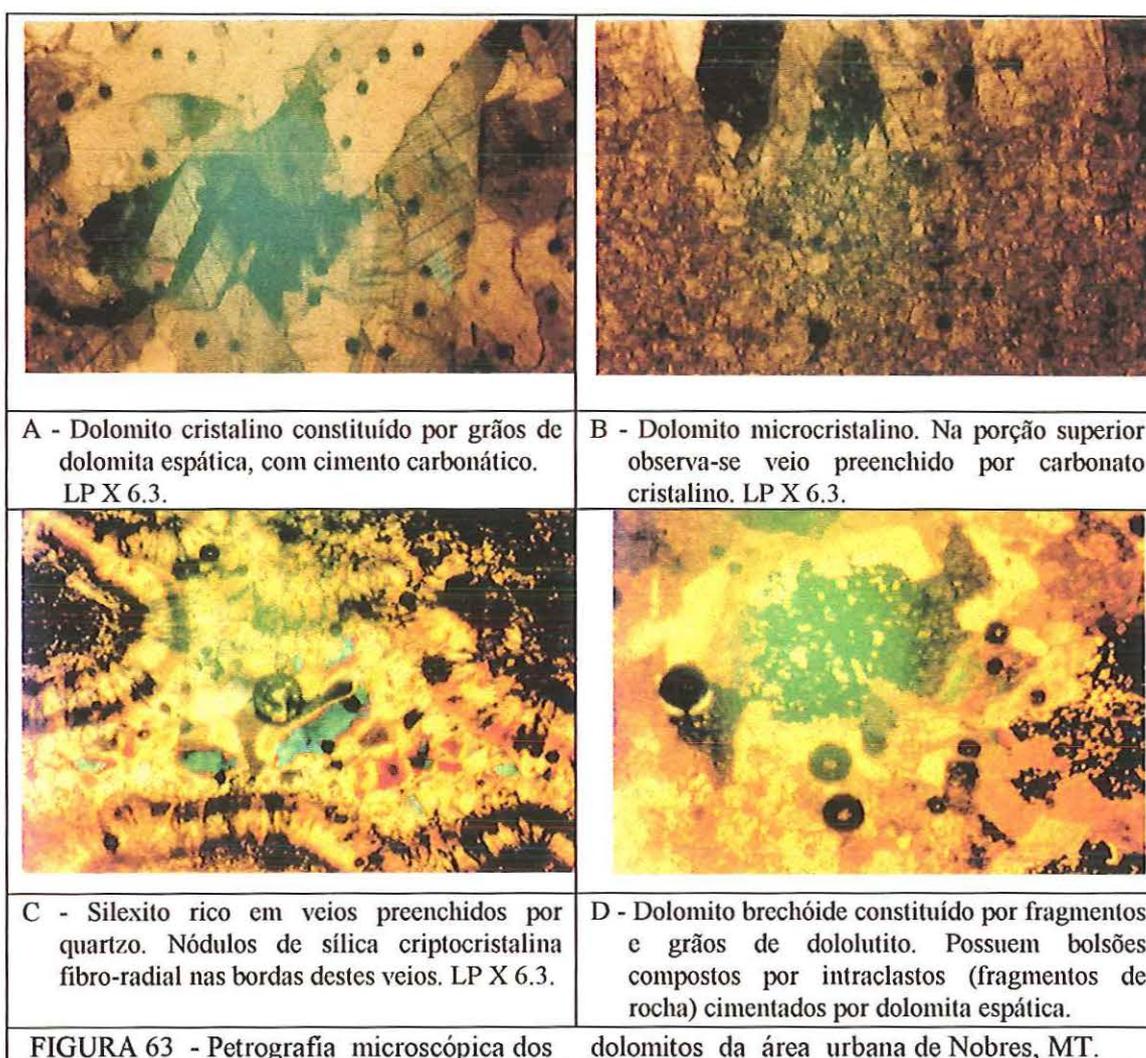


E - Estilólitos paralelos a estratificação.

**FIGURA 62 – Estruturas sedimentares das rochas carbonáticas.**

Nos dolomitos com natureza silicosa e silexitos, formam-se junto aos veios de quartzo, nódulos de sílica criptocristalina fibro-radial, Figura 63B.

As estruturas maciças dos dolomitos microcristalinos, por vezes, estão recortadas por veios contorcidos de natureza silicosa e carbonática, Figura 63C. Estes carbonatos podem estar recristalizados em vênulas sob a forma de calcita espática, preenchendo poros e fraturas, ou ainda, apresentar fragmentos de rocha imersos em matriz calcítica, Figura 63D.



A maioria das lâminas revelaram estratificações plano-paralelas, pelo efeito do tamanho da amostra coletada, embora são comuns as estratificações cruzadas de grande porte (dezenas de metros).

Microscopicamente, a composição mineralógica do Membro Superior da Formação Araras representada por dolomita e calcita, e tem como minerais acessórios com maior frequência, o quartzo, plagioclásio, microclina e, mais raramente, o zircão, muscovita, biotita, óxidos de ferro, turmalina e rutilo. Os grãos de quartzo dispersos na matriz carbonática, são geralmente equigranulares e possuem extinção normal. Os grãos de feldspatos e zircão apresentam-se arredondados, enquanto que a biotita e muscovita sob a forma de lâminas.

A composição química destas rochas, fornecida pelas empresas de mineração do local, permitem classificá-las, segundo PETTIJOHN (1957), como calcários dolomíticos, tendo as seguintes características químicas:

CaO	48%
MgO	5%
Resíduos Insolúveis	5%
Perda ao Fogo	42%
R <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1-2%

Assim, quanto a classificação de FOLK (1957), estas rochas dolomíticas pertencem a classe dos calcários ortoquímicos, com pouco ou nenhum material aloquímico.

#### *PETROGÊNESE - ambiente de origem*

A espessa sequência de rochas dolomíticas que constituem a deposição superior da Formação Araras, provavelmente depositou-se em ambiente nerítico de águas rasas e calmas, onde o pequeno suprimento de materiais terrígenos, é possivelmente consequência da: pediplenização do terreno emerso contiguamente à bacia; à sua pequena taxa de subsidência; e de sua grande estabilidade tectônica contemporânea a sedimentação, LUZ et al (1978).

A gradação de margas conglomeráticas para margas finamente laminadas, e para calcários margosos e calcíferos, na base desta Formação (Membro Inferior) atesta o enriquecimento em cimento carbonático, da base para o topo, corroborando com a idéia de deposição em borda de bacia para mares cada vez mais profundos com tendência à estabilização do substrato da bacia, LUZ et al (1978).

As rochas carbonáticas mostram marcas evidentes de ambiente regressivo, pois em direção ao topo desta sequência, aparecem os dolomitos intraclastos, localmente oncolíticos. Segundo informação verbal do Prof. Gerson Souza Saes/Dpto Recursos Minerais/UFMT, isto

seria o resultado do aprisionamento da lama carbonática por organismos, que indicam ausência de agitação.

Por sua vez, as ocorrências restritas de rochas clásticas constituídas de intercalações subordinadas de siltitos, arenitos, argilitos calcíferos e lentes de arenitos ortoquartzíticos, e as vezes feldspáticos, caracterizam as variações no ambiente de sedimentação, de forma gradual, onde a precipitação química foi sendo substituída por uma deposição clástica de ambiente marinho costeiro, também de natureza regressiva.

As estruturas secundárias mais marcantes estão representadas em todo pacote rochoso pelas concreções silicosas e carbonatadas de formas ovulares e tamanhos milimétricos a centimétricos. Estas estruturas, segundo PETTIJOHN (1957), por apresentarem componentes minerais semelhantes ao cimento da própria rocha, evidenciam a antiga permeabilidade da rocha hospedeira.

Quanto aos níveis de silicificação observados na zona de contato com a Formação Raizama, provavelmente devem-se a substituição da dolomita e calcita pela sílica, que encontrava-se em solução nas águas descendentes.

#### **9.6.2.2 FORMAÇÃO RAIZAMA**

Os arenitos da Formação Raizama estão restritos a porção nordeste da área mapeada, mais precisamente ao longo do fechamento do eixo da Sinclinal de Nobres.

Quanto as rochas esta Formação está representada por arenitos quartzosos e arenitos feldspáticos, brancos amarelados, avermelhados, bastante porosos, friáveis e com granulação média (fração areia).

Na base desta sequência pode-se identificar arenitos ortquartzíticos com intercalações de arenitos feldspáticos. No topo ocorrem os arenitos feldspáticos e coloração amarela a avermelhada, porosos, com fragmentos de rochas pelíticas. As intercalações entre estes tipos de rochas propiciam um relevo de encosta com formas escalonadas, tendo em vista a erosão diferencial, principalmente no Sinclinal de Nobres.

Os tipos de estruturas comuns à estas rochas são as estratificações cruzadas e plano-paralelas, Figuras 64 e 65, respectivamente. Por toda a extensão do pacote rochoso observam-se fraturas e juntas de dimensões métricas.

Ainda, no topo do Sinclinal, ocorrem geodos provavelmente relacionados ao falhamento direcional que corta esta Sinclinal.

### **PETROGRAFIA**

As seções delgadas analisadas para as rochas da Formação Raizama para a área mapeada, permitiram classificar quatro tipos litológicos: quartzo-arenito; arenito feldspático subarcócio e arenito dolomítico.



FIGURA 64 - Fotografia da estratificação, tipo tabular, com dimensões métricas.



FIGURA 65 - Fotografia da estratificação plano-paralela no topo da Formação Raizama, localmente situada sobre o eixo da Sinclinal de Nobres.

O arenito dolomítico situado na base desta Formação, possui clastos cimentados por carbonatos, evidenciando um contato transicional.

A textura clástica orientada, apresenta fração silte a areia muito grossa, sendo que as formas predominantes dos grãos variam de subarredondados a subangulosos. Mineralógicamente, os clastos predominantes são constituídos por quartzo e, subordinadamente por: microclínio, plagioclásio, epidoto, fragmentos de arenitos e minerais opacos.

O quartzo exibe extinção ondulante, é incolor e possui baixo relevo ao microscópio. Os grãos são anedrais levemente fraturados e de sinal óptico uniaxial positivo

### **PETROGÊNESE**

Os dados litoestratigráficos observados em campo associados a análise de seções delgadas, juntamente às informações de trabalhos geológicos realizados por outros autores, permitem dizer que seu contato inferior é transicional com intercalações de arenitos, camadas de silexitos e dolomitos, indicando o início de uma fase regressiva dentro de um ambiente marinho.

### 9.6.3 MATERIAIS INCONSOLIDADOS

Os materiais inconsolidados que recobrem o perímetro urbano da cidade de Nobres, podem ser classificados em quatro grupos, quanto a sua origem, a saber:

Sedimentos areno-siltosos, sedimentos aluvionares; *terra rossa* e sedimentos de depósitos de tálus.

Na área do vale cárstico, **Anexo III**, predominam os sedimentos areno-siltosos de cores cinza amareladas, e com espessuras, observadas nas cacimbas, entre 8 a 20 metros. Os sedimentos aluvionares, também fazem parte desta unidade de relevo, e são constituídos por materiais arenosos, cascalhos, e depósitos de argila, utilizados para a fabricação rudimentar de tijolos.

As outras classes estão associadas ao relevo de morros cársticos, **Anexo III**, sendo que a *terra rossa* (material argiloso residual dos carbonatos), apresenta cores bastante avermelhadas, e com espessura que raramente ultrapassam a 2 metros, e são encontrados nos topos das elevações topográficas carbonáticas. Enquanto que os sedimentos relacionados aos depósitos de tálus, ocorrem ao longo das encostas, e são constituídos por materiais que variam desde a fração silte argilosa a matações, a espessura varia entre 1 a 2 metros.

### 9.6.4 SUBSTRATO ROCHOSO - GEOLOGIA ESTRUTURAL

As rochas que ocorrem na área mapeada e que constituem a área urbana de Nobres, apresentam o mesmo comportamento estrutural, ou seja, falhas, eixos de dobras e acamamentos, da Faixa Paraguai.

Os efeitos compressivos da Fase  $D_1$  proporcionaram uma feição bastante marcante na área, localmente denominada de Sinclinal de Nobres, que forma um extenso dobramento linear (braquissinclinal), cujo eixo mostra suaves caimentos, em torno de  $4^\circ$  para NE e SW, expondo na área as rochas carbonatadas, **Anexo II**. A sinclinal de Nobres é uma dobra assimétrica, aberta, suave, com duplo caimento e com plano axial em torno de N60E.

A fase de deformação  $D_1$ , também está representada por um falhamento inverso de dimensões regionais, com cavalgamento para NW, e mergulhos em torno de  $55^\circ$ SE (Figura 60). Comumente, os falhamento de empurrão geram falhas secundárias, denominadas de falhas de rasgamento, Figura 64, que foram observadas na área, e exercem um papel importante na fenomenologia cárstica na cidade de Nobres, MT.

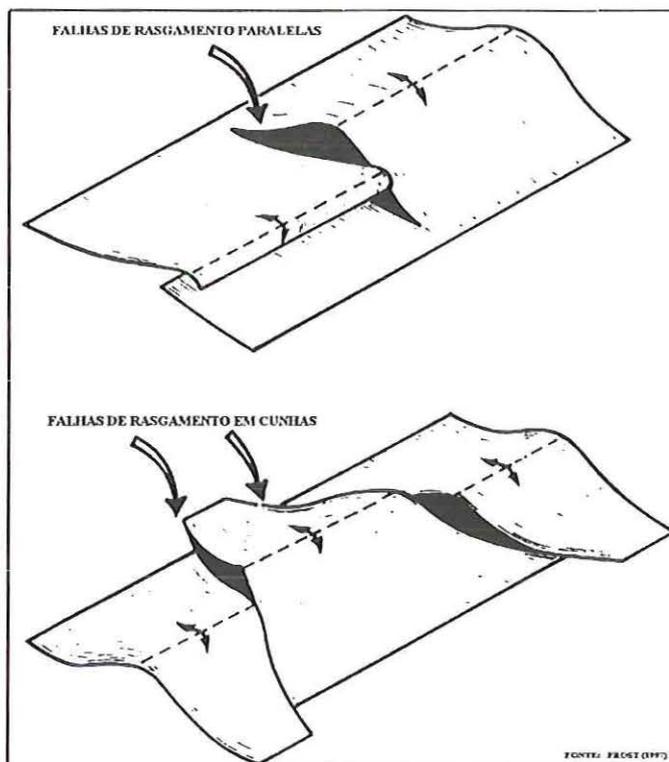


FIGURA 66 - Representação esquemática dos tipos de falhas de rasgamento.

As medidas estruturais obtidas sobre os acamamentos e fraturas estão representadas em diagramas na Figura 67.

O acamamento das rochas carbonáticas na área urbana, Figura 67 A, mostra que estas camadas sofreram influência do falhamento de empurrão, pois os mergulhos atingem até  $40^{\circ}$  em seu flanco SE.

Os fraturamentos gerados pela fase de deformação  $D_1$ , observados a nível de afloramento, tem direções preferenciais para NE, com mergulhos verticais a subverticais, Figura 67 B. Em alguns pontos, pode dar lugar a brechas tectônicas, como é o caso na porção Sul da área, mais precisamente no ponto 45, **Anexo II**, denotando movimentos direcionais.

Os efeitos da segunda fase de deformação  $D_2$ , relacionada a  $D_4$  por ALVARENGA (1986), também pode ser observada na porção SE da área, provavelmente relacionada aos dobramentos com grande comprimento de onda, suaves com certa simetria e com eixo disposto perpendicularmente aos eixos da fase  $D_1$ . O baixo mergulho das camadas carbonatadas, medidas nos afloramentos, confirmam esta asserção.

Ainda, em escala de afloramento, foi observado o principal traço da fase  $D_2$ , ou seja, forte fraturamento com orientações  $N50^{\circ}-70^{\circ}W$  e mergulhos  $70^{\circ}SW$  a verticais, Figura 68.

Estes traços, paralelos ao cabo do martelo na fotografia abaixo, também podem estar acompanhados de movimentos direcionais, gerado por falhamentos.

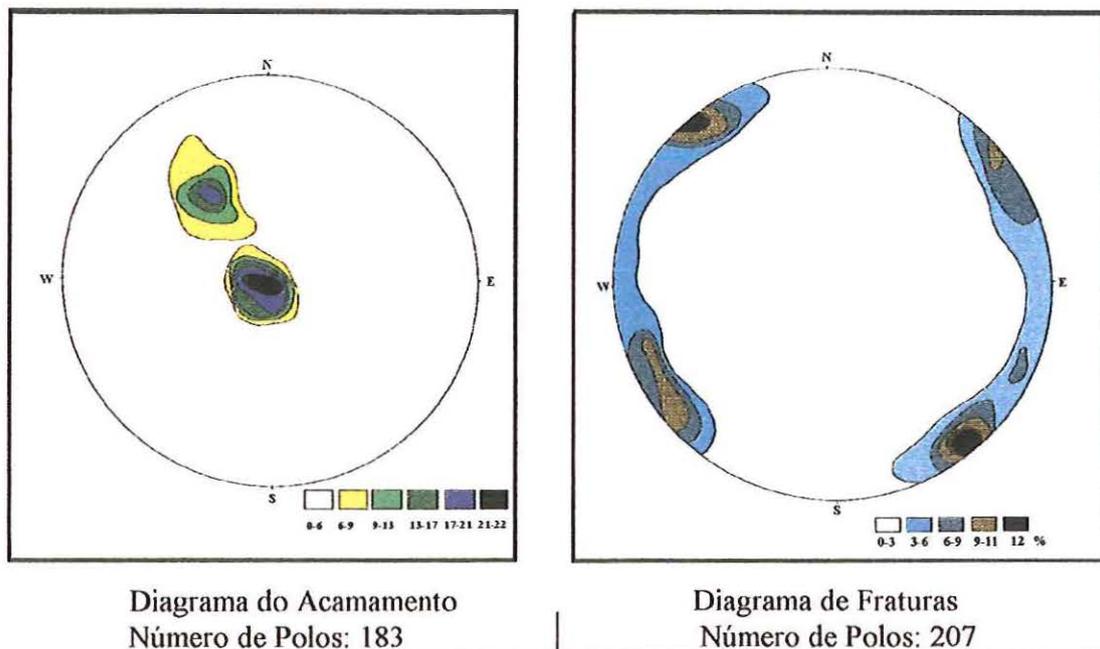


FIGURA 67 - Diagramas das estruturas de acamamento (A), e de juntas (B), obtidos no Diagrama de Schmidt & Lambert.

O duplo caimento do eixo do Sinclinal também relaciona-se aos esforços da fase  $D_2$ , que são ortogonais aos esforços da fase  $D_1$ .



FIGURA 68 - Fraturamentos relacionados a fase de deformação  $D_2$ .

### 9.6.5 GEOMORFOLOGIA CÁRSTICA

A cidade de Nobres situa-se sobre um vale cárstico, circundado a Oeste, por serras paralelas constituídas de rochas areníticas e argilosas; a Sul e a Norte por morros de rochas carbonáticas e, a Leste, por uma depressão topográfica regional composta por rochas metapelíticas.

A seguir, descrevem-se as unidades de relevo e as feições cársticas que são encontradas na área urbana. Estas características estão delimitadas no **Anexo III**.

Ressalta-se que a princípio, fez-se o uso de imagens de satélite Landsat TM-5, para delimitar as feições e formas de relevos cársticos da área, através do processamento digital do terreno, utilizando-se o software ENVI/IDL 2.6.

Entretanto, seus resultados não foram satisfatórios para alcançar tais objetivos, pois a resolução destas imagens não é compatível com as formas de dissolução encontradas na área, **Anexo IV**.

Desta forma, a utilização da técnica de processamento digital do terreno, através de imagens Landsat TM-5, não é recomendável para a avaliação de áreas urbanas sujeitas a problemas cársticos, para reconhecer feições cársticas. Restringindo-se apenas a estudos regionais em áreas sem informações geológica-geotécnica, sob o ponto de vista do relevo, litologias, traços estruturais, e uso e ocupação do solo.

#### *FORMAS DE RELEVO*

O relevo cárstico é subdividido em duas subunidades: (1) o vale cárstico, e (2) os morros cársticos, **Anexo III**.

O *vale cárstico*, é onde atualmente se estabelece o traçado viário urbano e as instalações prediais, apresentando as seguintes características:

- a altitude é 200 metros, a declividade é baixa (menor que 10%), com caimentos convergindo para o Ribeirão Nobres, que corta a cidade no sentido E→W, em sua porção central;
- a superfície deste vale, constituído por materiais inconsolidados, apresenta uma cobertura vegetal tipo gramínea que, gradativamente, passa à cerrado, quando se aproxima aos limites da área dos morros cársticos.
- os afloramentos de rocha carbonática ocorrem em pontos isolados, e são restritos aos morros testemunhos (torres cársticas);

- os vales aluviais, inseridos nesta unidade, estão relacionados ao Ribeirão Nobres, Rio Serragem e ao Córrego Cocalzinho;
- presença de uma área úmida isolada, que corresponde a uma várzea, sem curso de água;
- também é no vale cárstico é onde ocorre a maior incidência de colapsos.

Os *morros cársticos*, com altitudes médias entre 250-300 metros, são constituídos predominantemente por rochas dolomíticas. As principais características da fenomenologia cárstica, encontradas nesta unidade de relevo são:

- presença de vales secos e cegos;
- zonas de dissolução preferencias, segundo comportamento da geologia estrutural, demonstradas no **Anexo III** pelas de reentrâncias na região dos morros;
- blocos de rocha rolados sobre a superfície do terreno;

### *FEIÇÕES CÁRSTICAS*

A área não apresenta abundantes feições de dissolução, tais como os vários tipos de lapiás, anteriormente descritos. Este fato, provavelmente está relacionado aos altos índices pluviométricos na região, pois a ação destas águas pluviais, provocaria uma intensa corrosão sobre a superfície rochosa, não permitindo a permanência dos lapiás.

Ainda assim, foi possível discriminar algumas feições do exocarste e do endocarste.

As feições associadas ao carste descoberto, são observadas na unidade dos morros cársticos, quais sejam: blocos rolados ou suspensos, e lapiás de descontinuidades.

As feições do endocarste, Figura 69, 70 e 71, foram observadas ao longo do perfil dos taludes das pedreiras e estradas, bem como nas ocorrências dos colapsos do terreno. As feições reconhecidas foram: cunhas de solo; lapiás de plano de fraturas; e lapiás colunares.



FIGURA 69 - Lapiás em formação: de descontinuidade ao longo dos planos de fraturas verticais, e de acamamento, ao dos planos de estratificação.

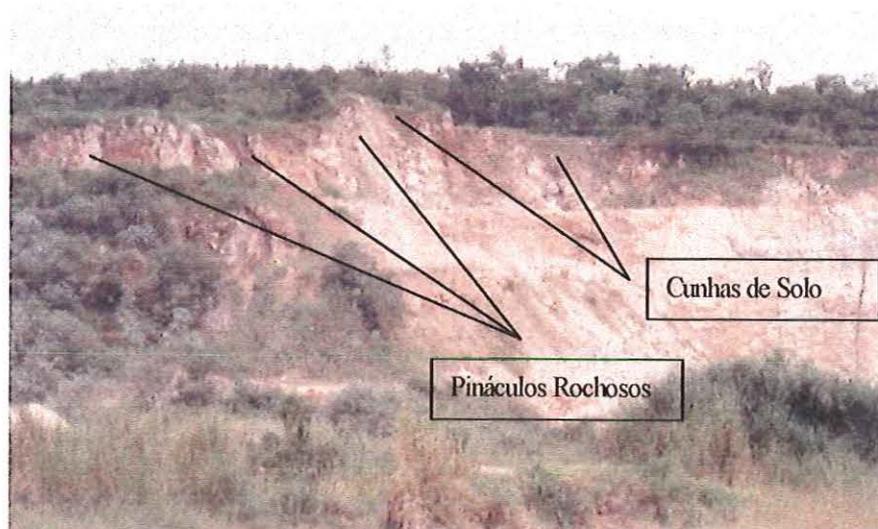


FIGURA 70 – Feições do tipo cunhas de solo com *Terra Rossa*. Esta figura também ilustra o comportamento do topo rochoso



FIGURA 71 - Lapiás colunares expostos em taludes de encostas pelos processos erosivos.

Considerando-se as feições, formas de relevo, as cavernas existentes e suas dimensões, a área constitui-se num terreno com estágio de carstificação bastante evoluído, provavelmente, constituindo-se de um poljé em formação.

As razões pelas quais não se denomina a área como um poljé típico, deve-se a: (1) ausência de dolinas aluviais; (2) os paredões rochosos circundarem parcialmente as bordas do vale cárstico; (3) inexistência de depósitos lacustres ou lagos cársticos (cenotes); (4) ausência de registros de inundação da área.

Entretanto, corroboram para a denominação de um poljé em formação, as seguintes observações: (1) presença do vale cárstico com morros isolados; (2) *terra rossa*; (3) drenagens com planícies aluvionares; (4) presença de uma área úmida isolada, que ainda não se configura como lago cárstico; (5) controle geológico estrutural.

## 9.7 PROBLEMAS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS

Os problemas geológico-geotécnicos na área são semelhantes àqueles que ocorrem em outros terrenos cársticos brasileiros ou mundiais, ou seja: presença de colapsos e subsidências do terreno devido a carstificação de rochas carbonáticas. A principal diferença entre os exemplos citados, e os problemas ocorridos em Nobres, é que neste último caso os desastres não acarretaram sérios prejuízos sócio-econômicos à população atingida.

Entretanto, em se tratando deste tipo de terreno, não deve-se descartar a possibilidade de outras ocorrências, seja pela contínua evolução do fenômeno, ou por influência direta do tipo de uso e ocupação do solo.

Dentro do perímetro urbano, os problemas encontrados localizam-se no Jardim Paraná, Bairro COHAB e na saída Sul, que dá acesso a BR 163/364, sentido Rosário Oeste.

É fundamental salientar que neste bairro está se desenvolvendo o atual e principal vetor ocupacional, através da construção das instalações onde se estabelecerão a Prefeitura Municipal, a Estação Rodoviária e o Fórum. Estas obras, conseqüentemente, trarão outras com padrões mais exigentes. Pois tendem a acompanhar este desenvolvimento, que por sua vez, deverão exigir maior capacidade de suporte do solo, podendo provocar a reincidência destes fenômenos por causas antrópicas.

Os colapsos ocorreram, simultaneamente, durante a noite do dia 02 de dezembro de 1992, portanto, no período climático chuvoso.

E, como haviam cavidades vazias em subsuperfície, os solos imediatamente sobrepostos foram carreados para o interior destes espaços vazios, que teriam sido preenchidos parcial ou totalmente. Sendo a causa da perda da resistência dos solos, o aumento do peso próprio, provocado pela saturação em água, bem como pela conseqüente, e contínua, migração das águas durante o processo de chuva.

Estes abatimentos observados na superfície do terreno, por critério direto de observação, apresentam em média 5 metros de diâmetro, variando entre 1,5 a 2 metros de profundidade. São cavidades que, quando expostas na superfície, apresentaram-se sob três diferentes classes quanto a forma de ocorrência, a saber:

*Classe 1-* os taludes e fundo da cavidade são constituídos somente por materiais inconsolidados, Figura 72.

*Classe 2-* ramificações laterais de cavidades, com ocorrência de lapiás colunares ao longo dos taludes, Figura 73.

*Classe 3-* cavidades com ocorrências de blocos rochosos angulares ao longo do talude, e no fundo, exposição de outros espaços vazios menores, Figuras 74 e 75.

As formas relacionadas a classe 1, provavelmente estão relacionadas a pequenas cavidades subterrâneas, localizadas no interface do substrato rochoso com o manto de materiais de alteração, que pela migração do solo preencheram totalmente os espaços vazios. Isto justifica-se pela ausência de blocos de rochas no interior da cavidade, e pela não evolução lateral e/ou vertical.

Aquelas associadas a classe 2, são semelhantes as anteriores, mas diferem pelo fato de ainda não terem sido totalmente preenchidas, por materiais inconsolidados. Estas feições permitiram visualizar localmente a presença de pináculos rochosos.

A classe 3, apresenta blocos de rochas imersos nos taludes das cavidades, e, ao fundo, lapiás colunares e trincas nos solos, que servem como condutos, evidenciando a existência de outros espaços vazios, a maiores profundidades.



FIGURA 72 - Colapsos tipo Classe 1



FIGURA 73 – Colapsos tipo classe 2



FIGURA 74 - Colapsos tipo classe 3



FIGURA 75 - Colapsos tipo classe 3.

A consequência destes colapsos às obras de engenharia foram: (1) trincas nas edificações, Figuras 76 e 77; (2) trincas e recalques cavidades ao longo da Br 163/364, Figura 78. Além deste fenômeno deflagrar-se repentinamente, há evidências que foram seguidos por subsidência, como pode ser observado na Figura 77, pois, após a recuperação da parede de alvenaria, apareceram novas trincas.



FIGURA 76- Exemplos de trincas nas edificações afetadas por colapso.

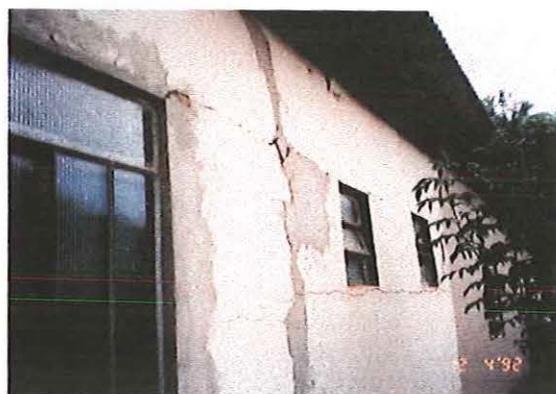


FIGURA 77 - Aparecimento de trincas após a ocorrência de colapsos, confirmando o processo de subsidência.



FIGURA 78 - Fendas provocadas por colapso - leito da BR 163/364.

Desta forma, presume-se que a provável causa destas ocorrências está relacionada ao episódio de chuva ocorrido no período diurno do dia, que segundo a população, foi torrencial.

Embora possa haver a influência antrópica, mas para confirmar essa hipótese, é necessário avaliar outras condições do terreno, que possibilitem responder as seguintes questões:

1 - Qual a relação dos quatro poços tubulares profundos, no equilíbrio hidrodinâmico das águas subterrâneas?

- Esta questão é pertinente porque embora as vazões destes poços sejam baixas, em torno de 10 m<sup>3</sup>/hora, poderá ser significativa para o aquífero local, principalmente se o regime

de funcionamento for simultâneo. Esta ação, poderá provocar uma sobretiragem, com conseqüente rebaixamento do nível de água, e rompimento dos tetos de possíveis cavidades subterrâneas. Ainda que o abastecimento de água para a população é extraída do Rio Nobres. Outros dados referentes aos poços na área não foram possíveis de serem adquiridos, tendo em vista que normalmente as empresas de perfuração não mantêm um cadastro dos poços que executam.

2 - Qual a conseqüência dos constantes usos de explosivos na abertura de frente de lavras?

- Isto deve ser questionado porque a maioria das minerações encontram-se nos limites urbanos (em torno de 500 metros da área dos colapsos), além de que, a exploração dos dolomitos e calcários, vem sendo realizada desde a década de 70. Portanto, espera-se que esta atividade esteja acelerando a fadiga dessas rochas, principalmente ao longo das zonas de fraquezas preexistentes (falhas e fraturas), facilitando a infiltração de águas e a dissolução dos carbonatos;

## 9.8 INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA NA ÁREA URBANA DE NOBRES, MT

Para a investigação do terreno cárstico da área urbana de Nobres, MT, utilizou-se o método gravimétrico, por ser uma técnica muito difundida, segundo a literatura estrangeira.

O levantamento gravimétrico consistiu de uma malha gravimétrica (perfis cruzados), representados no Anexo V, pelas linhas 1,2,3,4,5,6,7,8,e 9, onde a distância entre as estações foi de 10 metros, e, entre as linhas em torno de 100 metros. Sendo os principais objetivos estabelecer as relações do substrato rochoso com os colapsos e o eixo da Sinclinal de Nobres, através dos resultados da investigação microgravimétrica.

Através das linhas 1 e 2, paralelas entre si, (Anexo V), pretendeu-se obter informações sobre o eixo da sinclinal de Nobres, em uma área sem evidências de colapsos, e recoberta por espesso manto de materiais inconsolidados. Enquanto que as linhas 2 a 9, foram realizadas sobre a área de ocorrências de colapsos e subsidências.

### **RESULTADOS**

A representação dos resultados segue uma interpretação qualitativa, uma vez que esta técnica foi utilizada para avaliar sua eficiência, e não para solucionar os problemas da área.

Corroborar com esta decisão o fato de que na área inexistem levantamentos altimétricos de precisão, contando-se apenas com as folhas topográficas do IBGE, escala 1:100.000. embora durante o levantamento gravimétrico tenha sido executado uma malha altimétrica com 02 altímetros Pauling (um na base gravimétrica e outro itinerante), porém seus resultados de correção foram muito imprecisos, provavelmente relacionado a calibração daqueles altímetros.

#### Avaliação das Linhas 2 a 9

As linhas gravimétricas representadas por perfis gravimétricos nas Figuras 79, 80, 81, 82, 83, 84, e 85, mostraram várias anomalias negativas, correspondendo a baixos gravimétricos. esta relação pode significar uma cavidade vazia, parcialmente ou totalmente preenchida com materiais inconsolidados, além destas hipótese, deve-se ainda considerar aquelas enumeradas na página 128 do capítulo VIII.

Associando-se os locais de colapsos com as anomalias do Mapa Bouguer, observa-se que eles ocorrem, em maior número, no intervalo de -71 a -73 milligals, embora também estejam presentes nas bordas das anomalias com intervalos entre -79 a -81 milligals.

As ocorrências relacionadas aos valores em torno de -70 milligals, estão associadas as cavidades próximas a superfície, ou seja, aquelas pertencentes a classe I, (descritas na página

170-171). Enquanto que aquelas que ocorrem nas áreas com anomalias em torno de -80 milligals, pertencem a classe 3, ou seja, confirmando grande ausência de massa ou materiais de menor densidade, a maiores profundidades, em relação as anomalias coincidentes com os colapsos ocorridos. Obviamente, para confirmar estas suposições é necessário uma interpretação gravimétrica quantitativa, além do uso de sondagens mecânicas.

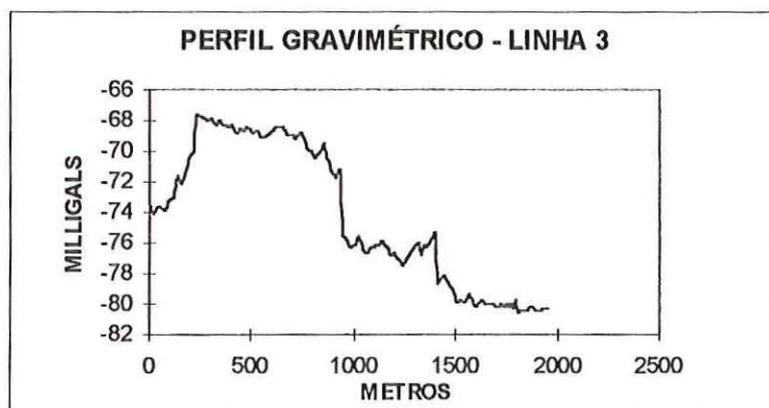


FIGURA 79 – Perfil gravimétrico: linha 3/ Avenida Getúlio Vargas.

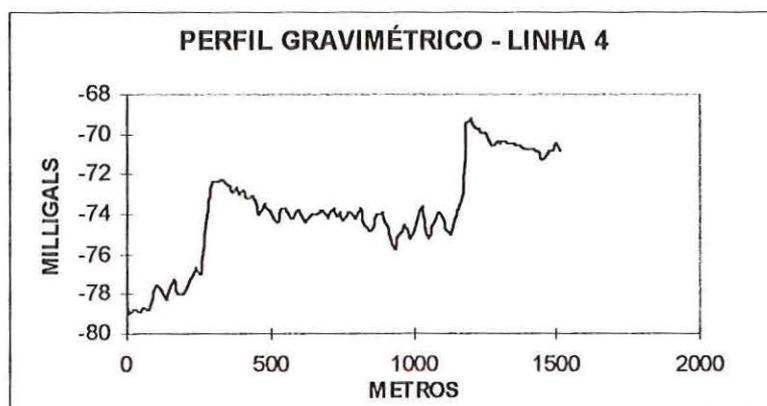


FIGURA 80 – Perfil gravimétrico: linha 4/ Rua Filinto Müller.

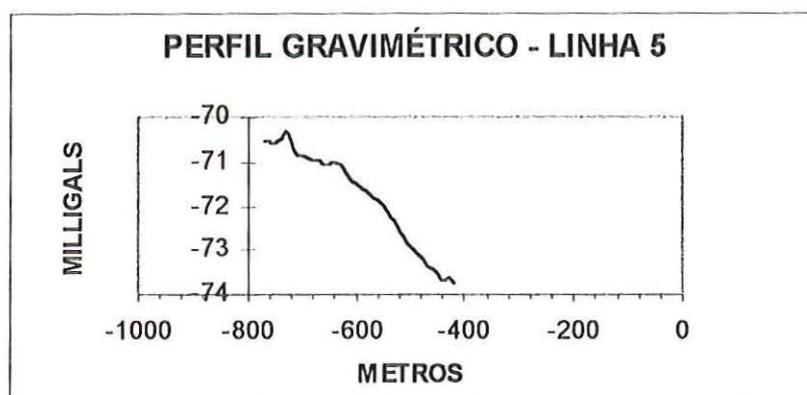


FIGURA 81 – Perfil gravimétrico: linha 5 / Rua G

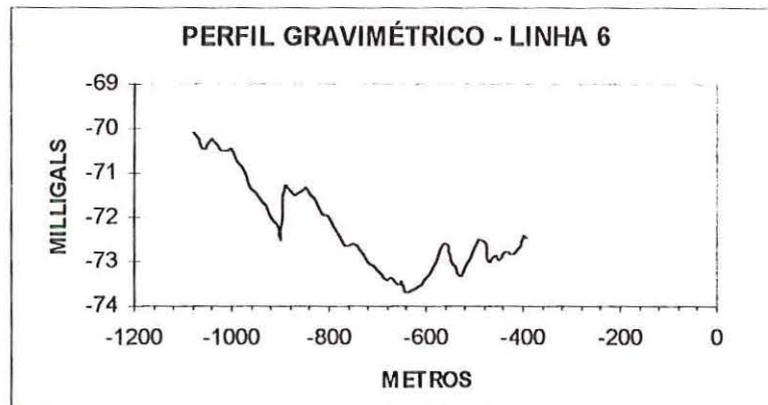


FIGURA 82 – Perfil gravimétrico: linha 6 / Rua E

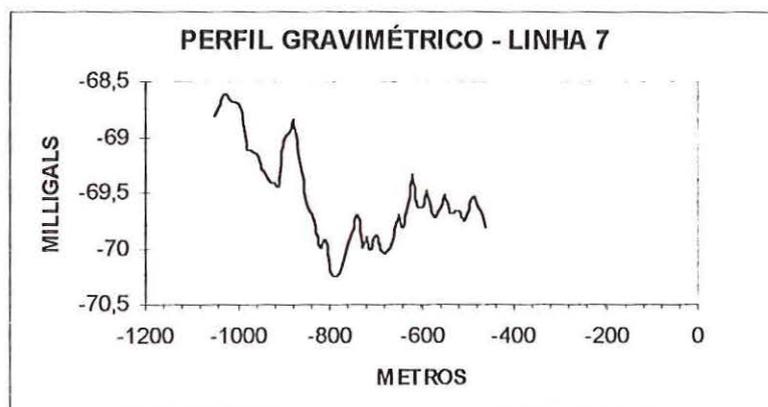


FIGURA 83 – Perfil gravimétrico: linha 7 / Rua C

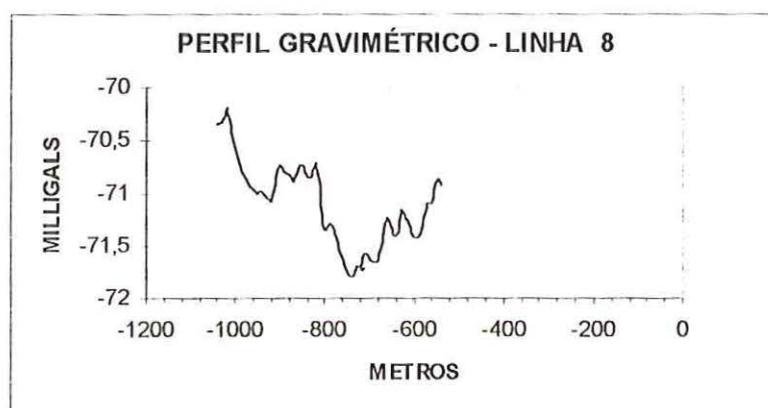


FIGURA 84 – Perfil gravimétrico: linha 8 / Rua A

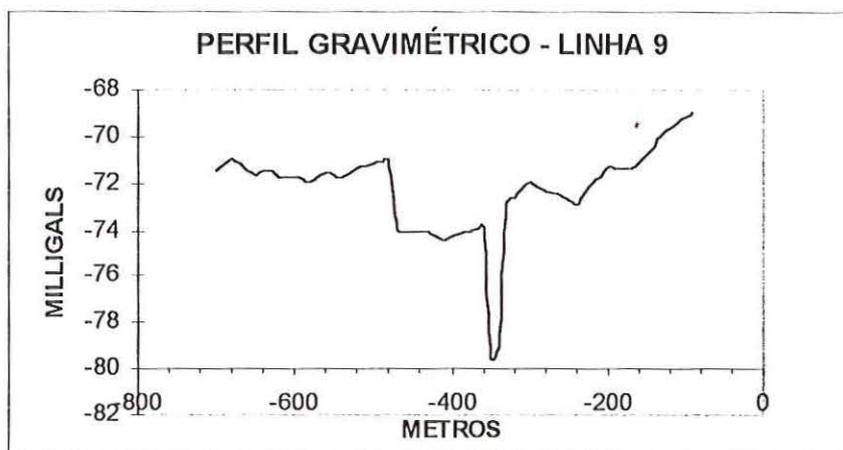


FIGURA 85 – Perfil gravimétrico: linha 9 / Rua Avenida Mário Nassarden

#### Avaliação das Linhas 1 e 2

O objetivo para a realização das linhas 1 e 2, com direção NW/SE, foi para detectar o comportamento do substrato rochoso, sobre o eixo da Sinclinal de Nobres, que teoricamente cruza a área urbana com direção perpendicular, ou seja, NE/SW.

Conforme mostram os perfis gravimétricos, Figura 86 e 87, não ocorre nenhuma anomalia negativa relacionada ao eixo da dobra, portanto, este não cruza a área urbana, pelo menos naquela seção. Esta afirmação está fundamentada no fato de que, em se tratando de terrenos cársticos, é nesta porção da estrutura que ocorrem as maiores feições de dissolução do endocarste.

Se por um lado foi possível verificar que o eixo da sinclinal não cruza aquela seção, por outro, estes perfis resultaram em uma anomalia entre estas linhas, o que provavelmente deve referir-se à uma falha de rasgamento, paralela a direção dos perfis executados. Entretanto, para confirmar esta hipótese necessitar-se-ia executar outras linhas gravimétricas, transversais e outras paralelas.

Esta situação sugere que num levantamento gravimétrico, não é recomendável a execução de linhas paralelas, a não ser que a distância entre estações e linhas sejam iguais, configurando uma rede, onde todos os pontos de leitura estivessem a distâncias iguais entre si.

Além disto, deve-se considerar que uma campanha geofísica sempre terá melhores resultados quando associados com outros métodos geofísicos, ou seja, escolhendo-se pelo menos duas ou três técnicas, que forneçam diferentes propriedades físicas dos materiais.

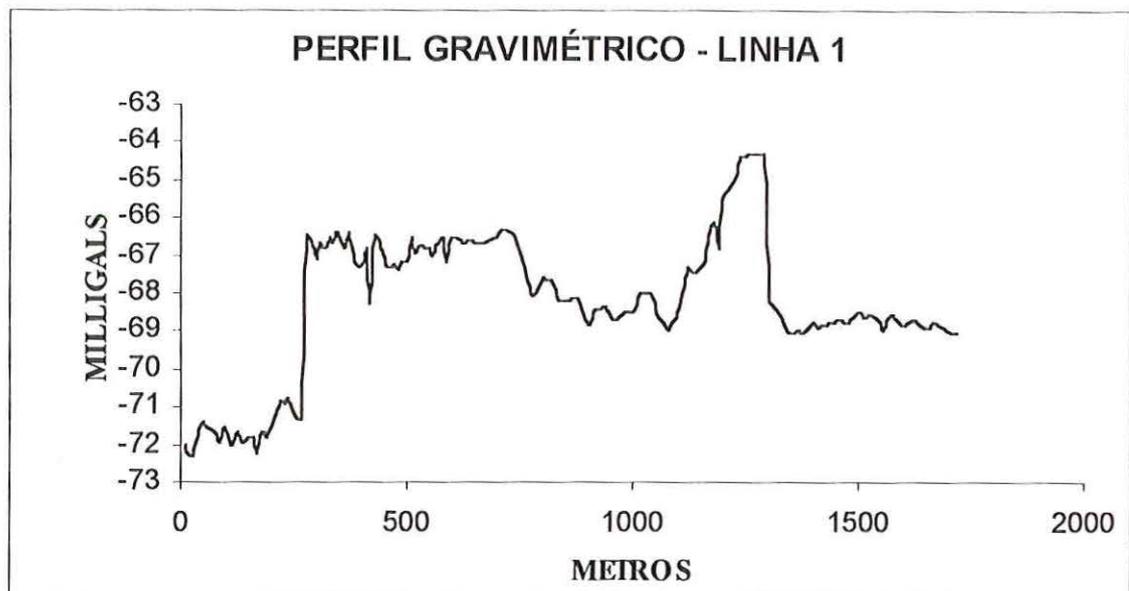


FIGURA 86 – Perfil Gravimétrico: linha 1 / Avenida Santos Dumont.

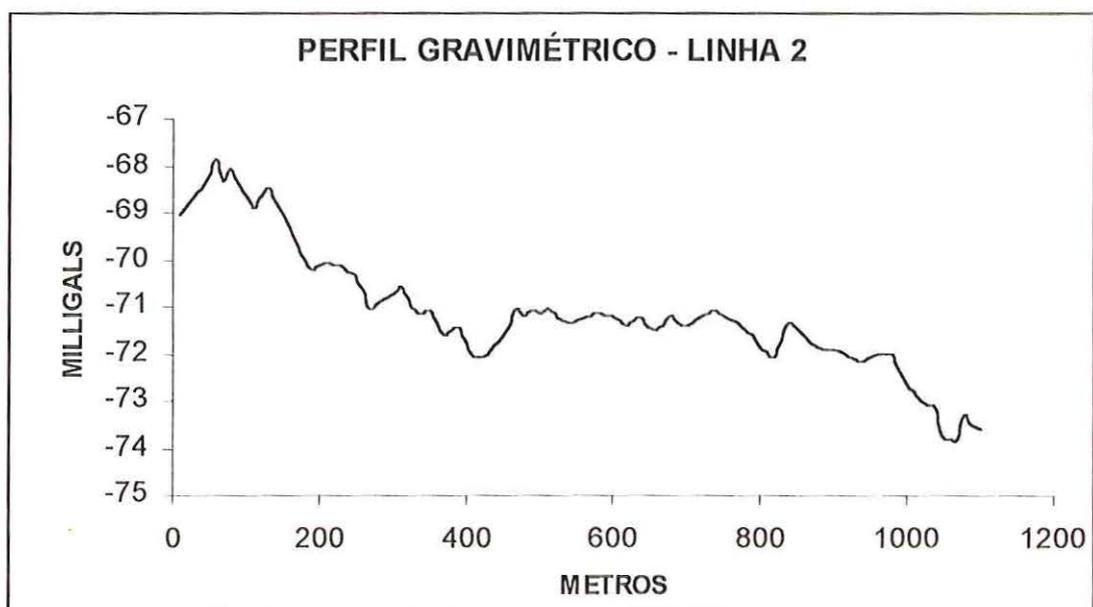


FIGURA 87 – Perfil gravimétrico: linha 2 / Rua Pará.

## 9.9 MODELO CÁRSTICO

O bloco diagrama apresentado na Figura 87, mostra esquematicamente as relações das litologias, relevos, estruturas geológicas e as ocorrências de colapsos na área urbana de Nobres.

Geomorfologicamente, o perímetro urbano está inserido num vale cárstico que se constitui num poljé em formação. Esta afirmação está baseada nas seguintes características:

- a área apresenta um carste bastante evoluído, evidenciado pelas grandes zonas de dissolução superficiais, representado pelas reentrâncias do vale nos morros cársticos – Anexo III, que constituem o próprio vale cárstico, portanto, o que está ocorrendo nesta área, é a reincidência dos processo de carstificação.

- presença de vales cegos nos morros cársticos, e nos seus limites com o vale cárstico, caracterizando áreas de drenagens absorventes pelo substrato rochoso subjacente;

- presença de *terra rossa*, resultante da alteração química residual dos carbonatos;

- existência de áreas úmidas permanentes dentro dos limites do vale cárstico, denotando locais de efluência de águas subsuperficiais, portanto, constituindo zonas preferenciais de fluxo;

- a ocorrência de colapsos, confirmando a presença de cavidades vazias e/ou parcialmente preenchidas por materiais inconsolidados;

- as anomalias gravimétricas além de coincidirem com os colapsos ocorridos, também mostraram outras áreas com deficiência de massa, caracterizando zonas de dissolução subterrânea;

- a ausência de dolinas em franco processo de subsidência;

- o controle estrutural das formas de dissolução, pois por definição um poljé é delimitado tectonicamente.

Ainda, a razão de denominar a área urbana como um poljé em formação, é porque os poços tubulares profundos – em média 80 metros de profundidade, não detectaram nenhuma cavidade subterrânea durante a perfuração. Assim, as cavidades provavelmente coexistem na porção superior do substrato rochoso, próximas a superfície, fato este que poderá ser confirmado com a execução de outras linhas gravimétricas, associadas a uma interpretação geofísica quantitativa.

Estruturalmente, a área apresenta fraturas e falhas que controlam as zonas de maior dissolução química.

As fraturas apresentam dois sistemas com direções preferenciais NW/SE e NE/SW, ortogonais entre si, e com planos verticalizados, enquanto que as falhas de rasgamento tem seus planos axiais perpendiculares e oblíquos ao falhamento de empurrão.

Tendo em vista o fluxo das águas superficiais e subsuperficiais apresentarem um fluxo NW para SE, deduzido pela topografia, drenagens e comportamento lito-estrutural das rochas, as fraturas com direções NW/SE associadas aos planos de falhas de rasgamento, constituem as zonas mais vulneráveis a carstificação. Fato este corroborado pelos resultados da investigação geofísica, pois as zonas de deficiência de massa, na área dos colapsos apresenta direções NW/SE (Figura 88).

Assim, foi definida uma zona de alto potencial a ocorrência de eventos cársticos, **Anexo V**, considerando-se estes aspectos estruturais e geomorfológicos, bem como as formas e as intensidades da dissolução, e as condições hidrogeológicas.

#### **9.10 POTENCIALIDADE DE CARSTIFICAÇÃO DOS TERRENOS**

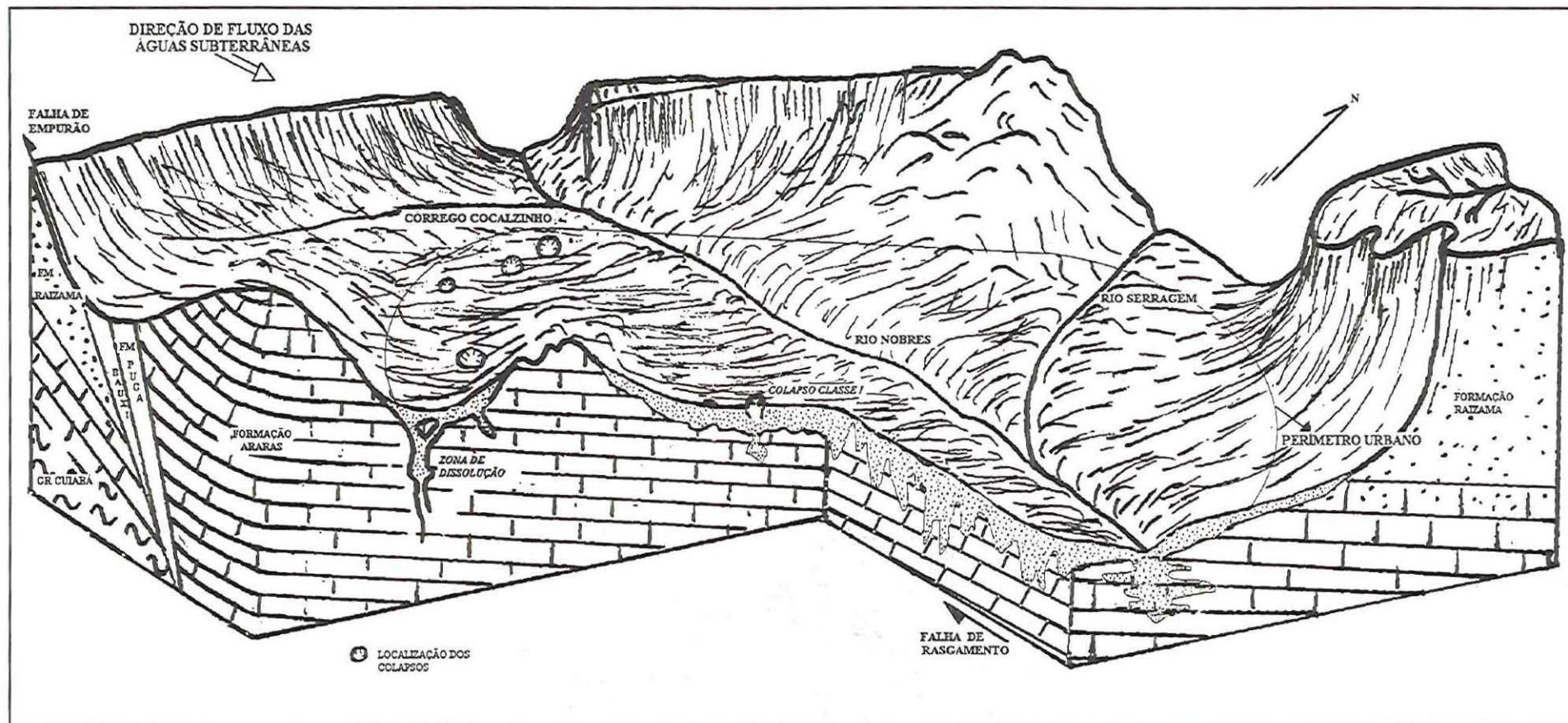
Baseando-se na bibliografia sobre o tema, elaborou-se uma tabela, Tabela 27, que contemplasse algumas características dos terrenos carstificáveis, para auxiliar novos trabalhos, na avaliação destas áreas frente a potencialidade de ocorrência de problemas cársticos, que conseqüentemente, possam afetar o uso e ocupação do solo.

Para tanto, considerou-se as seguintes características: tipos rochosos; designação da qualidade da rocha (RQD); contador volumétrico de juntas (JV); porosidade das rochas; mergulho das camadas; litologias não cársticas associadas; declividade do terreno; clima e vegetação.

Os tipos de rochas foram classificados segundo a porcentagem de minerais constituintes, ou seja, calcita, dolomita e minerais não carbonáticos, sendo que a razão de dissolução é diretamente proporcional ao conteúdo de calcita, uma vez que este mineral apresenta alta solubilidade em contato com a água de percolação.

Na análise do RQD e JV, também devem ser consideradas outras propriedades observadas nas paredes das juntas, tais como: rugosidade, preenchimento, alteração, abertura e percolação. Na inexistência de testemunhos de sondagens para avaliar o RQD, pode-se fazer uso da equação,  $RQD = 115 - 3.3JV$ , comumente usada na avaliação de maciços rochosos.

As demais características observáveis na Tabela 27 são auto-explicativas.



Autor: Kurt João Albrecht (1998)

FIGURA 88 – Modelo esquemático do Carste de Nobres, mostrando as formas de relevo, feições de dissolução e o arcabouço geológico.

TABELA 27 – Características dos terrenos quanto a potencialidade a carstificação, ALBRECHT (1998)

CARACTERÍSTICAS	POTENCIALIDADE		
	ALTA	MÉDIA	BAIXA a NULA
ROCHAS	Evaporitos		
	Calcário (NC < 10) (C > 95) (D < 10)	Dolomito (NC < 10) (C < 10) (D > 90)	Rochas com algum carbonato: Margas, Arenito calcítico, Arenito dolomítico
	Calcário impuro (NC 10-50) (C > 90) (D < 10)	Dolomito impuro (NC 10-50) (C < 10) (D > 90)	
	Calcário dolomítico (NC < 10) (C 50-90) (D 10-50)		
	Dolomito Calcítico (NC < 10) (C 10-50) (D 50-90)		
RQD - Designação da Qualidade da Rocha (%)	< 50	50 - 75	75 - 90
JV – Contador Volumétrico de Juntas (Juntas/m <sup>3</sup> )	> 30	1 - 30	< 1
POROSIDADE	> 50	25 - 50	< 25
LITOLOGIAS ASSOCIADAS	Quando as intercalações com outras rochas não cársticas apresentarem grandes espessuras (dezenas a centenas de metros)	As intercalações entre camadas impermeáveis não cársticas e cársticas, serem de apenas alguns metros	As intercalações não ultrapassam a alguns centímetros
MERGULHO DAS CAMADAS	A carstificação pode ser alta, média ou baixa tanto em camadas horizontais como verticalizadas		
DECLIVIDADE	Baixa (10 – 20 % ou < 11°)	Média (20 – 30 % ou 11° – 16°)	Alta (>30 % ou > 24°)
CLIMA	Tropical e Subtropical (Precipitação pluviométrica > 1000 mm e Temperatura > 16 °C)	Temperado (Precipitação > 800 mm; Temperatura 0 – 15 °C)	Árido (Precipitação < 500mm; Temperatura 11 – 20 °C)
VEGETAÇÃO	Florestas tropicais, ricos em nutrientes	Pastagens naturais e manchas de florestas	Gramíneas
EVIDÊNCIAS SUPERFICIAIS	Torres cársticas; Pináculos; Campo de Lapiás; <i>Terra Rossa</i> ; Sistemas de cavernas; colapsos; subsidência; erosão diferencial, etc.	Blocos suspensos; Torres cársticas; Sistemas de cavernas; Dolinas rasas; colapsos; erosão diferencial, etc.	-

NC -Minerais não carbonáticos; C - Calcita; D – Dolomita

Autor: Kurt João Albrecht

## **PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO DE TERRENOS CÁRSTICOS SUJEITOS A PROBLEMAS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS**

### **10.1 ETAPAS DE INVESTIGAÇÃO EM TERRENOS CÁRSTICOS**

Uma área carbonática esta sujeita a problemas geológico-geotécnicos, quando apresenta uma das características de reconhecimento dos problemas, citados nas páginas 80 e 81, do capítulo V.

Além daquelas, a presença de feições de dissolução observadas na superfície, ou em taludes naturais ou implantados, já evidenciam que aquelas rochas são carstificáveis, e portanto, sujeitas a problemas decorrentes dos processos cársticos.

Assim, estabeleceram-se dois fluxogramas com objetivo de auxiliar na metodologia dos trabalhos que venham ser realizados na avaliação de terrenos carstificáveis.

Um fluxograma diz respeito a estudos regionais, enquanto que o outro, a estudos em escalas de detalhe.

Os procedimentos sugeridos, foram baseadas na literatura existente sobre o assunto, e nas dificuldades encontradas durante a realização deste trabalho.

Os fluxogramas apresentados representam as etapas, em ordem seqüencial, que poderão melhor avaliar, prever e caracterizar os processos, e as conseqüências da carstificação, tanto no aspecto regional, quanto em escalas maiores, seja para áreas urbanas ou na solução de algum problema específico de origem geológico-geotécnico.

#### *ESTUDOS REGIONAIS*

Comumentemente, os padrões superficiais de um terreno cárstico são facilmente reconhecíveis, tais como os padrões de dolinas e dos vales de dissolução. A influência deste controle superficial é devido os aspectos geológicos regionais, que muitas vezes, podem

configurar os caminhos preferenciais das águas subsuperficiais e, conseqüentemente, as principais direções de dissolução, KASTENING (1989).

Desta forma, a Figura 89, sugere etapas para avaliação de áreas pouco estudadas, como no caso do Brasil, sob o ponto de vista geológico-geotécnico, para caracterizá-las em escalas entre 1:25.000 a 1:50.000. Mais especificamente, estes estudos devem retratar os graus de carstificação, isto é, delimitar as áreas que denotam a carstificação do terreno, por exemplo: zonas com maior potencial de ocorrência dos fenômenos cársticos; colapsos; subsidências; vulnerabilidade dos aquíferos frente a contaminação; feições e formas de relevo superficiais; cavernas; e outras feições do endocarste e exocarste.

No Brasil, estes estudos ainda podem ser justificados pelas seguintes razões:

- 1- O país não tem tradição em estudos geológico-geotécnicos em terrenos carstificáveis.
- 2- Por ser um país em desenvolvimento, acredita-se que este é o melhor momento para caracterizar regionalmente os terrenos carstificáveis, com a finalidade de subsidiar os órgãos públicos e privados, ao uso e ocupação do solo, quanto a:
  - criação de novos centros urbanos,;
  - expansão urbana;
  - implantação de obras lineares (rodovias, ferrovias, aeroportos, dutos, linhas de alta tensão);
  - implantação de barragens;
  - criação de parques industriais, turísticos;
  - proteção de áreas de recarga de aquíferos;
  - parcelamento do solo para fins agropastoris;
- 3- E, pelas ocorrências brasileiras, ou seja: o expressivo número de áreas de ocorrência e volume das reservas carbonáticas, pois em pelo menos 968 municípios, ocorrem uma ou mais tipos de rochas carstificáveis, além de que já existem mais de 2000 grutas cadastradas.

Assim sendo, através de uma integração destes estudos regionais, poderia elaborar-se um macrozoneamento nacional, conseqüentemente, formar-se-ia um banco de dados, que sem dúvida, irá fornecer um prévio conhecimento dos problemas decorrentes de áreas brasileiras passíveis de carstificação.

#### *ESTUDOS EM ÁREAS URBANAS E PROBLEMAS ESPECÍFICOS*

Os procedimentos sugeridos na Figura 90, objetivam orientar trabalhos com finalidade de determinar os problemas geológicos-geotécnicos, em terrenos cársticos urbanos, e para tratamento de problemas específicos frente à uma obra de engenharia.

Em se tratando de áreas urbanas ou específicas, os trabalhos correspondem a um detalhamento entre as escalas de 1:1.000 a 1:10.000.

As áreas específicas, são aquelas relacionadas a um parque industrial, áreas de mineração, grandes projetos de instalações públicas e/ou privadas, ou ainda, podem corresponder a uma determinada porção de um grande centro urbano.

## **10.2 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DE INVESTIGAÇÃO**

A seguir, faz-se uma descrição das etapas propostas, nas Figuras 89 e 90, a serem executadas durante a avaliação do terreno.

### **10.2.1 INFORMAÇÕES TÉCNICAS**

Esta tarefa, obrigatória em qualquer situação de investigação geológica-geotécnica, se resume na revisão da literatura existente sobre a área que deverá ser avaliada e, na criação de um banco de dados, representado por um Mapa de Documentação da área em estudo.

As informações abaixo relacionadas, desde que existentes, servirão para obter um conhecimento prévio da área, podendo até ocorrer casos, onde há alta densidade de dados, em que se permite avançar algumas etapas propostas nos fluxogramas.

Salienta-se que os dados obtidos durante a etapa de campo, ao final dos trabalhos, deverão ser incluídos ao banco de dados.

#### *Dados geológicos*

- *Petrografia*: variações petrográficas e porosidades dos carbonatos, tipos de cimento, matriz, grãos, etc, com descrição dos minerais constituintes, por exemplo, o teor de calcita, pois este mineral tem maior solubilidade que a dolomita e outros.

A idade das rochas, segundo JAKUCS (1977), também exerce influência sobre a carstificação dos carbonatos, pois baseado em centenas de amostras de várias idades conclui que os calcários de idade paleozóica apresentam maior número de fraturas abertas, em relação aos de idade mesozóica e terciária, respectivamente. Embora a permeabilidade tende a aumentar para rochas mais recentes.

Estas informações se prestam, para estabelecer uma relação entre os tipos litológicos, possibilidades de dissolução, grau de carstificação e suas possíveis relações com problemas de colapso e subsidência.

FIGURA 89 – FLUXOGRAMA PARA AVALIAÇÃO DE TERRENOS CÁRSTICOS EM ESCALA REGIONAL, ALBRECHT (1998)

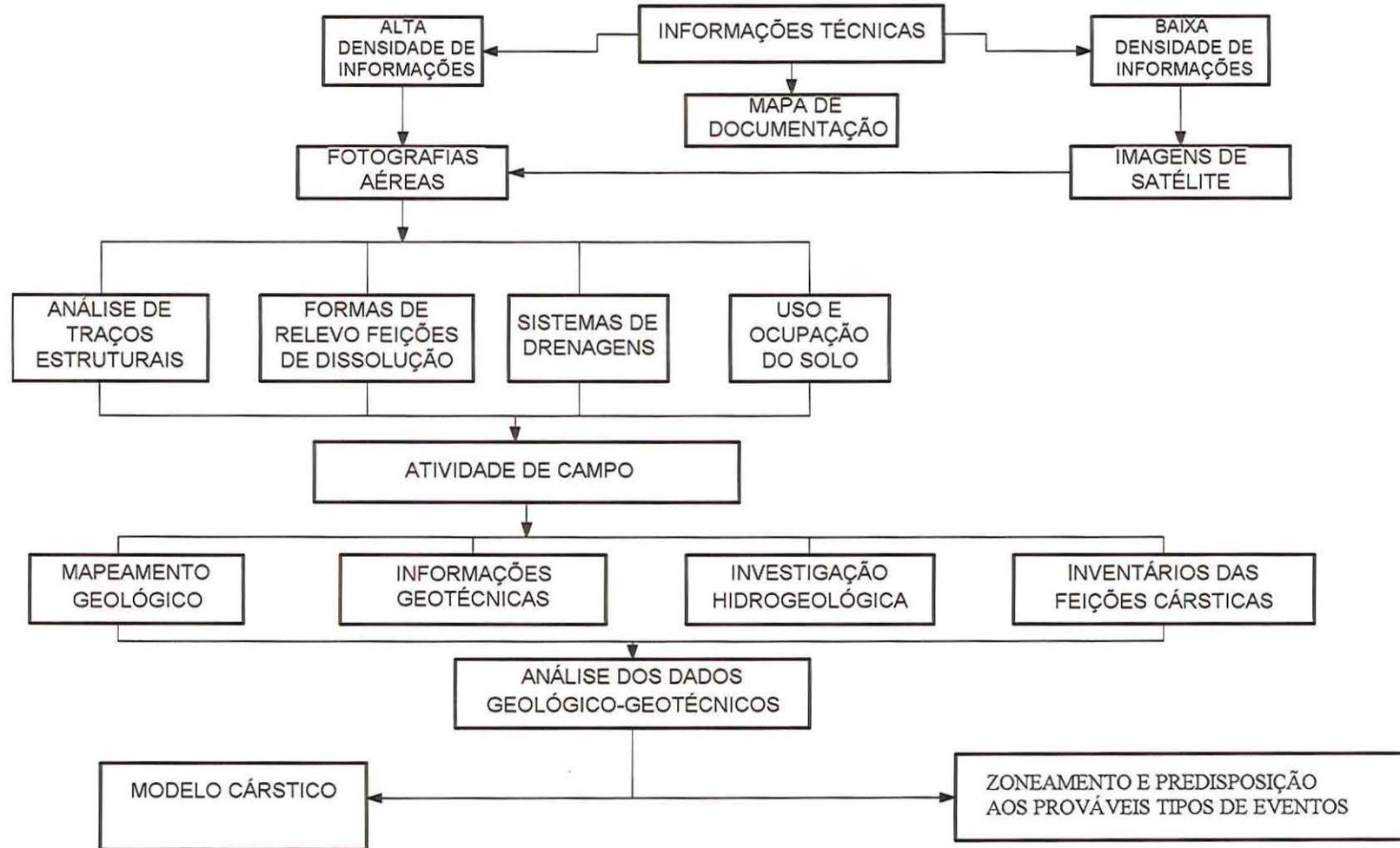
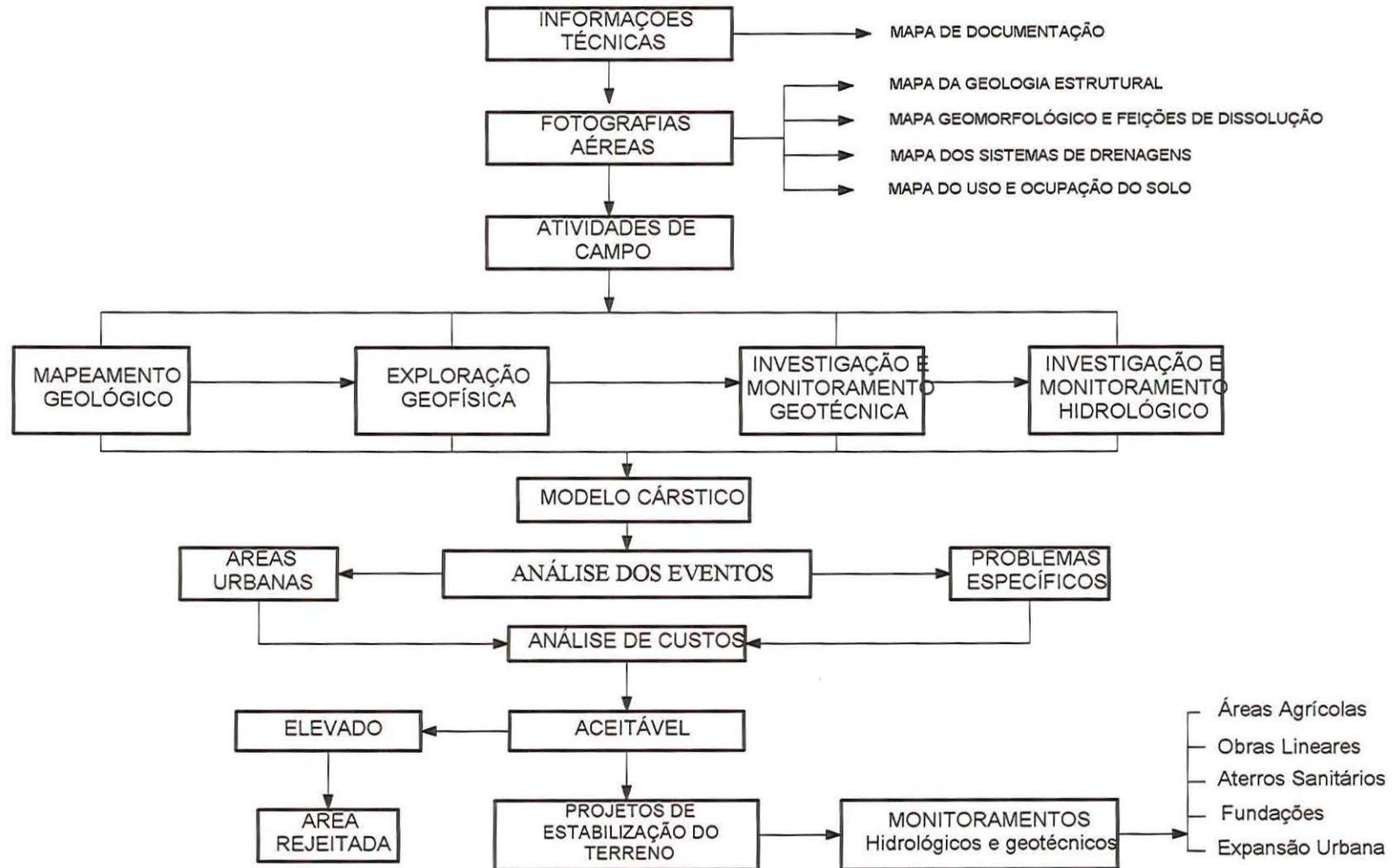


FIGURA 90 – FLUXOGRAMA PARA AVALIAÇÃO DE TERRENOS CÁRSTICOS EM ÁREAS URBANAS E PROBLEMAS ESPECÍFICOS, ALBRECHT (1998)



- *Estratigrafia*: os dados estratigráficos devem incluir a espessura do pacote rochoso, tipos de estruturas sedimentares, componentes físicos, idade geológica.

Estes dados permitirão uma relação entre os diferentes pacotes ou estratos carbonáticos, e seu ambiente de origem, pois cada qual tem suas próprias características estruturais e físicas, podendo-se avaliar qual a relação destes, com os caminhos preferenciais da dissolução. Além disso, as estruturas sedimentares devem ser bem caracterizadas para que não haja confusão entre estas, e as camadas dobradas tectonicamente.

Outras relações pertinentes são as intercalações entre rochas carstificáveis e não carstificáveis e, suas relações de espessura e mergulho. Pois, em pacotes espessos horizontalizados ou não, é comum a formação de vários tipos de dolinas, enquanto que em estratos finos horizontais, geralmente ocorrem pequenos colapsos devido ao rompimento do teto das cavidades, originadas pela dissolução das águas subterrâneas.

- *Geologia Estrutural*: as informações devem incluir os tipos de dobramentos, e seus elementos (flancos, eixos, etc), sistemas de juntas e falhas, material de preenchimento, continuidades, espaçamento, padrões de orientação (roseta de fraturas).

As informações estruturais devem ser consideradas como uma das mais importantes relações com a carstificação, influenciando diretamente no sucesso da pesquisa, pois a exemplo de vários casos mundiais, os maiores problemas decorrentes da dissolução, estão associados ao alargamento dos planos de juntas, cruzamento de traços estruturais, concentração de fluxos ao longo de eixos de sinclinais, concentração de cavidades ao longo de eixos de anticlinais, etc.

Quanto as relações existentes entre os materiais de preenchimento, estes poderão auxiliar na compreensão da evolução dos processos, ou seja, são minerais secundários oriundos da própria dissolução, ou de algum evento geológico posterior.

- *Geomorfologia*: incluem o levantamento dos mapas topográficos, formas de relevo e suas relações com a geologia estrutural, rede e densidade de drenagens, lagos, áreas alagáveis, localização de feições de dissolução, ou outras informações pertinentes ao assunto, tais como o paleogeografia. Esta, auxiliará na caracterização da evolução dos ciclos erosivos e climáticos, podendo estabelecer correlações entre as feições atuais de dissolução, com aquelas ocorridas em tempos geológicos pretéritos.

O padrão de drenagem superficial também é relevante, pois podem indicar o comportamento litoestratigráfico e/ou estrutural de uma determinada área.

Além disso, as feições e relevos cársticos, caracterizados anteriormente, são fundamentais para reconhecer o grau de carstificação.

- *Hidrologia*: Balanço hídrico, séries históricas do regime pluviométrico, níveis das águas subterrâneas, regime de bombeamento dos poços tubulares profundos e de suas características hidrodinâmicas, tipos de captação de água e para quais finalidades, fontes, nascentes, cacimbas, definição do regime efluente ou influente das drenagens (carste autigênico ou alogênico), análise da acidez das águas de chuva.

Estas informações são de fundamental importância, pois caracterizam o atual sistema de escoamento superficial e subsuperficial dos principais agentes que provocam a dissolução química das rochas carstificáveis, ou sejam, as águas pluviométricas e subterrâneas. Desta forma, o controle sobre estes dados influenciará diretamente na previsão dos potenciais de problemas na região em estudo.

#### *Dados Geotécnicos*

Estes dados, uma vez existentes, e obtidos em órgãos públicos e privados, e referem-se as propriedades geotécnicas dos solos e rochas, oriundas das sondagens realizadas na região, tais como: resultados de sondagens do tipo SPT; caracterização geotécnica dos materiais inconsolidados – para estabelecer relação entre sedimentos e *terra rossa*; furos de sondagens rotativas; tipos de fundação utilizadas na região cárstica; características geomecânicas das rochas carbonáticas, etc.

#### *Atividades Antrópicas*

Estes dados definem o histórico de ocupação da área de interesse, seja urbano, industrial ou agrícola, bem como a localização de aterros sanitários, lixões, áreas de irrigação, condutos subterrâneos, sistemas de coleta e descarga das águas superficiais, áreas com uso de explosivos, obras lineares, etc.

A obtenção das formas de ocupação também auxiliarão na definição do tipo dos problemas cársticos da área, ou seja: origem natural, geológica ou acelerada pela atividade antrópica.

## **10.2.2 ANÁLISE DOS SENSORES REMOTOS**

Os sensores remotos englobam desde imageamento por satélite, fotografias aéreas verticais e oblíquas, bem como sobrevôos com câmeras especiais, por exemplo, câmeras termográficas, utilizadas para detectar anomalias no comprimento de onda da faixa espectral do infravermelho termal.

A condição ideal para análise de fotografias aéreas convencionais e imagens de satélite, seria o uso de quatro conjuntos, a fim de estabelecer uma análise temporal, assim distribuídos:

- (a) Dois conjuntos de datas mais recentes possíveis e do mesmo período hidrológico, sendo um da época de estiagem, e outro, da época chuvosa.
- (b) Dois conjuntos mais antigos possíveis, uma ou duas décadas, também do mesmo período hidrológico, sendo um pertencendo a estação chuvosa, e outro, da estação seca.

A obtenção de diferentes conjuntos do mesmo ano hidrológico, permitirá uma avaliação das possíveis relações entre a superfície do terreno e o nível freático, através da observação de nascentes, áreas alagadas, umedecimento de porções do terreno ao longo de lineamentos estruturais. Esta análise permitirá a localização de áreas potenciais de infiltração ou de descarga das águas.

Quanto a obtenção de produtos com datas diferentes, servirão para observar a evolução e/ou o aparecimento de sumidouros, dolinas, ou outras feições de dissolução.

Entretanto, no Brasil, não encontra-se a disposição um número significativo de tomadas fotográficas, inviabilizando este procedimento.

### *Imagens de Satélite*

Todo o território brasileiro é imageado quinzenalmente, pelo sistema de imagens LANDSAT TM5, com resolução de 30 x 30 metros.

A utilização destes produtos é restrita na investigação de terrenos carstificáveis, principalmente quanto a identificação de feições de dissolução na superfície do terreno ou o mapeamento de dolinas. Isto ocorre porque as imagens LANDSAT TM5, apresentam baixa resolução espectral, não identificando feições de dissolução, tais como dolinas com diâmetros menores ou em torno de 30 metros.

Para superar esta deficiência, a alternativa seria a aquisição de imagens de outros tipos de sensores. Entretanto, estes produtos, na maioria dos casos, deverão ser adquiridos nos países de origem, elevando-se os custos e o tempo de recebimento destas imagens, principalmente quando a área de interesse ainda não está imageada, inviabilizando esta aquisição. em havendo disponibilidade financeira e acordo com o interesse do projeto poder-se-à adquirir imagens com melhores resoluções (vide tabela 26).

Desta forma, o uso de imagens de satélite em terrenos cársticos brasileiros, considerando-se as imagens Landsat, restringe-se a:

- Em áreas de interesse com grande extensão superficial de ocorrência de carbonatos, a sua utilização poderá auxiliar na obtenção de traços estruturais e discriminação espectral dos carbonatos, criando-se uma biblioteca espectral.
- Em regiões que as fotografias aéreas são muito antigas, e quando os centros urbanos não dispõem de mapas do traçado urbano atualizado, o uso de imagens de satélite poderá ser útil na definição do atual uso e ocupação do solo, e na delimitação dos atuais limites das áreas urbanas.

Em resumo, com o avanço da tecnologia do sensoriamento remoto, onde a cada dia surgem novos satélites com resoluções na escala métrica, por exemplo o satélite Earlybird, é perfeitamente possível utilizar esta técnica como ferramenta de trabalho, entretanto, deve-se considerar os custos envolvidos, pois ainda são demasiadamente elevados.

#### *Fotografias Aéreas*

As fotografias aéreas, ainda são os melhores produtos para estudos preliminares, pois contemplam as análises dos elementos estruturais; formas de relevo e feições de dissolução; os tipos de uso e ocupação do solo da época da fotografia e os sistemas de drenagem. Além de permitirem uma visão tridimensional do terreno.

O território brasileiro possui uma cobertura fotográfica realizada pela Força Aérea Americana/USAF, datada entre 1964 e 1966, em preto & branco, na escala 1:60.000. Produtos estes disponíveis no mercado brasileiro.

Esta razão limita bastante as informações que podem ser subtraídas da análise fotointerpretativa, principalmente quanto a evolução das feições de dissoluções; atuais usos e ocupações do solo; expansão urbana; possíveis mudanças nos traçados de drenagens superficiais, etc.

Quanto a questão da escala, na ausência de um estereoscópio que possibilite ampliar várias vezes o par estereoscópio, uma alternativa é a ampliação xerográfica até a escala que se desejar, trazendo resultados satisfatórios para a fotointerpretação.

Entretanto, em algumas regiões brasileiras, tais como nos principais centros urbanos, polos industriais e mineradores, bem como grandes fazendas agropastoris, já dispõem de fotografias aéreas mais recentes e em escalas de detalhe, por vezes coloridas.

Estas análises, apresentadas em formas de mapas, servirão como documentos fundamentais básicos para a realização das etapas posteriores.

### 10.2.3 ATIVIDADES DE CAMPO

Uma vez elaborado o Mapa de Documentação e os mapas fotointerpretados, programa-se atividade de campo baseada nestas informações e nos objetivos propostos, ou seja, para trabalhos regionais, urbanos ou específicos.

Assim sendo, o detalhe do mapeamento irá depender das dimensões do projeto e da complexidade da área a ser investigada. Concomitante as fases de trabalhos abaixo relacionadas, faz-se uma entrevista com os moradores locais e aos órgãos públicos, para obtenção de informações sobre fatos relacionados a colapsos e/ou subsidências, comportamento de nascentes, lagos, rupturas de condutos subterrâneos, etc.

#### **Levantamento das Características do Meio Físico**

O levantamento geológico consiste na elaboração dos Mapas Geológico, Geomorfológico e dos Materiais Inconsolidados, elaborado a partir de caminhamentos, previamente estabelecidos pelas informações advindas do Mapa de Documentação e da análise fotointerpretativa.

#### *Mapa Geológico:*

As medidas estruturais, dos pacotes rochosos, são realizadas nos planos de acamamentos, eixos de dobras, fraturas, falhas, estruturas sedimentares ou metamórficas, quando for o caso. Devendo-se ainda, observar nestes planos, o alargamento devido a dissolução, ou se estão preenchidos por algum mineral de origem secundária ou por materiais inconsolidados da superfície.

Os dados estruturais devem ser tratados estatisticamente para verificar a densidade, sistemas e tendências direcionais das juntas e falhas.

A obtenção de amostras de rocha, para análise microscópica deve ser criteriosa, e representar o conjunto de variações petrográficas, conforme a escala de trabalho.

Após os ensaios geofísicos e sondagens mecânicas, o mapa geológico também deve incorporar as informações obtidas sobre as profundidades do substrato rochoso.

Este mapa deverá apresentar convenções bastante claras, para facilitar a análise dos usuários, além de seções transversais, para melhor visualizar o comportamento entre as rochas, materiais inconsolidados, níveis de água, falhas, fraturas, e feições de dissolução.

#### *Mapa Geomorfológico:*

Este mapa é elaborado através do inventário da geomorfologia cárstica, baseado nas observações de campo, e nos tipos de relevos fotointerpretados.

Além disso, reconhecem-se as feições do endocarste e exocarste; as formas de relevo cárstico; os tipos problemas cársticos (colapsos e subsidências) e locais de ocorrência; ocorridos na área, são assinalados neste mapa.

#### *Mapa de Materiais Inconsolidados:*

Este documento, elaborado preliminarmente pela fotointerpretação para delimitar as áreas de ocorrências, deve apresentar as relações de espessura destes materiais, textura, características geotécnicas e tipos pedológicos, conforme os sistemas de relevo da área.

A obtenção dos dados sobre a espessura é avaliada ao longo de taludes, furos a trado, dados obtidos nas sondagens preexistentes, e naqueles que serão realizadas em etapas posteriores, e complementados, pelas informações obtidas na investigação geofísica.

#### **Investigação Geofísica**

O uso de métodos geofísicos tem como objetivo principal a redução dos custos para a caracterização do terreno, substituindo parte das sondagens mecânicas. Pois, através de sondagens realizadas sobre a malha geofísica, ter-se á uma calibração entre o modelo geofísico e o perfil do terreno, podendo-se extrapolar informações.

Para o uso de métodos geofísicos terrestres, durante a investigação de terrenos cársticos, deve-se ter em mente as seguintes questões:

- a - deve-se fazer uso de métodos geofísicos integrados, isto é, a combinação de métodos que determinam diferentes propriedades físicas do terreno;
- b - são estudos essenciais para a localização de sondagens mecânicas;
- c - qual a malha de investigação e os métodos que devem ser aplicados na área.

Estes aspectos poderão ser respondidos, baseando-se nas informações obtidas nas etapas anteriores, principalmente quanto ao comportamento lito-estrutural das rochas e dos tipos e dimensões dos processos cársticos que ocorrem na área, permitindo assim que se defina os métodos à serem utilizados, bem como o tipo de arranjo geofísico a ser executado

Assim, para a avaliação geofísica de terrenos cársticos, sugere-se a aplicação de três métodos geofísicos (gravimetria, geolétricos e sísmico), face a suas resoluções e respostas das respectivas propriedades físicas medidas.

Cada um destes métodos, tem suas variações nos arranjos de campo para a obtenção dos dados, dependendo das características do terreno e dos objetivos propostos para a exploração geofísica. Desta forma, faz-se a seguir, uma descrição destas técnicas comumente aplicadas em terrenos cársticos:

#### *Método Gravimétrico:*

A investigação gravimétrica é baseada na característica de um levantamento microgravimétrico.

Tendo em vista os bons resultados obtidos por esta técnica, a nível mundial, e sua relativa facilidade na obtenção dos dados, é conveniente que este seja o primeiro método a ser executado na área de pesquisa, porque refletem o comportamento do substrato rochoso, que consequentemente, irão nortear a escolha do melhor arranjo das outras técnicas.

#### *Métodos Geométricos:*

A resistividade aparente ( $\rho_a$ ) permite elaborar um modelo geométrico do terreno, em seções verticais e em diferentes profundidades.

Isto é possível aplicando-se a técnica do caminhamento elétrico (CE) dipolo-dipolo, e sondagens verticais (SE) do tipo schlumberger ou wenner.

O Caminhamento Elétrico, tem por objetivo elaborar seções ou mapas de isovalores em várias profundidades a partir da superfície, enquanto que a Sondagem Elétrica, objetiva quantificar estes valores de resistividade ao longo destas seções geométricas.

Estrategicamente, estes arranjos deverão sobrepor as linhas gravimétricas, a fim de obter-se uma modelo geofísico mais próximo da realidade.

Embora a utilização dos métodos geométricos, apresentarem limitações em áreas urbanas, por influência de ruídos, estes poderão ser minimizados pelo uso de métodos geofísicos integrados.

#### *Métodos Eletromagnéticos*

Atualmente, e em grande difusão mundial, a investigação vem sendo feita por radar terrestre, denominado *Ground Penetration Radar/GPR*. Esta técnica tem apresentado excelentes resultados na investigação de terrenos cársticos para fins geotécnicos, principalmente, para profundidades em torno de 20 a 30 metros. A vantagem deste método é a rapidez na obtenção dos dados, além de que, também é utilizado em trabalhos em escalas regionais.

## **Investigação Geotécnica**

A localização dos trabalhos de investigação geotécnica são baseados no mapeamento geológico e na exploração geofísica, e tem por objetivo caracterizar o terreno quanto as variações das propriedades geotécnicas com a profundidade, níveis de água, feições de dissolução, cavidades, além de conferirem os resultados dos trabalhos anteriormente descritos.

Os tipos de sondagens realizados em materiais inconsolidados podem ser Standart Penetration Test/SPT, Shelby, que permitem a coleta de amostra deformada e indeformada, respectivamente. Além destas, também são feitos ensaios de resistência com o Cone Penetration Test/CPT; Testes oedométricos (ensaios de adensamento).

As amostras são submetidas, em laboratório, para determinação das frações granulométricas, índices físicos, porosidade e permeabilidade. Seus resultados irão auxiliar na elaboração do Mapa de Materiais Inconsolidados, e seu comportamento frente a instalação das obras de engenharia.

Nos materiais rochosos, faz-se uso de sondagens rotativas, aproveitando-se dos furos já executados em materiais inconsolidados, sendo executados a partir do topo do substrato rochoso, com recuperação dos testemunhos, para classificação geomecânica dos maciços rochosos. Estes, serão analisados sob o ponto de vista petrográfico, estratigráfico, estrutural e avaliação das formas de dissolução, além de permitirem a realização de ensaios geotécnicos, por exemplo, ensaio de perda d'água e RQD. Estes furos de sondagem, devem ser reaproveitados quando houver a necessidade de tratamento do terreno para injeção de caldas, bem como para monitoramentos ou prospecção geofísica (*cross-hole*)

O número de sondagens à serem realizadas é diretamente proporcional ao tipo de problema que está sendo investigado, bem como a complexidade das feições de dissolução do terreno cárstico.

## **Monitoramentos**

### *Hidrológicos*

Os monitoramentos hidrológicos consistem no uso de traçadores corantes, para avaliar as direções dos fluxos das águas superficiais e subterrâneas.

Traçadores corantes são amplamente utilizados a fim de caracterizar o caminho percorrido pelas águas subterrâneas, além de permitirem localizar as zonas de baixa e altas velocidades (gradiente hidráulico).

Dentre os tipos de traçadores destaca-se o Fluorescente, pelo seu baixo custo e menor poder de contaminação. Entre outros cita-se o Rhodamine WT e Tinopel CBSX.

Para alcançar os objetivos propostos pelo uso de traçadores, ou seja, a indicação das conexões hidráulicas subterrâneas e superficiais, é necessário um rigoroso inventário das feições de dissolução, nascentes, sumidouros, etc.,. Pois, seus resultados devem permitir a elaboração do Mapa da Superfície Potenciométrica da área de interesse.

Os aquíferos cársticos comportam-se ao mesmo tempo como aquíferos granulares (baixa velocidade) e fraturados (altas velocidades), VALENTIN (1995). Desta forma, a determinação dos fluxos de água, ou mesmo fontes contaminantes, dependerá muito da habilidade do profissional.

A avaliação do fluxo é feita através de poços de monitoramento, que podem incluir poços tubulares, cacimbas, furos de sondagens e nascentes. A escolha destes pontos é extremamente importante, exigindo do profissional um conhecimento local e regional de todo o terreno cárstico, pois é a partir destes poços que se obterá a migração dos fluidos.

Outros métodos de análise geoquímica, usando-se isótopos estáveis de  $O^{18}$  e deuterium, permitem determinar as misturas das águas infiltradas no aquífero cárstico, ou seja, a diferenciação entre o fluxo difuso nos espaços porosos intersticiais e a trajetória através de fraturas e canais de dissolução.

A instalação de pluviômetros e pluviógrafos, também consiste num monitoramento hidrológico, que devem ser instalados, caso não haja uma rede pluviométrica na área.

O monitoramento através de estações fluviométricas, ao longo das drenagens superficiais, também é um bom indicador do comportamento do terreno, pois pode-se estabelecer os segmentos em que a drenagem é efluente ou influente, indicando trechos onde ocorre a absorção da água pelo substrato subjacente. Assim, os pontos influentes irão indicar a possível presença de cavidades subterrâneas. Além de fornecer subsídios para as condições de inundação do terreno.

#### *Geológico-Geotécnicos*

O monitoramento geotécnico depende das finalidades do atual uso do solo, por isso justificam-se em estudos de áreas urbanas e de tratamentos de problemas específicos, principalmente quanto às fundações das obras de engenharia.

Basicamente, o monitoramento consiste em avaliar as influências das subsidências e colapsos seguidos por abatimento lento do terreno, por métodos superficiais e subsuperficiais.

Em relação aos movimentos do terreno, que provocam trincas e rotações nas edificações e na superfície terrestre, todos os dados obtidos devem sempre estar referenciados a um determinado nível topográfico, que não sofra as influências provocadas pelos processos cársticos.

Os movimentos verticais do terreno podem ser monitorados através de um *nivelamento geométrico de precisão*, com marcos, baseados em estações fixas, por exemplo, RN's (Referências de Níveis), e níveis arbitrários dispostos sobre o carste e áreas circunvizinhas não carstificáveis.

As deformações horizontais e/ou verticais, seja em paredes das edificações, é realizados através de *extensômetros*, eletrônicos ou manuais.

Os deslocamentos espaciais em duas ou três dimensões são obtidos por meio de leituras em *clinômetros* ou *inclinômetros*,

Também o uso de fotografias aéreas, de diferentes datas constituem numa forma de monitoramento do avanço das formas de dissolução, por exemplo, expansão de dolinas.

O monitoramento subsuperficial consiste na instalação de *câmaras de pressão* no interior dos furos de sondagem, que fornecem os valores da tensão de compressão. Em um furo dispõem-se três células, sendo duas, ortogonais entre si, para determinar as variações das tensões horizontais, e uma terceira, orientada para monitorar o comportamento das tensões verticais.

### 10.3 MODELO CÁRSTICO

Um modelo cárstico consiste na caracterização dos tipos de feições de dissolução encontrados em uma determinada área, suas dimensões e suas relações com os aspectos geológicos (litoestratigráficos, estruturais, hidrológicos e geomorfológicos), representados em seções esquemáticas e/ou blocos diagramas 3D.

Os modelos são elaborados a partir dos dados obtidos durante as atividades de campo, e devem representar os tipos de feições que ocorrem tanto na superfície como em profundidade, objetivando uma fácil visualização do terreno e seus fenômenos correlatos, tais como as irregularidades do topo do substrato rochoso; formas e dimensões das cavidades; variações verticais dos materiais inconsolidados, fluxo das águas subterrâneas, etc.

Salienta-se que a definição de um modelo cárstico, geralmente não pode ser extrapolado para outra área, uma vez que cada terreno apresenta características intrínsecas àquele local, e portanto, comportamento cárstico diferente.

#### 10.4 ZONEAMENTO DE ÁREAS POTENCIAS A OCORRÊNCIA DE EVENTOS

Este zoneamento consiste em delimitar áreas com diferentes graus de potencialidades a ocorrência de fenômenos cársticos, tais como: colapsos; subsidências; e contaminação das águas subterrâneas.

Estes eventos, são determinados a partir do número de ocorrência e dos tipos de feições de dissolução, bem como pelo histórico de uso e ocupação da área em análise.

Obviamente, devem ser analisados conjuntamente com outras causas geológicas ou naturais, em que a área possa estar inserida, por exemplo: terremotos; atmosféricos; solos colapsíveis; aterros; sobrecargas por edificações, intensidade de tráfego dos meios de transporte; instalação de pedreiras; desmatamentos; rebaixamento do nível das águas subterrâneas; vazamento de condutos hidráulicos enterrados; concentração de escoamento de águas superficiais; inundação; sistemas coletores de águas mal elaborados, instalação de barragens (sobrecarga e incremento da taxa de infiltração); atividades agrícolas, industriais, etc.

As classes deste zoneamento, podem incluir um ou mais tipos de risco cárstico, por exemplo, uma determinada área pode ser estável para determinado tipo de ocupação, frente aos fenômenos de subsidência, mas totalmente imprópria, à ocupação, porque apresenta elevada vulnerabilidade à ocorrências de colapsos, ou a contaminação dos aquíferos.

#### 10.5 ANÁLISE DE CUSTOS

Uma vez estabelecidas as zonas de maior potencial a ocorrência de problemas cársticos, faz-se uma análise de todos os custos, para a estabilização do terreno, conforme a finalidade de uso e ocupação permitida em cada uma destas áreas.

A decisão do limite de gastos, se elevado ou não, dependerá da necessidade de uso do solo, segundo o grau de carstificação associado, portanto, é uma avaliação intrínseca a cada caso.

A seguir, faz-se uma relação de algumas questões que devem ser consideradas durante esta avaliação:

- Custos relacionados aos trabalhos já realizados,
- Custos do(s) tipo(s) de tratamento(s) segundo a finalidade de uso,
- Custos das medidas de monitoramentos,

- Custos das medidas mitigadoras, que devem incluir todas as outras obras de infraestrutura ou urbanização, vinculadas a finalidade de uso pretendida, e que poderão interferir na evolução cárstica da área, por exemplo, o escoamento superficial; redes de águas servidas e de abastecimento; rede elétrica; impermeabilização do terreno; sistema viário, etc.

## **10.6 ESTABILIZAÇÃO DO TERRENO E MONITORAMENTOS**

Os projetos para estabilização do terreno são inerentes aos tipos de problemas encontrados em função das finalidades de uso e ocupação da área, ou seja, ocupação urbana, industrial, agrícola, obras lineares, entre outras.

Após a definição dos projetos de tratamento para a estabilização do terreno, deve-se também estabelecer os pontos e tipos de monitoramentos a serem estabelecidos, a fim de proporcionar segurança a ocupação daquela área. Salienta-se que estes monitoramentos são permanentes.

## CONCLUSÕES

### 10.1 SOBRE O TEMA

- Este tema é bastante complexo, e abrange um amplo leque para diferentes linhas de pesquisa, contempladas pela Geologia de Engenharia.
- A revisão bibliográfica deste trabalho, contempla os tópicos que devem ser abordados durante a avaliação geológica-geotécnica de terrenos cársticos;
- Os terrenos carbonáticos, no mundo todo, são ou foram carstificáveis, independentemente da idade geológica. E, apresentam problemas de colapsos e/ou subsidência devido aos processos de dissolução química;
- O Brasil apresenta grande número de ocorrências de rochas carbonáticas e/ou evaporíticas, totalizando 25 % dos municípios brasileiros (968 municípios), onde existe pelo menos uma área com ocorrência de rochas carstificáveis aflorantes. As rochas evaporíticas, estão restritas a região do Nordeste brasileiro.
- No Brasil, os casos de problemas geológico-geotécnicos são poucos conhecidos porque: (1) não existe tradição em estudos geológico-geotécnicos; (2) desinformação da população e órgãos públicos quanto a gravidade dos problemas; (3) não divulgação em meios técnico-científicos e imprensa, dos casos ocorridos; (4) e principalmente, por receio da desvalorização econômica da área.
- A exploração de águas subterrâneas de aquíferos cársticos depende diretamente de uma avaliação e monitoramento hidrogeológico, bem como da caracterização da fenomenologia cárstica de uma determinada área, de tal forma que não comprometa o atual uso e ocupação do solo.

### 10.2 SOBRE A ÁREA DE NOBRES, MT

- A cidade de Nobres está situada sobre uma área cárstica que apresenta alta potencialidade a ocorrência de processos de carstificação.

- A área urbana está sujeita a colapsos e subsidências, devido a existência de cavidades vazias e/ou parcialmente preenchidas, na subsuperfície do terreno.
- a deflagração dos colapsos ocorridos está relacionada as altas taxas pluviométricas.
- As feições e formas de relevo estão condicionadas aos sistemas de fraturas e falhas.
- Os morros cársticos apresentam um estágio evolutivo relacionado a um fluviocarste em franco desenvolvimento.
- O vale cárstico constitui-se num poljé em formação, denotando elevado estágio de carstificação.
- Quanto as técnicas utilizadas:

#### *Gravimetria*

O levantamento gravimétrico é válido quando se estabelece uma malha gravimétrica, com distâncias entre as estações equivalentes, e na escala métrica;

Os resultados demonstraram a validade do uso da técnica microgravimétrica para estabelecer relações entre, a ocorrência de colapsos e o comportamento do substrato rochosos, assim como evidenciaram outras áreas sujeitas à estes problemas;

Ainda assim, os métodos geofísicos devem ser executados de maneira integrada, ou seja, sempre em conjunto com outro método que tenha como princípio, medir uma grandeza física diferente da gravimetria.

#### *Fotografias Aéreas*

Embora a escala tenha sido inadequada para avaliar o caso de Nobres, esta ferramenta ainda é o melhor recurso para reconhecimento das feições de dissolução em terrenos carstificáveis;

#### *Imagens de Satélite*

O processamento digital do terreno baseado em imagens Landsat TM-5, não são adequadas para avaliar as feições de dissolução em áreas urbanas ou restritas, pois não detectam formas cársticas com dimensões iguais ou menores que 30 metros;

O uso de imagem de satélite, em estudos desta natureza, pode ser aplicado a delimitação de unidades geológicas; classificação espectral dos carbonatos; e compartimentação do atual uso e ocupação do solo.

## CITAÇÕES BIBLIOGRÁFICAS

- ABPC - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE CAL. (1978). Calcários e dolomitos no Brasil - usos e mercados. Boletim n.9.
- ALLEN, J.R.L. (1984). *Sedimentary structures: their character and physical basis*. 2ed. Amsterdam. Elsevier.
- ALMALEH, L.J.; GROB, J.D.; GORNY, R.H. (1993). Ground stabilization for foundation and excavation construction in Florida karst topography. In: ENVIRONMENTAL GEOLOGY. v. 22, pp. 308-313.
- ALMEIDA, F.F.M. de (1964). Geologia do centro-oeste mato-grossense. Rio de Janeiro, DNPM/DGM. Boletim 215. 137p.
- ALMEIDA, F.F.M.de (1984). Província Tocantins - Setor sudoeste. In: ALMEIDA, F.F.M.de and HASUI, Y. eds. *O Pré-Cambriano do Brasil*. São Paulo. Blücher. p.265-281.
- ALVARENGA, C.J.S.de (1986). Evolução das deformações polifásicas brasileiras na Faixa Paraguai, região de Cuiabá, MT. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34., Goiânia, 1986. *Anais*. Goiânia, SBG. v.3, p.1170-1175.
- ALVARENGA, C.J.S.de (1990). *Phénomènes sédimentaires, structuraux et circulation de fluides développés à la transition chaîne cratón: exemple de la Chaîne Paraguai d'âge proterozoïque supérieur. Mato Grosso, Brésil*. Marseille. 177pp. These (Doct. Sci.) Univ. Aix-Marseille III.
- ALVARENGA, J.C.S (1988). Turbiditos e a glaciação do final do proterozóico superior no cinturão Paraguai, Mato Grosso. Ver. Bras. de Geociências. 18 (3). pp323 – 327. São Paulo, SP.
- ALVARENGA, J.C.S. (1984). Dobramentos da faixa Paraguai na borda sudeste do Cráton Amazônico. In: XXXIII congresso Brasileiro de Geologia – SBG. *Anais*. V. 7. pp 3258-3271. Rio de Janeiro, RJ.
- BALLARD JR., R.F. (1983). eletromagnetic (Radar) techniques applied to cavity detection and delineation researche. Repost 5. U.S. Army Engineering Waterways Experiment Station. July. USA.

- BARROS, A.M. et alii (1982). Folha SD21 - Cuiabá. Geologia. In: RADAMBRASIL, Levant. Rec. Naturais. Rio de Janeiro. p.25-192.
- BATES, R.L. & JACKSON, J.A. (editors) (1980). Glossary of Geology. American Geological Institute. Falls Church, Virginia, USA. 2ed.
- BECK, B.F. (1993). Multidisciplinary conferences on sinkholes and karst: Past, present, and is there a future? In: ENVIRONMENTAL GEOLOGY. v.22, pp.289-290.
- BECK, F.B. (1984). Sinkhole Terminology. In: *Proceedings, 1st MULTIDISCIPLINARY CONFERENCE ON SINKHOLE - Sinkholes: their geology, engeneering & environmental impact.* Orlando, 1984. Orlando/Florida. Balkema. pp. ix-x.
- BENITO G. & GUTIÉRREZ, M. (1987). Karst and gypsum and its environmental impact on the Midle Ebro Basin (Spain). In: *Proceedings of Second multidisciplinary conference on Sinkholes and the Environmental impacts of Karst . orlando/florida.* Ed. A A. Balkema. pp 137-143.
- BERGADO, D.T. & SELVANAYAGAM, A.N. (1987). Pile foundation problems in Kuala Lumpur limestone, Malaysia. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, London. v.20, pp.156-175.
- BERTRAND-SARFATI, J. & AWRAMIK, S.M. (1992). Stromatolites of the Mescal Limestone (Apache Group, midle Proterozoic, Central Arizona: Taxonomy, bioestratigrafy, and Paleoenvironments. In: GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA BULLETIN. v.104, pp.1138-1155.
- BÖGLI, A. (1980). Karst Hydrology and Physical Speleology. New York, USA. Springer-Verlag. 284p.
- BOZICEVIC S. & PEPEONIK, Z. (1987). Croatian karst sinkhole experience. In: *Proceedings of Second multidisciplinary conference on Sinkholes and the Environmental impacts of Karst . orlando/florida.* Ed. A A. Balkema. pp 91-94.
- CAMOIN, G.F. & MONTAGGIONI, L.F. (1994). High energy coralgal-stromatolite frameworks from Holoceno reefs (Tahiti, French Polynesia). In: SEDIMENTOLOGY. v.41, n.4, pp.655-676.
- CAREW J.L. & MYLROIE, J.E. (1994). Geology and karst of San Salvador Island, Bahamas: A field Trip guidebook. Bahamian Field Station. San Salvador. Bahamas. 32p.
- CAROZZI, A.V. (1975). *Sedimentary rocks: concepts and history.* Stroudsburg. Penn, Dowden, Hutchinson & Ross.
- CARTER, P.G. & JOHNSON, A. (1989). Land Subsidence- The last five years: Report by Technical Committee TC12. In: *Proceedings, 12th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING. XII ICSMFE/CIMSTF.* 1989. Rio de Janeiro.

- CERRI, L.E.S. (1994). *Riscos geológicos associados a escorregamentos: uma proposta metodológica para prevenção de acidentes*. Rio Claro. 197p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista.
- CIGNA, A.A. (1993). Environmental Management of Tourist Caves - The examples of Grotta di Castellana and Grotta del Vento, Italy. In: ENVIRONMENTAL GEOLOGY. v.212. pp.173-180.
- COOPER, A.H. (1995). Subsidence hazards due to the dissolution of Permian gypsum in England: Investigation and remediation. In: *Proceedings, 5th MULTIDISCIPLINARY CONFERENCE ON SINKHOLES AND THE ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL IMPACTS OF KARST*. Gatlinburg 1995. Gatlinburg/Tennessee. Balkema. pp.23-29.
- COSTA NUNES, A J. et al. (1976). Problemas de fundações em terrenos metamórficos cársticos. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. ABGE. V 2. pp 217-230.
- CRAWFORD, N.C. (1984). Sinkhole flooding associated with urban karst terrain: Bowling Green, Kentucky. In: *Proceedings, 1st MULTIDISCIPLINARY CONFERENCE ON SINKHOLE - Sinkholes: their geology, engineering & environmental impact* Orlando.1984. Orlando/Florida. Balkema. pp.283-292.
- DAOXIAN, Y. (1987). Keynote address: Environmental and engineering problems of karst geology in China. In: *Proceedings, 2nd MULTIDISCIPLINARY CONFERENCE ON SINKHOLES AND THE ENVIRONMENTAL IMPACTS OF KARST*. Orlando. 1987. Orlando/Florida. Balkema. pp.1-11.
- DAY, M. (1993). Resource use in the tropical Karstlands of Central Belize. In: ENVIRONMENTAL GEOLOGY . v. 21, pp 122-128.
- DNPM - DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL (1991). Anuário Mineral Brasileiro. Brasília. Ano XX. v.1.
- DOLABELA, E. (1958). Estudos das Regiões Cársticas. Belo Horizonte, MG. 367p. Tese - Faculdade de Filosofia da Universidade de Minas Gerais.
- FERREIRA, J.B. (1980). Dicionário de Geociências. Fundação GORCEIX. Ouro Preto, MG. 550 p. ilustr.
- FISCHER, J.A.; FISCHER, J.J.; GREENE, R.W. (1993). Roadway design in karst. In; ENVIRONMENTAL GEOLOGY. v.22, pp.321-325.
- FORD, D.C. Environmental Change in Karst Areas. (1993). In: ENVIRONMENTAL GEOLOGY. v. 21, pp.107-109. editorial.
- GAMS, I. (1993). Origins of the term "Karst", and the Transformation of the Classical Karst (Kras). In: ENVIRONMENTAL GEOLOGY. v. 21, pp.110-114.
- GARLANGER, J.E. (1984). Remedial measures associated with sinkhole-related foundation distress. In: *Proceedings, 1st MULTIDISCIPLINARY CONFERENCE ON SINKHOLE - Sinkholes: their geology, engineering & environmental impact*. Orlando. 1984. Orlando/Florida. Balkema. pp.335-342.

- GARLANGER, J.E. (1991). Foundation design in Florida Karst. In: CONCRETE INTERNATIONAL. pp.56-62.
- GUERRA, A.T. (1987). Dicionário Geológico-Geomorfológico. 7ed. Rio de Janeiro. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística/IBGE. ilust.
- GULARTE, F.B. et alii. (1993). Case study of compaction grouting for foundation support in karst terrain: Earth and Marine Science Building, University of California at Santa Cruz. In: ENVIRONMENTAL GEOLOGY. v.22, pp.291-295.
- GUNN, J. & BAILEY D. (1993). Limestone quarrying and quarry reclamation in Britain. In: ENVIRONMENTAL GEOLOGY. v.21, pp.167-172.
- GUYOT, C.A. (1984). Collapse and compaction of sinkholes by dynamic compaction. In: *Proceedings, 1st MULTIDISCIPLINARY CONFERENCE ON SINKHOLE - Sinkholes: their geology, engineering & environmental impact* Orlando.1984. Orlando/Florida. Balkema. pp.419-423.
- HARDING, K.A. & FORD, D.C. (1993). Impacts of Primary Deforestation upon limestone slopes in Northern Vancouver island, British Columbia. In: ENVIRONMENTAL GEOLOGY, v.21, pp.137-143.
- HEJAZI, H.A. (1987). Use of a concrete diaphragm wall to prevent cavernous underflow at a dam. In: *Proceedings, 2nd MULTIDISCIPLINARY CONFERENCE ON SINKHOLES AND THE ENVIRONMENTAL IMPACTS OF KARST*. Orlando. 1987. Orlando/Florida. Balkema. pp.463-467.
- HUGHES, T.H.; MEMON, B.A.; LaMOREAUX, P.E. (1994). Landfills in Karst Terrains. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*. n. 2, v. XXXI.
- JAKUCS, L. (1977). *Morphogenetics of Karst Regions - variants of karst evolution*. Budapest. Akadémiai Kiadó. 284p.
- JENNINGS, J.N. (1980). *Karst Geomorphology*. Oxford. Basil Blackwell Inc. 293p.
- JUHÁSZ, E.; KORPÁS, L. & BALOG, A. (1995). Two hundred million years of karst history, Dachstein Limestone, Hungary. In: SEDIMENTOLOGY. v.42, pp.473-489.
- KARMANN (1994). Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do alto do vale do Rio Ribeira de Iguape, Sudeste do Estado de São Paulo. São Paulo. 228p. *Tese de doutoramento*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- KASTNING, E.H. (1989). Surficial karst patterns: Recognition and interpretation. In: *Proceedings, 3th MULTIDISCIPLINARY CONFERENCE ON SINKHOLES AND THE ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL IMPACTS OF KARST*. St. Petersburg Beach. 1989. St Petersburg Beach/Florida. Balkema. pp.11-16.
- KENNIE, T.J.M. & EDMONDS C.N. (1988). Location of Potential Ground Subsidence and Collapse Features in Soluble Carbonate Rock by Remote Sensing Techniques. Geotechnical Applications of Remote Sensing and Remote Data Transmission. ASTM STP 967, Philadelphia. pp.99-121.

- KETELLE, R.H. & NEWTON, J.G. (1987). Inventory of karst in the Valley and Ridge Province of East Tennessee. In: *Proceedings, 2nd MULTIDISCIPLINARY CONFERENCE ON SINKHOLES AND THE ENVIRONMENTAL IMPACTS OF KARST*. Orlando. 1987. Orlando/Florida. Balkema. pp.25-29.
- KOHLER, H.C. (1989). *Geomorfologia cárstica na região de Lagoa Santa - MG*. São Paulo. 113p. Tese (Doutorado). Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas/ Geografia, Universidade de São Paulo.
- KRAUSKOPF, K.B. (1972). Introdução a geoquímica. tradução. Ed. Polígono, USP. 294p. São Paulo.
- LaMOREAUX, P.E. & POWELL, W.J. (1996). Springs and Bottled waters. In: *Environmental Geology*. V.27. pp. 75-76.
- LaMOREAUX, P.E. (1995). Historical references to karst studies. In: *Proceedings, 5th MULTIDISCIPLINARY CONFERENCE ON SINKHOLES AND THE ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL IMPACTS OF KARST*. Gatlinburg 1995. Gatlinburg/Tennessee. Balkema. pp.11-16.
- LaMOREAUX, p.e.; POWEL, W.J.; LeGRAND H.E. (1997). Environmental and legal aspects os karst areas. In: *Environmental Geology*. V 29. n 1 e 2. Research article.
- LaMOUREAUX, P.E. (1984). Catastrophic subsidence: Selby County, Alabama. In: *Proceedings, 1st MULTIDISCIPLINARY CONFERENCE ON SINKHOLE - Sinkholes: their geology, engeneering & environmental impact* Orlando.1984. Orlando/Florida. Balkema. pp.130-136.
- LAPORTE, L.F. (1975). Ambientes antigos de sedimentação. Série de Textos básicos de Geociência – Tradução Ed. Edgar Blücher Ltda. 145p. São Paulo, SP.
- LINO, C.F (1989). *Cavernas - O fascinante Brasil subterrâneo*. São Paulo, SP. Ed. Rios. Texto inglês-português. 279p.
- LOKSHIN G.P. (1990). Impact of Vibration on Geocological State in Urban Areas. In: 6th INTERNATIONAL IAEG CONGRESS. Balkema. Rotterdam. p.2367-2369.
- LUND, P.W. (1950). *Memórias sobre a paleontologia brasileira*. Rio de Janeiro. INL.
- LUZ, J.S. & ABREU FILHO, W. (1978). Aspecto geológico-econômico da Formação Araras do Grupo Alto Paraguai, MT. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30. Recife. v.4, p.1816-1826.
- MALAGUTTI FILHO, W. (1991). *Utilização de Técnicas Geofísicas na Caracterização de Solos e Rochas com aplicações na Geologia de Planejamento Urbano*. Rio Claro, SP. 198p. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista.
- McCANN, D.M.; JACSON, P.D. & CULSHAW, M.G. (1987). The use of geophysical methods in the detection of natural cavities and mineshafts. In: *Quarterly Journal of Engineering Geology*. London. v.20, pp.59-73.

- MENDES, J.C. (1984). *Elementos de Estratigrafia*. São Paulo, SP. Ed. Universidade de São Paulo.
- MENDONÇA, A.F. (1993). *Caracterização da erosão subterrânea nos aquíferos porosos do Distrito Federal*. Brasília, DF. 155p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências. Universidade de Brasília.
- MIDÉA, N.F. & DE PAULA, L.C. (sem data). Sobre Vibrações provocadas por Desmontes de Maciços Rochosos com Explosivos e sua Interferência no meio Ambiente. Publicação interna IPT/ São Paulo. 19?. 7p.
- MONT'ALVERNE, A.A.F. (1978). Sedimentação carbonática submarina. Recife, PE. Seminário de Oceanografia geológica. 54p.
- MOORE, H.L. (1984). Geotechnical consideration in the location, design, and construcyion of highways in karst terrain - The Mississipi Parkway extension, Knox-Blount Countries, Tennessee. In: *Proceedings, 1st MULTIDISCIPLINARY CONFERENCE ON SINKHOLE - Sinkholes: their geology, engeneering & environmental impact* Orlando.1984. Orlando/Florida. Balkema. pp.385-390.
- MOREIRA, J.B.P. (1988). *Prospecção de Cavidades Subterrâneas em Geologia de Engenharia, Aplicação de Métodos geofísicos*. Lisboa, Portugal. 264p. Dissertação - Universidade Nova de Lisboa.
- NAKAZAWA, V.A. (1994). Afundamentos cársticos. ENCONTRO TÉCNICO CESP/IPT. O meio físico nos estudos ambientais de projetos hidrelétricos. São Paulo. p.74-77.
- NAKAZAWA, V.A.; PRANDINI, F.L.; NACHBAL, B.; DANTAS, A.M. de A. (1990). Assentamento urbano e industrial em áreas cársticas: panorama no Brasil. In: SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE RISCO GEOLÓGICO URBANO, 1., São Paulo, 1990. *Anais*. São Paulo, ABGE. p.206-217.
- NEWTON, J.G. (1987). Development of Sinkholes Resulting From Man's Activities in the Eastern United States. U.S. Geological Survey Circular 968. 54p.
- NUNES, A.J. da C.; SILVA FILHO, B.C.da & VASCONCELOS, E.M. (1976). Problemas de fundações em terrenos metamórficos cársticos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 1., Rio de Janeiro, 1976. *Anais*. Rio de Janeiro, ABGE. v.2, p.217-230.
- PETTIJOHN, F.J. (1957). *Rocas Sedimentares*. Buenos Aires, Argentina. Ed. Universitaria.
- PRANDINI, F.L. et alii (1987). Cajamar: carst e urbanização: a experiência internacional (síntese bibliográfica). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 5., São Paulo, 1987. *Anais*. São Paulo, ABGE. v.2, p.431-441.
- PRANDINI, L.F.; NAKAZAWA, V.A.; SANTOS, A.R. dos; DANTAS, A.M.A. (1990). Evolução de cavidades em carst coberto. Contribuição da geologia de engenharia. In: I SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE RISCO GEOLÓGICO URBANO. São Paulo, 1990. *Anais*. São Paulo, ABGE. p.197-205.

- RODRIGUES, J.D. (1988). Proposed Geotechnical Classification of Carbonate Rocks based on Portuguese and Algerian Examples. In: *Engineering Geology*. V. 25. Pp. 33-43.
- RYAN, C.R. (1984). High-volume grouting to control sinkhole subsidence. In: *Proceedings, 1st MULTIDISCIPLINARY CONFERENCE ON SINKHOLE - Sinkholes: their geology, engineering & environmental impact* Orlando.1984. Orlando/Florida. Balkema. pp.413-418.
- SAURO, U. (1993). Human impact on the karst of the Venetian Fore-Alps, Italy. In: *ENVIRONMENTAL GEOLOGY*. v.21, pp.115-121.
- SBE - SOCIEDADE BRASILEIRA DE ESPELEOLOGIA (1991). Cadastro Nacional de Cavidades Naturais / Índice de dados sobre as Cavernas do Brasil. CCEPE-Comissão de Cadastro, Espeleometria e Províncias Espeleológicas.
- SEBELA, S. & MIHEVC, A. (1995). The problems of constructions on karst - the examples from Slovenia. In: *Proceedings, 5th MULTIDISCIPLINARY CONFERENCE ON SINKHOLES AND THE ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL IMPACTS OF KARST*. Gatlinburg 1995. Gatlinburg/Tennessee. Balkema. pp.475-479.
- SELLEY, R.C. (1992). *Applied sedimentology*. London. Academic.
- SILVA, A.B. (1988). Abatimento de solo na cidade de Sete lagoas, MG. *Rev. Águas Subterrâneas*, n.12, agosto/1988.
- SILVA, A.B. da (1984). *Análise morfoestrutural, hidrogeológica e hidroquímica no estudo do aquífero cárstico do Jaíba, norte de Minas Gerais*. São Paulo. 190p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- SOWERS, G.F. (1984). Correction and protection in limestone terrane. In: *Proceedings, 1st MULTIDISCIPLINARY CONFERENCE ON SINKHOLE - Sinkholes: their geology, engineering & environmental impact*. Orlando.1984. Orlando/Florida. Balkema. pp.373-378.
- SPUTO, T. (1993). Sinkhole damage to Masonry Structure - *Journal of Performance of Constructed Facilities*. v. 7 , n.1, ASCE.
- STATHAM, I. & BAKER, M. (1986). Foundation problems on limestone: A case history from the Carboniferous Limestone at Chepstow, Gwent. *Quarterly Journal of Engineering Geology*. London. v.19, pp.191-201.
- SUGUIO, K. (1973). *Introdução a sedimentologia*. São Paulo. Edgard Blucher - EDUSP.
- SUGUIO, K. (1980). *Rochas sedimentares: propriedades, gênese, importância econômica*. São Paulo. Edgard Blucher.
- THORNBURY (1966). *Principles of Geomorphology*. New York. USA. Ed. John Wiley, Inc.
- TODD, D.K. (1959). *Hidrologia de Águas Subterrâneas*. São Paulo, SP, Ed. Edgard Blücher Ltda.

- TOURENQ, C.; ARCHIMBAUD, C.L. (1974) - *Proprietés des calcaires*. In: *Proceedings* 2nd Int. Congr. IAEG, São Paulo, PAP IV, 19.
- VALENTIN, M.M. (1995). Is closure-in-place a suitable remedy for unlined landfills in sinkholes? In: *Proceedings, 5th MULTIDISCIPLINARY CONFERENCE ON SINKHOLES AND THE ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL IMPACTS OF KARST*. Gatlinburg 1995. Gatlinburg/Tennessee. Balkema. pp.249-254.
- VIEIRA, A.J. (1965). Geologia do Centro-Oeste de Mato Grosso. PETROBRÁS. DEBSP. Rel. Téc. Int. São Paulo. 303p.
- WAGENER, F. von M. & DAY, P.W. (1984). Construction on dolomite in South Africa. In: *Proceedings, 1st MULTIDISCIPLINARY CONFERENCE ON SINKHOLE - Sinkholes: their geology, engineering & environmental impact* Orlando.1984. Orlando/Florida. Balkema. pp.403-412.
- WALTHAM, A.C. & SMART, P.L. (1988). Photographic feature: Civil engineering difficulties in the karst of China. In: *Quarterly Journal of Engineering Geology*. London. v.21, p.2-6.
- WHITE, E.L.; ARON, G.; WHITE W.B. (1984). The influence of urbanization on sinkhole development in central Pennsylvania. In: *Proceedings, 1st MULTIDISCIPLINARY CONFERENCE ON SINKHOLE - Sinkholes: their geology, engineering & environmental impact*. Orlando. Orlando/Florida. Balkema. pp.275-282.
- WRIGHT, V.P. (1992). A revised classification of limestone. In: *SEDIMENTARY GEOLOGY*. v.76, pp.177-185.
- ZHANG, Q. et al. (1993). A Expert System for Prediction of Karst Disaster in Excavation on Tunnel or Underground Structures through a Carboante Rock Area. In: *Tunnelling and Underground space Technology*. v. 8. No 3. pp. 373-378. Great Britain.

# APÊNDICE I

**TABELA 17 - OCORRÊNCIAS BRAILEIRAS DE DOLOMITOS.** Fontes: CPRM(1997); DNPM (1997); ABPC (1978)

(\*) Depósitos ou Jazidas (0) Lavra em exploração (/0) Lavra abandonada (+) Ocorrências

(-) Sem informações

UF	TIPO	MUNICÍPIO	LOCAL	IDADE GEOLÓGICA	LITOLOGIAS ASSOCIADAS
BA	-	Andaraí	-	-	-
BA	-	Aracatu	-	-	-
BA	-	Barreiras	-	-	-
BA	-	Bom Jesus da Lapa	Lageado, Morro Preto	Proterozóico Superior	Calcilutitos, calcarenitos
BA	-	Botuporá	-	-	-
BA	*	Brumado	Morro do Sobrado / Vários	Arqueano Superior	-
BA		Buerarema	Faz. Mandacaru	Arqueano	Granulito
BA	-	Caetite	-	-	-
BA	-	Cafamaum	-	-	-
BA	-	Camamu	-	-	-
BA	+	Casa Nova	Serra da Capivara	Proterozóico inferior	Grupo Colomi
BA	-	Côcos	-	-	-
BA	-	Coribe	-	-	-
BA	-	Crisópolis	-	-	-
BA	+	Dom Inocêncio	Faz. João Alves	Arqueano superior	Intercalações c/ Micaxistos
BA	-	Ibitiara	-	-	-
BA		Ipirá	Faz. Morro do Cesário	Arqueano	Granulito
BA		Itapetinga	Salobão	Proterozóico Superior	-
BA	-	Ituaçu	-	-	-
BA	+	Juazeiro	Faz. Olho d' água	Arqueano	Intercalações c/ Metamórficas
BA	+	Marau	Ilha do Taipu mirim	Cretáceo inferior	Dolomito-calcítico
BA	-	Morro do Chapéu	-	-	-
BA	-	Pindobaçu	-	-	-
BA	+	Remanso	Sítio Olho d' água	Proterozóico inferior	Grupo Colomi
BA	-	Rio do Antônio	-	-	-
BA	+	Santo Sé	Vários	Proterozóico inferior	Grupo Colomi
BA	-	Sta Maria da Vitória	-	-	-

...Tabela 17

CE	-	Camocim	-	-	-
CE	-	Canindé	-	-	-
CE	-	Iguatu	Vários	Proterozóico inferior	Gnaisse
CE	-	Jucas	Sítio Torto	Proterozóico inferior	Biotita-gnaisse
CE	-	Limoeiro do Norte	-	-	-
CE	-	Tabuleiro do Norte	-	-	-
DF	-	Brasília	Faz. Lonhem	Proterozóico superior	Ardósias
ES	-	Cachoeiro Itapemirim	-	-	-
ES	-	Castelo	-	-	-
GO	-	Jataí	Perolândia	-	-
GO	-	Goianésia	-	-	-
GO	-	Anápolis	-	-	-
GO	-	Goianápolis	-	-	-
GO	-	Palmeiras de Goiás	-	-	-
GO	-	Indiara	-	-	-
GO	-	Mimoso de Goiás	-	-	-
GO	-	Firminópolis	-	-	-
GO	-	Galheiros	Galheiros	Proterozóico superior	Calcários
GO	-	Padre Bernardo	Faz. Colônia/ Sta Maria	Arqueano superior	Mármore
GO	*	Pirenópolis	Faz. Caieira	Proterozóico médio	-
GO	-	Planaltina	Faz. Brasília	Proterozóico superior	Metassedimentos, ardósias
GO	-	Goiás	Serra Santa Rita	Arqueano	Metassedimentos quartzosos
GO	0	Cristalândia	Lagoa da Confusão	Proterozóico médio	Grupo Tocantins
MG	-	Arcos	-	-	-
MG	-	Arinos	W do Rio Piratininga	Proterozóico Superior	-
MG	0	Barão de Cocais	Faz. Congo soco	Proterozóico inferior	Itabiritos, quartzitos
MG	0	Belo Horizonte	Acaba mundo	Proterozóico inferior	Itabiritos, quartzitos
MG	-	Bocaiúva	-	-	-
MG	-	Buritiz	-	-	-
MG	-	Congonhas	-	-	-

...Tabela 17

MG	-	Dom Cavalcanti	Vale do Cór. Areia Preta	Arqueano	Gnaisses
MG	-	Doresópolis	-	-	-
MG	+	Felixlândia	Vários	Proterozóico superior	Arenitos, siltitos
MG	*	Formiga	Boqueirão	Proterozóico Superior	-
MG	-	Formoso	Cór. das Lages	Proterozóico médio-inferior	Dolom. estromatolíticos
MG	-	Francisco Dumont	-	-	-
MG	+	Ibirite	Vários	Proterozóico inferior	Filitos
MG	-	Iguatama	-	-	-
MG	0	Itabirito	Vários	Proterozóico inferior	Filitos, Quartzitos, itabirito
MG	0	Itatiaiuçu	Jatobá	Proterozóico inferior	Itabirito
MG	-	Jaboticatubas	-	-	-
MG	-	Januária	-	-	-
MG	-	João Pinheiro	Vários	Proterozóico Superior	Quartzitos, metapelitos
MG	-	Matutino	-	-	-
MG	-	Moema	Lagoa das piranhas	Proterozóico Superior	-
MG	-	Monjolos	-	-	-
MG	-	Morada Nova de Minas	Vários	Proterozóico superior	Metapelitos calcíferos
MG	-	Nova Lima	-	-	-
MG	-	Ouro Branco	-	-	-
MG	0	Ouro Preto	Vários	Proterozóico inferior	Filitos, Quartzitos, itabirito
MG	-	Pains	-	-	-
MG	-	Paracatu	Rib. São Pedro / Vários	Proterozóico médio-inferior	Metassiltitos
MG	+	Pequi	Faz. Bom Jardim - Norte	-	Quartzito, anfibólio-xisto
MG	+	Pitangui	Faz. Bom Jardim - Sul	-	Quartzito, anfibólio-xisto
MG	-	Ponte Nova	Cuiabano	-	Filito grafitoso
MG	-	Presidente Olegário	-	-	-
MG	/0	Sabará	Taquaril	Proterozóico inferior	Filito, itabirito
MG	0	Santa Barbara	Vários	Proterozóico inferior	Filitos, Quartzitos, itabirito
MG	-	São Gotardo	-	-	-
MG	-	Sete Lagoas	-	-	-

...Tabela 17

MG	-	Taquaruçu de Minas	-	-	-
MG	+	Unai	Ribeirão de areia	Proterozóico superior	Metassilito, ardósia
MG	0	Vazante	Vários	Proterozóico superior	Filito, ardósia
MS	*	Bodoquena	Vários	Proterozóico superior	Sequência carbonática
MS	*	Bonito	Vários	Proterozóico superior	Sequência carbonática
MS	*	Corumbá	Vários	Proterozóico superior	Sequência carbonática
MS	*	Miranda	Vários	Proterozóico superior	Sequência carbonática
MT	-	Alto Paraguai	Faz. Itaipu	Proterozóico superior	Calcários
MT	*	Barra do Bugres	W da Serra das Araras	Proterozóico superior	Calcários
MT	*	Cáceres	Povoado Santana	Proterozóico superior	-
MT	*	Nobres	Vários	Proterozóico superior	Calcários
MT	-	Nossa Sra Livramento	-	-	-
MT	*	Rosário Oeste	Vários	Proterozóico superior	Calcários
MT	-	Poconé	-	-	-
PA	-	Conceição do Araguaia	Serra das Andorinhas	Arqueano	Itabiritos, xistos
PA	-	Itaperucu	-	-	-
PB	+	Ouro Velho	Faz. Raposo	Proterozóico inferior	Migmatitos
PE	0	Belém de São Francisco	Pedrinha	Proterozóico inferior	Migmatitos
PR	-	Adrianópolis	-	-	-
PR	-	Almirante Tamandaré	Água boa / Capivara	Proterozóico superior	Metadolomitos
PR	-	Araucária	-	-	-
PR	-	Balsa Nova	Faxina	Proterozóico	Metassedimentos
PR	0	Bocaiúva do Sul	Pulador	Proterozóico médio	Filito, metadolomito
PR	-	Campo Largo	Bateias	Proterozóico	Metassedimentos
PR	*	Castro	Vários	Proterozóico médio-superior	Metassedimentos
PR	0	Colombo	Vários	Proterozóico superior	Metassedimentos, quartzitos
PR	-	Mandirituba	-	-	-
PR	-	Ponta Grossa	Vários	Proterozóico	Metassedimentos
PR	0	Rio Branco do Sul	Vários	Proterozóico superior	Metassedimentos, quartzitos
PR	-	Senges	-	-	-

...Tabela 17

PR	-	Tijucas do Sul	-	-	-
RJ	-	Barra do Piraí	-	-	-
RJ	-	Barra Mansa	-	-	-
RJ	-	Cambuci	-	-	-
RJ	-	Cantagalo	-	-	-
RJ	-	Dorândia	-	-	-
RJ	-	Italva	-	-	-
RJ	-	Itaperuna	-	-	-
RJ	-	Nossa Sra da Penha	-	-	-
RJ	-	Paraíba do Sul	-	-	-
RJ	-	Rialito	-	-	-
RJ	-	São João do Paraíso	-	-	-
RJ	-	Valença	-	-	-
RJ	-	Barão de Juparana	-	-	-
RS	-	Rio Pardo	-	Permeano superior	Argilito
RS	-	Camaquã	-	-	-
RS	-	Pinheiro Machado	-	-	-
RS	-	Bagé	Seival	-	-
SC	-	Camboriú	-	-	-
SC	-	Garuva	-	-	-
SC	-	Grão Pará	-	-	-
SC	-	Ibirama	-	-	-
SC	-	Joinvile	-	-	-
SC	-	Lauro Müller	-	-	-
SC	-	Palhoça	Enseada Brito	-	-
SC	-	Ribeirão da Areia	-	-	-
SC	-	São Bento do Sul	-	-	-
SC	-	Urussanga	-	-	-
SC	-	Vidal Ramos	-	-	-
SE	-	Laranjeiras	Laranjeiras	Cretáceo inferior	-

*...Tabela 17*

SP	+	Santana do Parnaíba	Jazida Ubaldo Lolli	Proterozóico médio-superior	-
SP	-	São José do Barreiro	-	-	-
SP	-	São Luis do Paraitinga	-	-	-
SP	-	São Pedro	-	-	-
SP	-	Sorocaba	-	-	-
SP	-	Tapiratiba	Faz. Areias	Précambriano	Migmatitos
SP	-	Taubaté	-	-	-
SP	0	Tiête	Pedemeiras/F. Sto Olegário	Permeano	Folhelhos, siltitos e argilitos
TO	-	Cristalândia	-	-	-

**TABELA 18 - OCORRÊNCIAS BRASILEIRAS DE EVAPORITOS.** Fontes: CPRM (1997); DNPM (1997); ABPC (1978)

(\*) Depósitos ou Jazidas (0) Lavra em exploração

(/0) Lavra abandonada (+) Ocorrências

(-) Sem informações

UF	TIPO	MUNICÍPIO	LOCAL	IDADE GEOLÓGICA	LITOLOGIAS ASSOCIADAS
AM	-	Nhamunda	Rio Nhamunda	Permocarbonífero	Gipsita, halita, silvinita
AM	-	Nova Olinda do Norte	Fazendinha/ Manaus	Permocarbonífero	Arenitos, Silvinita, Halita
AM	-	Urucara	Urucara	-	-
BA	-	Água Fria	-	-	-
BA	-	Camamu	-	-	-
BA	-	Juazeiro	-	-	-
BA	-	Marau	-	-	-
CE	-	Limoeiro do Norte	-	-	-
CE	-	Missão Velha	-	-	-
CE	-	Santana do Cariri	-	-	-
ES	-	Conceição da Barra	-	-	-
GO	-	Firminópolis	-	-	-
MA	-	Codó	-	-	-
MA	-	Grajaú	-	-	-
MA	-	Imperatriz	-	-	-
MA	-	Montes Altos	-	-	-
PA	-	Aveiro	-	-	-
PA	-	Brasília Legal	Aveiro	Permocarbonífero	Sal Gema e Potássio
PA	-	Oriximina	Tombetas	Permocarbonífero	Folhelhos, siltitos
PE	-	Ararapina	-	-	-
PE	-	Bodoco	-	-	-
PE	-	Exú	-	-	-
PE	-	Ipubi	-	-	-
PE	-	Ouricuri	-	-	-
PE	-	Trindade	-	-	-
PI	-	Conceição do Canindé	-	-	-
PI	-	Jaicos	-	-	-

*...Tabela 18*

PI	-	Paulistana	-	-	-
PI	-	São João do Piauí	-	-	-
PI	-	Simões	-	-	-
RJ	-	Campos de Goitacazes	Sto Amaro de Campos	-	-
RJ	-	Italva	-	-	-
RN	-	Caraubas	-	-	-
RN	-	Carnaubais	-	-	-
RN	-	Gov. Dix Sept Rosado	-	-	-
RN	-	Guamaré	-	-	-
RN	-	Macau	-	-	-
RN	-	Mossoró	Estreito	Cretáceo superior	Arenitos, siltitos, Gipsita
RN	-	Pendências	-	-	-
RS	-	Nonoai	-	-	-
TO	-	Babaculândia	-	-	-
TO	-	Filadélfia	-	-	-

**TABELA 19 - OCORRÊNCIAS BRASILEIRAS DE CALCÁRIOS.** Fontes: CPRM (1997); DNPM (1997); ABPC (1978)

(\*) Depósitos ou Jazidas (0) Lavra em exploração

(/0) Lavra abandonada (+) Ocorrências

(-) Sem informações

UF	TIPO	MUNICÍPIO	LOCAL	IDADE GEOLÓGICA	LITOLOGIAS ASSOCIADAS
AL	0	Água Branca	Vários	Proterozóico superior	Quartzo-sienito
AL	+	Barra do Sto Antônio	Vários	-	-
AL	+	Batalha	Vários	Proterozóico méd-inf.	Biotita-xisto
AL	*	Belo Monte	Vários	Proterozóico méd-inf.	Biotita-xisto
AL	+	Japaratinga	Barreiras	-	-
AL	+	Jaramataia	Vários	Proterozóico méd-inf.	Biotita-xisto
AL	+	Maceió	Ponta Verde/Pajuçara	-	-
AL	+	Maragoji	São Bento	-	-
AL	/0	Mata Grande	Faz. Bem Feita	Arqueano	Biotita-gnaiss
AL	+	Mirador do Negrão	Vários	Proterozóico méd-inf.	Biotita-xisto
AL	+	Palmeira dos Índios	Rio Cururipi	Proterozóico méd-inf.	Arteritos
AL	/0	Pão de Açúcar	Faz. Nosso Gosto	Proterozóico superior	Leucogranito
AL	+	Passo do Caramagibe	Vários	-	-
AL	+	Paulo Jacinto	Sítio Lunga	Proterozóico méd-inf.	Arteritos
AL	+	Porto das Pedras	Tatuamunha	-	-
AL	0	S. Miguel dos Campos	Santa Tereza	Cretáceo	Arteritos
AL	+	S. Miguel dos Milagres	Vários	-	-
AM	*	Borba	São Domingos	Proterozóico médio	Grupo Beneficiente
AM	*	Mauês	Pedra do Barco	Permocarbonífero	Grupo Tapajós - sedimentos
AM	*	Nhamunda		Permocarbonífero	Evaporitos
AM	-	Urucara	-	-	-
BA	/0	Água Quente	Vários	Proterozóico médio	Ardósia, arenitos
BA	-	América Dourada	-	-	-
BA	/0	Anagé	Vários	Arqueano superior	Metaultrabásicas, xistos, gnaisses
BA	/0	Andaraí	Morrinhos	Proterozóico superior	Metacalcários
BA	0	Angical	Vários	Proterozóico superior	Metacalcários
BA	-	Araci			

...Tabela 19

BA	0	Arcai	Vários	Jurássico Superior	-
BA	-	Barra da Estiva	-	-	-
BA	0	Barra da Estiva	Faz. Jurema	Arqueano superior	Filitos
BA	0	Barreiras	Faz. Trindade	Proterozóico superior	Metacalcários
BA	+	Belmonte	Vários	Précambriano	Ortognaisse
BA	+	Bom Jesus da Lapa	Vários	Proterozóico superior	Dolomitos
BA	+	Boquira	Serra do Pajeú	Arqueano superior	Filitos, quartzitos
BA	+	Botuporã	Faz. das Pedrinhas	Arqueano superior	Calcário dolomítico
BA	-	Brejolândia	-	-	-
BA	-	Brumado	-	-	-
BA		Caatiba	Faz. São Paulo	Arqueano	Granulitos, mármore
BA	*	Cachoeira	Vários	Cretáceo inferior	Arenitos, siltitos
BA	-	Caetite	-	-	-
BA	-	Cairú	-	-	-
BA	+	Caldas do Jorro	Vários	Cretáceo	-
BA	/0	Camacan	Vários	Proterozóico superior	-
BA	-	Camacan 0	-	-	-
BA	-	Camamu	-	-	-
BA	+	Campo Alegre Lourdes	Barro	Arqueano superior	Migmatito
BA	*	Campo Formoso	Vários	Quaternário e Proterozóico	Metacalcários
BA	-	Canarana	-	-	-
BA	+	Canavieiras	Vários	Proterozóico superior	-
BA	/0	Carinhanha	Vários	Proterozóico superior	Calcário oolítico
BA	-	Casa Nova	-	-	-
BA	+	Castro Alves	Faz. Barbosa	Arqueano	Calcosilicáticas
BA	-	Catolândia	-	-	-
BA	-	Central	-	-	-
BA	+	Côcos	Vários	Proterozóico superior	Calcário oolítico
BA	/0	Coribe	Vários	-	-
BA	+	Correntina	Faz. Brejo dos Aflitos	Terciário-quaternário	Calcário

...Tabela 19

BA	0	Cotegipe	Fz. Água Branca/Wanderley	Proterozóico superior	Metacalcários
BA	/0	Crisópolis	Vários	Proterozóico superior	Calcários
BA	+	Curaçá	Vários	Arqueano	Gnaisse
BA	*	Euclides da Cunha	Vários	Proterozóico superior	Calcários
BA	/0	Glória	R.Freitas/F. São Francisco	Proterozóico superior	Granito
BA	-	Ibiassuce	-	-	-
BA	/0	Ibiquera	Lagoa da Lapinha	Proterozóico superior	Metacalcários
BA	-	Ibitiára	-	-	-
BA	-	Ibitita	-	-	-
BA	0	Ilhéus	Jureana	Quaternário/holoceno	-
BA	0	Inhambupe	Faz. Saquinho	Cretáceo inferior	Calcários
BA	+	Ipirá	Faz. Morro do Cesário	Arqueano	Calcosilicáticas, granulitos
BA	+	Iramaia	Bela Gruta	Proterozóico superior	Metacalcários
BA	/0	Iraquara	Faz. Turrinha	Proterozóico superior	Metacalcários
BA	/0	Irecê	Vários	Proterozóico superior	Metacalcários
BA	/0	Itambé	Faz. Itajubá	-	-
BA	*	Itaparica	Vários	Cretáceo inferior	Aluviões
BA	/0	Itapebi	Itapebi	Proterozóico superior	-
BA	0	Itapetininga	Vários	-	-
BA	-	Itarantim	-	-	-
BA	0	Ituaçu	Vários	Proterozóico superior	Metacalcários
BA	-	Ituaçu	-	-	-
BA	-	Jaborandi	-	-	-
BA	0	Jacobina	Vários	Proterozóico superior	Mármore
BA	-	Jaguaripe	-	-	-
BA	-	Jânio Quadros/Condeúba	-	-	-
BA	0	Juazeiro	Vários	Quaternário	Calcários clásticos
BA	-	Jussara	-	-	-
BA	/0	Lajedinho	Faz. Mocozeiros	Proterozóico superior	Metacalcários
BA	-	Licínio de Almeida	-	-	-

...Tabela 19

BA	+	Livramento do Brumado	Baixa Funda	Arqueano superior	Calcário dolomítico
BA	+	Macaraui	Lagoa da Sufeira	Proterozóico médio	Micaxistos
BA	-	Macaúbas	-	-	-
BA	/0	Macurure	Faz. Buraco d'água	Proterozóico méd-inf.	Metabásicas, granitóides
BA	+	Malhada	Vários	Proterozóico superior	Calcário oolítico
BA	-	Manoel Vitorino	-	-	-
BA	/0	Marau	Vários	Cretáceo inferior	Siltitos, calcários coralinos
BA	/0	Mascote	Vários	Proterozóico superior	-
BA	*	Mirangaba	Vários	Proterozóico superior	Metacalcários, arenitos
BA	0	Montalvânia	Vários	Proterozóico superior	Calcário oolítico
BA	0	Morro do Chapéu	Faz. Pedra Branca	Quaternário	Calcários
BA	-	Nova Canaa	-	-	-
BA	-	Paramirim	-	-	-
BA	*	Paripiranga	Vários	Proterozóico superior	Calcários
BA	+	Pau Brasil	Vários	Proterozóico superior	-
BA	/0	Paulo Afonso	Vários	Proterozóico superior	Granito
BA	+	Potiragua	Vários	Cambriano	-
BA	/0	Queimadas	NW de Santa Luz	Arqueano	Metatexitos
BA	+	Riacho de Santana	Vários	Arqueano	Calcário dolomítico
BA	-	Rio do Antônio	-	-	-
BA	0	Rio Real	Faz. Buriil	Proterozóico superior	Calcários
BA	-	Rui Barbosa	-	-	-
BA	*	Salinas da Margarida	Vários	Cretáceo inferior	Depósitos biodetríticos
BA	*	Salvador	Vários	Quaternário	Sedimentos biodetríticos
BA	/0	Santa Brígida	Maranco/F. Monte Alegre	Proterozóico méd-inf.	Granada micaxistos
BA	-	Santa Maria da Vitória	-	-	-
BA	+	Santana	-	Quaternário	Depósitos biodetríticos
BA	*	Santo Amaro	Ilha de Cajaíba	Cretáceo inferior	Arenitos, siltitos
BA	+	Santo Sé	Favela Flores	Proterozóico superior	-
BA	-	São Desidério	-	-	-

...Tabela 19

BA	*	São Félix	Vários	Cretáceo inferior	Aluviões
BA	*	São Francisco do Conde	Ilha de Maré	Quaternário	Sedimentos biotetríticos
BA	0	Seabra	Lagoa da Porta	Proterozóico superior	Metacalcários
BA	-	Sebastião Laranjeiras			
BA	0	Simões Filho	Faz. Aratu	Cretáceo inferior	Arenitos, siltitos
BA	+	Sobradinho	Faz. Esplanada	Arqueano superior	Ortognaisse
BA	+	Taipu	Faz. BomJesus	Cretáceo Superior	Margas
BA	0	Tanhaçu	Vários	Proterozóico superior	Metacalcários
BA	+	Teodoro Sampaio	Faz. Serra d'água	Cretáceo inferior	-
BA	+	Tucano do Sul	Faz. Salgado	Arqueano superior	Calcários
BA	+	Uava	Vários	Proterozóico superior	Gnaiss, migmatito
BA	+	Ubaitaba	Faz. Casa Branca	Arqueano	Granulitos
BA	0	Urandi	Faz. Lagoa Grande	Proterozóico superior	-
BA	0, /0	Utinga	Vários	Proterozóico superior	Metacalcários
BA	-	Várzea Nova			
BA	*	Vera Cruz	Vários	Quaternário	Sedimentos biotetríticos
BA	/0	Wagner	Faz. Dourado	Proterozóico superior	Metacalcário
BA	+	Xique-Xique	Faz. Estreito	Quaternário	-
CE	+	Aiuaba	Porteiras	-	Gnaisses
CE	0	Altaneira	Vários	Arqueano sup-Prot. Inferior	Gnaisses
CE	-	Camocim	-	-	-
CE	-	Aracati	-	-	-
CE	+	Antonina do Norte	Vários	Arqueano sup-Prot. Inferior	Gnaisses
CE	/0	Araçoiaba	Vários	Proterozóico inferior	Micaxisto
CE	+	Arneiroz	Recanto	Arqueano sup-Prot. Inferior	Gnaisses
CE	/0	Aurora	Vários	Proterozóico inferior	Gnaisses
CE	*	Barbalha	Vários	Cretáceo inferior	-
CE	/0	Baturite	Vários	Arqueano sup-Prot. Inferior	Gnaisses
CE	+	Boa Viagem	Vários	Proterozóico inferior	Micaxistos
CE	0	Cachoeira dos Índios	Vários	Juracretáceo	Gnaisses/Folhelhos

...Tabela 19

CE	0	Canindé	Vários	Arqueano superior	Gnaisses
CE	/0	Capistrano	Cajazeiras	Arqueano sup-Prot. Inferior	Gnaisses
CE	0	Caridade	Carnaubinha	Arqueano sup-Prot. Inferior	Gnaisses
CE	+	Carius	Vários	Arqueano sup-Prot. Inferior	Gnaisses, migmatitos
CE	-	Carire	-	-	-
CE	-	Groairas			
CE	0	Cascavel	Pitombeiras/Faz. Juca	Arqueano sup-Prot. Inferior	Migmatito
CE	-	General Sampaio	-	-	-
CE	+	Catarina	Lagoa Seca	Proterozóico inferior	Xistos
CE	/0	Caucaia	Vários	Arqueano sup-Prot. Inferior	Gnaisses
CE	+	Cedro	Vários	Arqueano sup-Prot. Inferior	Gnaisses
CE	0	Coreau	Vários	Proterozóico superior	Gnaisses
VE	-	Forquilha	-	-	-
CE	+	Crateus	Irapuá de Cima	Arqueano sup-Prot. Inferior	Gnaisses, migmatitos
CE	+	Crato	Sítio Romualdo	Cretáceo inferior	Rochas carbonáticas
CE	0	Farias Brito	Vários	Arqueano sup-Prot. Inferior	Gnaisses
CE	0	Frecheirinha	Vários	Proterozóico superior	-
CE	+	Granja	Vários	Arqueano	Migmatito
CE	+	Granjeiro	Riacho Seco	Arqueano sup-Prot. Inferior	Gnaisses
CE	/0	Ibicutinga	Açude Moça Branca	Arqueano sup-Prot. Inferior	Micaxistos
CE	+	Icó	Sítio Saco	Proterozóico inferior	Gnaisses
CE	+	Independência	Vários	Arqueano sup-Prot. Inferior	Gnaisses, migmatitos
CE	+	Ipaumirim	Vários	Proterozóico inferior	Gnaisses
CE	0	Ipu	Vários	Arqueano superior	Gnaisses
CE	-	Iracema	-	-	-
CE	+	Iraucuba	Vários	Arqueano superior	Gnaisses
CE	+	Itapagé	Vários	Arqueano superior	Gnaisses, quartzitos
CE	/0	Itapiuna	Serrote Preto	Arqueano sup-Prot. Inferior	Gnaisses
CE	/0	Itatira	Vários	Arqueano sup-Prot. Inferior	Micaxisto, gnaisses, migmatitos
CE	+	Jaguaribe	Varginha	Proterozóico inferior	Gnaisses

...Tabela 19

CE	/0	Jaguaruana	Vários	Cretáceo	Calcarenito
CE	-	Jucas	-	-	-
CE	/0	Lavras da Mangabeira	Vários	Proterozóico inferior	Gnaisses
CE	0	Limoeiro do Norte	Vários	-	-
CE	*	Madalena	Vários	Précambriano superior	Micaxistos
CE	0	Maranguape	Vários	Arqueano sup-Prot. Inferior	Gnaisses, micaxistos
CE	+	Martinopole	Jenipapeiro	Proterozóico médio	Metapelitos
CE	-	Missão Velha	-	-	-
CE	+	Massape	Açude Apurina	Arqueano superior	Quartzito
CE	+	Mombaça	Vários	Proterozóico inferior	Migmatitos
CE	/0	Monsenhor Tabosa	Jacampari	Proterozóico inferior	Micaxistos
CE	/0	Morada Nova	Sítio Mutamba	Arqueano sup-Prot. Inferior	Migmatitos
CE	0	Nova Olinda	Sítio Pedra Branca	Cretáceo inferior	Rochas carbonáticas
CE	*	Nova Russas	Vários	Arqueano superior	Migmatitos
CE	*	Novo Oriente	Vários	Proterozóico inferior	Xistos, filitos
CE	+	Olho d'água dos Borges	Faz. Brejo	Arqueano superior	Granito gnaissíco
CE	+	Orós	Alencar	Proterozóico inferior	Xistos
CE	/0	Pacatuba	Curralinho	Arqueano sup-Prot. Inferior	Gnaisses
CE	/0	Pacoti	Gameleira	Arqueano sup-Prot. Inferior	Gnaisses
CE	*	Parambu	Casemiro	Proterozóico inferior	Gnaisses
CE	+	Pentecoste	Vários	Arqueano superior	Quartzitos
CE	-	Pereiro	-	-	-
CE	+	Quixadá	Vários	Arqueano sup-Prot. Inferior	Gnaisses
CE	*	Quixeramobim	Vários	Précambriano superior	Micaxistos
CE	0	Quixerê	Vários	Cretáceo	-
CE	0	Redenção	Cantagalo/Umari	Proterozóico inferior	Gnaisses, migmatitos
CE	/0	S Gonçalo do Amarante	Lagoa da Rodela	Arqueano sup-Prot. Inferior	Migmatitos
CE	+	Saboeiro	Sítio Melancia	Proterozóico inferior	Micaxisto
CE	*	Santa Quitéria	Vários	Arqueano superior	Gnaisses
CE	/0	Santana do Caririr	Vários	Cretáceo inferior	Rochas carbonáticas

...Tabela 19

CE	+	Senador Pompeu	Cócia	Arqueano sup-Prot. Inferior	-
CE	*	Sobral	Vários	Proterozóico superior	Gnaisses
CE	+	Solonópole	Faz. Palermo	Arqueano superior	Gnaisses
CE	-	Tabuleiro do Norte <sup>0</sup>	-	-	-
CE	-	Ubajara	-	-	-
CE	+	Tauá	Cipó/Limão	Arqueano sup-Prot. Inferior	Gnaisses, migmatitos
CE	+	Umari	Vários	Proterozóico médio	Gnaisses
CE	*	Umarizal	Faz. Milena	-	-
CE	+	Uruburetama	Vários	Arqueano superior	Quartzitos
DF	0	Brasília	Pedr. Caparão/M. Canastra	Proterozóico superior	Margas
ES		Anchieta	-	-	-
ES		Aracruz	-	-	-
ES		Atilio Vivacqua	-	-	-
ES		Cachoeiro Itapemirim	-	-	-
ES		Castelo	-	-	-
ES		Guarapari	-	-	-
ES		Mimoso do Sul	-	-	-
GO	-	Alto Paraíso de Goiás	-	-	-
GO	-	Alvorada do Norte	-	-	-
GO	-	Amorinópolis	-	-	-
GO	-	Anicuns	-	-	-
GO	+	Arraias	Faz. Formosa/Água Boa	Proterozóico superior	Metargilitos
GO	-	Aurora do Norte	-	-	-
GO	-	Barro Alto	-	-	-
GO	-	Cabeceiras	-	-	-
GO	-	Caiapônia	-	-	-
GO		Caldas Novas	-	-	-
GO	+	Campos Belos	Campos Belos	Proterozóico superior	Dolomitos - Grupo Bambuí
GO	-	Cavalcante	-	-	-
GO	+	Cocalzinho	-	-	-

...Tabela 19

GO	-	Corumbá de Goiás	-	-	-
GO	0	Cristalina	Ribeirão dos Bagres	Proterozóico médio	
GO	-	Cristianópolis	-	-	-
GO	+	Duerê	Rio Duerê	Proterozóico médio	Mármore
GO	-	Edéia	-	-	-
GO	+	Formosa	Vários	Proterozóico superior	Metassedimentos
GO	*	Formoso	Vários	Pm	Metapsamopelitos
GO	-	Goianésia	-	-	-
GO	-	Goiás	-	-	-
GO	-	Goiatins	-	-	-
GO	-	Guarani de Goiás	-	-	-
GO	-	Indiara	-	-	-
GO	-	Ipameri	-	-	-
GO	-	Itaberaí	-	-	-
GO	+	Itapaci	Vários	Arqueano	Rochas calco-silicáticas
GO	-	Jandaia	-	-	-
GO	-	Jataí	-	-	-
GO	-	Mara Rosa	-	-	-
GO	+	Minaçu	Vários	Proterozóico médio	Metapsamopelitos
GO	-	Mineiros	-	-	-
GO	-	Mutunópolis	-	-	-
GO	-	Natividade	-	-	-
GO	-	Nazário	-	-	-
GO	-	Niquelândia	-	-	-
GO	-	Nova Roma	-	-	-
GO	+	Padre Bernardo	Faz. Colônia/Sta Maria	Proterozóico superior	Mármore
GO	-	Palmeiras de Goiás	-	-	-
GO	-	Palmeirópolis	-	-	-
GO	+	Paraná	Bacia do Rio das Pedras	Proterozóico médio	Metargilitos
GO	-	Peixe	-	-	-

...Tabela 19

GO	/0	Piranhas	Vila Maria	Arqueano superior	Dolomito
GO	+	Pirenópolis	Córrego Mato Seco	Proterozóico médio	-
GO	*	Planaltina	Vários	Proterozóico superior	Ardósias -Fm Salinas
GO	-	Ponte Alta Bom Jesus			
GO	-	Portolândia	-	-	-
GO	-	Posse	-	-	-
GO	-	Rio Verde	-	-	-
GO	+	São Domingos	Rio Capivara	Proterozóico superior	-
GO	-	São Gabriel de Goiás	-	-	-
GO	+	São João D'Aliança	Vários	Proterozóico superior	Metassedimentos
GO	-	Silvânia	-	-	-
GO	-	Uruaçu	-	-	-
GO	-	Vianópolis	-	-	-
GO	+	Xambóia	Xambóia	Proterozóico médio	Grupo Estrondo
MA	-	Balsas	-	-	-
MA	-	Barra da Corda	-	-	-
MA	-	Benedito Leite	-	-	-
MA	-	Brejo	-	-	-
MA	-	Buriti Bravo	-	-	-
MA	-	Caxias	-	-	-
MA	-	Codó	-	-	-
MA	-	Governador Archer	-	-	-
MA	-	Grajaú	-	-	-
MA	-	Humberto Campos	-	-	-
MA	-	Icatú	-	-	-
MA	-	Imperatriz	-	-	-
MA	-	Magalhães	-	-	-
MA	-	Marinzal	-	-	-
MA	-	Monção	-	-	-
MA	-	Paço do Lumiar	-	-	-

...Tabela 19

MA	-	Passagem Franca	-	-	-
MA	-	Porto Franco	-	-	-
MA	-	Presidente Dutra	-	-	-
MA	-	Riachão	-	-	-
MA	-	Ribamar	-	-	-
MA	-	S Francisco Maranhão	-	-	-
MA	-	Sambaíba	-	-	-
MA	-	São Bernardo	-	-	-
MA	-	Timon	-	-	-
MG	-	Abaeté	-	-	-
MG	0	Alpinópolis	Alpinópolis	Proterozóico superior	-
MG	+	Araçuaí	Eng. Schnoor	Proterozóico	-
MG	-	Araguari	-	-	-
MG	*	Arcos	Vários	Proterozóico superior	-
MG	-	Arinos	-	-	-
MG	-	Baldim	-	-	-
MG	*	Bambuí	Vários	Proterozóico superior	-
MG	-	Barão dos Cocais	-	-	-
MG	+	Barbacena	Pinheiros	Proterozóico médio	-
MG	0	Barroso	Vários	Proterozóico médio	Xistos, filitos
MG	-	Belmiro Braga	-	-	-
MG	-	Betim	-	-	-
MG	+	Boa Esperança	Rib. Marimbondo	Proterozóico médio	Calcoxisto
MG	-	Bocaiúva	-	-	-
MG	-	Bom Despacho	-	-	-
MG	-	Bom Jesus do Norte	-	-	-
MG	0	Bonfinópolis de Minas	Vários	Proterozóico superior	Sequência carbonática
MG	-	Bonsucesso	-	-	-
MG	-	Brasília de Minas	-	-	-
MG	-	Brumadinho	-	-	-

...Tabela 17

SE	-	Riachuelo	-	-	-
SP	-	Bananal	Arapeí	-	-
SP	-	Barra do Turvo	-	-	-
SP	-	Cajamar	-	-	-
SP	-	Campos de Jordão	-	-	-
SP	-	Capão Bonito	-	-	-
SP	0	Conchas	-	Permeano	Folhelhos
SP	-	Cruzeiro	-	-	-
SP	0	Guapiara	Bairro Elias/Rio das Pedras	Proterozóico superior	Metassedimentos, calcoxistos
SP	-	Guapiara	-	-	-
SP	0	Ipeuna	Caieiras	Permeano	Folhelhos
SP	-	Ipiranga	Ribeirão Itacolomi	Proterozóico médio-superior	Quartzito, metavulcânicas
SP	/0	Itapeva	Bairro Caviuna/Sítio Salto	Proterozóico médio-superior	Metassedimentos
SP	0	Itararé	Vários	Proterozóico médio	Metassedimentos
SP	0	Jacupiranga	-	Arqueano	Metassedimentos
SP	-	Juquiá	Vários	Proterozóico médio	Migmatitos
SP	0	Laranjal Paulista	Vários	Permeano	Folhelhos, siltitos e argilitos
SP	0	Limeira	Faz. São Bento	Permeano	Folhelhos, siltitos e argilitos
SP	-	Louveira	-	-	-
SP	+	Miracatu	Vários	Arqueano-Proterozóico inf.	Migmatitos
SP	0	Mombuca	São João	Permeano	Folhelhos, siltitos e argilitos
SP	0	Pariquera-Açu	Bairro XV de Novembro	Proterozóico médio-inferior	Quartzo-micaxistos
SP	0	Pereiras	-	Permeano	Metassedimentos
SP	-	Pinamonhangaba	-	-	-
SP	0	Piracicaba	Vários	Permeano	Folhelhos, siltitos e argilitos
SP	0	Pirapora do Bom Jesus	Vários	Proterozóico médio-superior	Metassedimentos
SP	0	Ribeirão Branco	Faz. Luz da Penha	Proterozóico médio	Metassedimentos
SP	0	Rio Claro	Assistência e arredores	Permeano	Folhelhos, siltitos e argilitos
SP	0	Rio das Pedras	Saltinho	Permeano	Folhelhos, siltitos e argilitos
SP	-	Salto do Pirapora	-	-	-

...Tabela 19

MG	+	Buenópolis	Faz. Roçado do Tamboril	Proterozóico superior	Siltitos
MG	+	Buritis	Vários	Proterozóico superior	Ardósias
MG	0	Caetanópolis	Faz. Contra	Proterozóico superior	Ardósias, mármore
MG	-	Campestre	-	-	-
MG	0	Campo Belo	Tigre	Proterozóico médio	-
MG	-	Campos Altos	-	-	-
MG	+	Campos Gerais	Rib. do Sapé	Proterozóico superior	-
MG	0	Candeias	Ponte Grande	Proterozóico superior	-
MG	0	Capão Bonito	-	-	-
MG	*	Capim Branco	Vários	Proterozóico superior	Calcarenito, cacisiltitos
MG	/0	Capitão Enéas	São J. do Ermo	Proterozóico superior	-
MG	-	Caranaíba	-	-	-
MG	0	Carandaí	Vários	Proterozóico inferior	Filito, itabirito, dolomito
MG	-	Carmo do Paranaíba	-	-	-
MG	-	Carmo do Rio Claro	-	-	-
MG	-	Cassiterita	-	-	-
MG	-	Cataguases	-	-	-
MG	/0	Claro das Poções	-	Proterozóico superior	-
MG	-	Conc. do Mato Dentro	-	-	-
MG	+	Conceição da Aparecida	Serra da Cachoeira	Proterozóico superior	Calcoxisto, quartzito
MG	-	Congonhas	-	-	-
MG	0	Congonhas do Campo	-	-	-
MG	0	Conquista	Vários	Cretáceo	Arenitos
MG	-	Conselheiro Pena	-	-	-
MG	-	Corinto	-	-	-
MG	-	Coromandel	Vários	-	Ardósia
MG	0	Córrego D'Anta	Vários	Proterozóico médio	-
MG	-	Cristais	-	-	-
MG	*	Curvelo	Vários	Proterozóico superior	Carste coberto c/ mat. inconsol.
MG	-	Delfim Moreira	-	-	-

...Tabela 19

MG	0	João Pinheiro	Vários	Proterozóico superior	Sequência pelito-carbonática
MG	+	Joaquim Felício	Morro do Capim	Proterozóico superior	-
MG		Lagamar	Matinha	Proterozóico superior	Filitos, ardósias
MG	*	Lagoa da Prata	Caiçara/Faz. Catingueiro	Proterozóico superior	-
MG	*	Lagoa Santa	Vários	Proterozóico superior	Calcarenito, cacisiltitos
MG	+	Lassance	-	Proterozóico superior	-
MG	+	Lavras	Serra da Bocaina	Proterozóico médio	Micaxisto, quartzito
MG	-	Leandro Ferreira	-	-	-
MG	-	Luz	-	-	-
MG	-	Manga	-	-	-
MG	-	Mar de Espanha	-	-	-
MG	+	Mariana	Antônio Pereira	-	Calcário magnesiano
MG	-	Martinho Campos	-	-	-
MG	-	Mateus Leme	-	-	-
MG	*	Matosinhos	Vários	Proterozóico superior	Calcarenito, cacisiltitos
MG	-	Matutina	-	-	-
MG	+	Minas Novas	Rio Capivari	Proterozóico	-
MG	+	Missões	Morrinhos	Proterozóico superior	Calcários oolíticos
MG	0	Moema	Vários	Proterozóico superior	-
MG	-	Monjolos	-	-	-
MG	-	Monsenhor Paulo	-	-	-
MG	-	Montalvânia	-	-	-
MG	-	Monte Alegre de Minas	-	-	-
MG	*	Montes Claros	Vários	-	-
MG	*	Morada Nova de Minas	Vários	Proterozóico superior	Metapelitos calcíferos
MG	-	Nepomuceno	-	-	-
MG	-	Onça do Pitangui	-	-	-
MG	-	Ouro Branco	-	-	-
MG	0	Ouro Preto	Vários	Proterozóico inferior	Filitos, itabirito, dolomito
MG	+	Pains	Vários	Proterozóico superior	-

...Tabela 19

MG	-	Diamantina	-	-	-
MG	-	Divisa Nova	-	-	-
MG	*	Dom Cavati	Vale do Cór. Areia Preta	Arqueano	Gnaisse
MG	-	Dores do Campo	-	-	-
MG	-	Dores do Indaiá	-	-	-
MG	0	Doresópolis	Bagre	Proterozóico superior	-
MG	-	Elvas	-	-	-
MG	/0	Engenheiro Navarro	Eng. Navarro	Proterozóico superior	-
MG	+	Felixlândia	Vários	Proterozóico superior	Arenito, siltito, fósforo, dolomito
MG	-	Fernando Pais	-	-	-
MG	*	Formiga	Vários	Proterozóico superior	-
MG	+	Formoso	Vários	Proterozóico superior	Ardósias
MG	-	Fortaleza de Minas	-	-	-
MG	+	Francisco de Sá	Rib. Água Quente	Proterozóico superior	-
MG	-	Funilândia	-	-	-
MG	-	Gouvea	-	-	-
MG	-	Guimarânia	-	-	-
MG	*	Iguatema	Vários	Proterozóico superior	Siltitos, calcários oolíticos
MG	+	Ijaci	Vários	Proterozóico médio	Quartzito, filitos
MG	-	Ingaí	-	-	-
MG	-	Inhapim	-	-	-
MG	0	Ipero	Felicíssimo/Ipanema	pm-s	Filitos
MG	-	Itabirito	-	-	-
MG	-	Itacarambi	-	-	-
MG	-	Itaú de Minas	-	-	-
MG	+	Itumirim	Pedra Santo Antônio	Proterozóico médio	-
MG	*	Jaboticatubas	Vários	Proterozóico superior	-
MG	-	Jacuí	-	-	-
MG	-	Janaúbas	-	-	-
MG	-	Januária	-	-	-

...Tabela 19

MG		Paracatu	Tamanduá	Proterozóico superior	Folhelhos, filitos
MG	*	Paraopeba	Vários	Proterozóico superior	Siltitos, folhelhos, arenitos
MG	+	Passos	Vários	Proterozóico médio	Quartzitos, xistos
MG	*	Patos de Minas	Vários	Proterozóico superior	-
MG	*	Pedro Leopoldo	Vários	Proterozóico superior	Calcarenito, cacisiltitos, margas
MG	-	Pimenta	-	-	-
MG	-	Piranguaçu	-	-	-
MG	-	Piraúba	-	-	-
MG	0	Pitangui	Várzea do Menino	Proterozóico superior	-
MG	-	Piui	-	-	-
MG	-	Pompeu	-	-	-
MG	/0	Pote	Pote	Arqueano inferior	Biotita-gnaisse
MG	+	Prados	Maria Gomes/Laranjeiras	Proterozóico médio	Micaxistos
MG	+	Pratapolis	Vários	Proterozóico médio	Quartzitos, xistos
MG	-	Presidente Juscelino	-	-	-
MG	+	Presidente Olegário	Vários	Proterozóico superior	Ardósias, filitos
MG	*	Prudente de Moraes	Vários	Proterozóico superior	Calcarenito, cacisiltitos
MG	-	Quartel Geral	-	-	-
MG	-	Rio Paranaíba	-	-	-
MG	/0	Sabará	Segredo	Proterozóico inferior	Xistos, quartzitos
MG	-	Sacramento	-	-	-
MG	0	Salto do Pirapora	Vários	pm-s	Filitos
MG	0	Santa Bárbara	Faz. Bento de Oliveira	Proterozóico inferior	-
MG	0	Santa Fé de Minas	Vários	Proterozóico superior	Sequência pelito-carbonática
MG	-	Santa Luzia	-	-	-
MG	-	Santa Rosa da Serra	-	-	-
MG	-	Santana do Deserto	-	-	-
MG	/0	Santana do Parnaíba	Vau Novo/Rib. dos Pereiras	pm-s	Filitos
Mg	-	Santana do Riacho	-	-	-
MG	-	Santo Hipólito	-	-	-

...Tabela 19

MG	0	São Francisco	Vários	Proterozóico superior	Sequência pelito-carbonática
MG	-	São Gotardo	-	-	-
MG	0	São João Del Rey	Vários	Proterozóico médio	Micaxistos, xistos
MG	0	São Romão	Vários	Proterozóico superior	Sequência pelito-carbonática
MG	-	Senador Cortes	-	-	-
MG	*	Sete Lagoas	Vários	Proterozóico superior	Calcarenito, cacisiltitos
MG	-	St Antônio Aventureiro	-	-	-
MG	/0	Taquaraçu de Minas	Faz. Sumidouro	Proterozóico superior	Filito calcífero, granito
MG	-	Tiradentes	-	-	-
MG	-	Tiros	-	-	-
MG	-	Três Marias	-	-	-
MG	+	Tumiritinga	Vários	Précambriano	-
MG	-	Turmalina	-	-	-
MG	0	Uberaba	Vários	Cretáceo	Arenitos
MG	0	Unai	Vários	Proterozóico superior	Siltitos, ardósias
MG	-	Várzea da Palma	-	-	Calcários e/ou dolomitos
MG	-	Varzelândia	-	-	-
MG	*	Vazante	Vários	Proterozóico superior	Folhelhos, filitos
MG	*	Vespasiano	Vários	Proterozóico superior	Calcarenito, cacisiltitos
MS	*	Bodoquena	Vários	Proterozóico médio	Rochas carbonáticas
MS	*	Bonito	Vários	Proterozóico médio	Rochas carbonáticas
MS	*	Corumbá	Vários		Rochas carbonáticas
MS	*	Miranda	Vários	Proterozóico médio	Rochas carbonáticas
MT	-	Água Boa	-	-	-
MT	-	Alta Floresta	-	-	-
MT	-	Alto Garças	-	-	-
MT	*	Alto Paraguai	Faz. Itaipu	Proterozóico superior	Dolomitos
MT	*	Barra do Bugre	Porto Estrela	Proterozóico médio	Dolomitos
MT	-	Barra do Garças	-	-	-
MT	*	Cáceres	Vários	Proterozóico médio	Dolomitos

...Tabela 19

MT	-	Cocalinho	-	-	-
MT	+	Cuiabá	F. Bandeirante/Cór. Gavião	Proterozóico médio	Filitos
MT	-	Guiratinga	-	-	-
MT	-	Itiquira	-	-	-
MT	+	Mirassol do Oeste	Sonho Azul	Proterozóico médio	Dolomitos
MT	0	N. Senhora Livramento	N. Senhora do Livramento	Proterozóico médio	Filitos
MT	*	Nobres	Vários	Proterozóico superior	Dolomitos
MT	*	Nossa Senhora da Guia	N. Senhora da Guia	Proterozóico superior	Dolomitos
MT	-	Nova Xavantina	-	-	-
MT	-	Paranatinga	-	-	-
MT	0	Poconé	Extr. Sul Folha SD21ZCIV	Proterozóico médio	Metarenitos, filitos
MT	-	Primavera do Leste	-	-	-
MT	*	Rosário Oeste	Vários	Proterozóico superior	Dolomitos
MT	-	São Félix do Araguaia	-	-	-
MT	-	Tangará da Serra	-	-	-
PA	-	Almerim	-	-	-
PA	-	Altamira	-	-	-
PA	*	Aveiro	Rio Tapajós	Quaternário-pleistoceno	Formação Itaituba
PA	-	Bonito	-	-	-
PA	-	Bragança	-	-	-
PA	+	Capanema	Vários	Terciário	Formação Pirabas
PA	-	Capitão Poço	-	-	-
PA	-	Faro	-	-	-
PA	-	Itaituba	-	-	-
PA	+	Itupiranga	Igarapé Lago Vermelho	Permeano	Pelitos, arenitos
PA	+	Marabá	Vários	Permeano	Pelitos
PA	-	Maracanã	-	-	-
PA	-	Medicilândia	-	-	-
PA	*	Monte Alegre	Col. Mulata	-	-
PA	+	Oriximã	Reserva Biol Rio Trombetas	Permocarbonífero	-

...Tabela 19

PA	+	Peixe Boi Bonito	-	Terciário	Formação Pirabas
PA	+	Prainha	Vários	Permocarbonífero	Formação Itaituba
PA	-	Primavera	-	-	-
PA	-	Salinópolis	-	-	-
PA	-	Santa Isabel do Pará	-	-	-
PA	-	Santana do Araguaia	-	-	-
PA	-	São João do Araguaia	-	-	-
PA	-	Senador José Porfírio	-	-	-
PA	-	Timboteva	-	-	-
PB	*	Alhandra	Vários	Cretáceo	Arenitos
PB	/0	Barra de São Miguel	Boi Bravo	Arqueano	Gnaisses
PB	+	Belém do Brejo da Cruz	Estreito/Emas	Proterozóico inferior	Gnaisse, calcário anfibolítico
PB	+0	Boqueirão	Vários	Proterozóico inferior	Biotita-gnaisses, migmatitos
PB	0	Caaporá	Faz. Tabu	Terciário-quaternário	Arenitos, argilas
PB	*	Cabaceiras	Cabeça do Boi	Proterozóico inferior	Gnaisses
PB	*	Cacimba de Areia	Vários	Proterozóico médio	Biotita-gnaisse
PB	/0	Cajazeiras	Vários	Proterozóico inferior	Gnaisses, migmatitos
PB	*	Camalau	Vários	Arqueano	Gnaisses
PB	+	Campina Grande	Vários	Proterozóico inferior	Biotita-gnaisse
PB	/0	Conceição	Sítio Saco do Retiro	Proterozóico inferior	Gnaisses, migmatitos
PB	0	Conde	Vários	Terciário-quaternário	Arenitos
PB	*	Congo	Vários	Proterozóico médio	Gnaisses
PB	*	Esperança	Caieira	Proterozóico inferior	Gnaisses, migmatitos
PB	/0	Fagundes	Sítio Jacaré	Arqueano	Migmatitos
PB	+	Frei Martinho	Timbaúba	Proterozóico médio	Gnaisses, skarn
PB	+	Gurjão	Riacho do Estevão	Proterozóico inferior	Biotita-gnaisse
PB	-	Itabaiana	-	-	Calcários e/ou dolomitos
PB	*	Jacoca	Jacoca	Terciário-quaternário	Arenitos argilosos
PB	0	João Pessoa	Vários	Terciário-quaternário	Sedimentos arenosos
PB	+	Livramento	Bom Nome	Proterozóico inferior	Gnaisses

...Tabela 19

PB	-	Manaira	-	-	-
PB	+	Monteiro	Vários	Proterozóico inferior	Gnaisses, migmatitos
PB	/0	Natuba	Sítio Mimoso	Proterozóico inferior	Gnaisses, migmatitos
PB	+	Ouro Velho	Sítio Dependência	Proterozóico inferior	Gnaisses
PB	-	Passagem	-	-	-
PB	+	Patos	Sit Onça/Ser Negra/Viaduto	Proterozóico inferior	Biotita-gnaisses
PB	-	Pedra Lavrada	-	-	-
PB	/0	Pianco	Vários	Proterozóico inferior	Gnaisses, migmatitos
PB	-	Pilar	-	-	Calcários e/ou dolomitos
PB	-	Pitimbu	-	-	-
PB	*	Pocinhos	Lagoa do Mato	Proterozóico médio	Xisto
PB	/0	Princesa Isabel	Sítio Minas/Piauí	Proterozóico médio	Xistos, filitos
PB	/0	Queimadas	Gravata	Arqueano	Migmatitos
PB	-	Rio Tinto	-	-	-
PB	0	S. Sebastião Umbuzeiro	Vários	Proterozóico médio	Gnaisses
PB	+	Salgadinho	Salgadinho	Proterozóico inferior	Quartzitos
PB	*	Salgado do São Félix	Vários	Arqueano-Proterozóico inf.	Migmatitos, gnaisses
PB	/0	Santa Luízia	Vários	Proterozóico médio	Gnaisses
PB	-	Santa Rita	-	-	-
PB	/0	São Bento	Riacho dos Currais	Proterozóico inferior	Gnaisses
PB	+	São João do Cariri	Santa Clara	Arqueano-Proterozóico inf.	Gnaisses
PB	-	São João do Tigre	-	-	-
PB	0	São José das Piranhas	Caieira Caldeirão	Proterozóico inferior	Gnaisses, migmatitos
PB	/0	São José dos Cordeiros	Vários	Proterozóico inferior	Gnaisses
PB	+	São Mamede	Cachoeira Rocha	Proterozóico médio	Biotita-gnaisse
PB	+	Soledade	Curral da Pedra/Xique-xique	Proterozóico inferior	Gnaisses
PB	-	Tabaiana	-	-	Calcários e/ou dolomitos
PB	/0	Taperoa	Vários	Proterozóico inferior	Gnaisses
PB	+	Taquaritinga do Norte	Grude	Proterozóico inferior	Migmatitos
PB	0	Uirauna	Vários	Proterozóico médio	Gnaisses

...Tabela 19

PB	0	Umbuzeiro	Vários	Proterozóico médio	Gnaisses
PE	+	Abreu Lima	Vários	Cretáceo, terciário-quatern	Arenitos, fosfato, caulim
PE	*	Afogados da Ingazeira	Vários	Proterozóico inferior	Gnaisses, migmatitos
PE	+	Águas Belas	Vários	Proterozóico	Granitos
PE	+	Airi	Gangorra	Proterozóico inferior	Gnaisses
PE	+	Altinho	Faz. Demarcação/Moço	Arqueano	Migmatitos
PE	+	Araripina	Vários	Arqueano Sup/Proteroz. Inf	Gnaisses
PE	+	Arcoverde	Riacho Seco	Proterozóico inferior	Gnaisses
PE	/0	Belém de São Francisco	Vários	Proterozóico inferior	Migmatitos
PE	+	Betânia	Pedra Furada	Proterozóico inferior	Gnaisses
PE	-	Bezerro	-	-	Calcários e/ou dolomitos
PE	+	Bodoco	Barro	Proterozóico inferior	Gnaisse, migmatito, xistos
PE	+	Brejo da Madre de Deus	Vários	Proterozóico médio	Gnaisses
PE	-	Buriti dos Lopes	-	-	Calcários e/ou dolomitos
PE	0	Camutanga	Vários	Proterozóico inferior	Gnaisses, migmatitos
PE	0	Carnaíba	Vários	Proterozóico inferior	Gnaisses, migmatitos
PE	/0	Custódia	Vários	Proterozóico inferior	Gnaisses
PE	0	Flores	Vários	Proterozóico inferior	Gnaisses, migmatitos
PE	*	Floresta	Vários	Proterozóico inferior	Migmatitos, gnaisses
PE	/0	Frei Miguelinho	Alto do Cal	Arqueano	Migmatitos
PE	*	Goiana	Vários	Cretáceo, terciário-quatern	Arenitos, fosfato, caulim
PE	-	Gravatá	-	-	-
PE	0	Ibimirim	Vários	Proterozóico inferior /Cretáceo	Micaxistos/Siltitos
PE	0	Igarassu	Vários	Cretáceo, terciário-quatern	Arenitos, fosfato, caulim
PE	+	Iguaraci	Vários	Proterozóico inferior	Gnaisses, migmatitos
PE	+	Ingazeira	Brejinho	Proterozóico inferior	Migmatitos
PE	/0	Ipojuca	Vários	-	-
PE	+	Itacuruba	Boa Sorte	Proterozóico inferior	Migmatitos
PE	0	Itamaracá	Vários	Terciário-Quaternário	Arenitos, argilas
PE	+	Itapetim	Vários	Proterozóico inferior	Gnaisses

...Tabela 19

PE	+	Jutaí	Vários	Proterozóico médio	Micaxistos
PE	-	Lagoa de Ouro	-	-	-
PE	*	Mirandiba	Vários	Proterozóico médio	Xistos
PE	/0	Olinda	Fragoso/Sapucaia	Cretáceo, terciário-quadern	Arenitos, fosfato, caulim
PE	+	Ouricuri	Vários	Proterozóico médio	Micaxistos, complexo orto-gnaisse
PE	-	Paraníba	-	-	-
PE	+	Panamirim	Vários	Proterozóico inferior	Gnaisses, micaxistos
PE	/0	Paulista	Vários	Cretáceo, terciário-quadern	Arenitos, fosfato, caulim
PE	+	Paulistana	Vários	Proterozóico médio	Xistos
PE	+	Pedra	Vários	Arqueano	Migmatitos
PE	+	Petrolândia	Vários	Cretáceo	Arenitos, siltitos
PE	0	Petrolina	Vários	Proterozóico médio	Xistos, quartzitos
PE	-	Riacho das Almas	-	-	-
PE	-	Rio Formoso	-	-	-
PE	/0	Salgueiro	Vários	Proterozóico inferior	Gnaisse
PE	+	Santa Terezinha	Sítio Caieira/ Tigre	Proterozóico inferior	Migmatitos
PE	/0	São Caetano	Vários	Arqueano	Migmatitos granito
PE	/0	São José do Belmonte	Serra da Caieira	Proterozóico inferior	Filitos, clorita-xistos
PE	+	São José do Egito	Cachoeirinha	Proterozóico inferior	Gnaisses
PE	+	Serra Talhada	Varginha	Proterozóico inferior	Gnaisses
PE	*	Sertania	Vários	Proterozóico inferior	Xistos, gnaisses
PE	-	Sta Maria de Cambuca	-	-	-
PE	+	Surubim	Gamba	Proterozóico médio	Gnaisses
PE	-	Tacaratu	-	-	-
PE	-	També	-	-	-
PE	+	Timbauba	Timbauba	Proterozóico inferior	Migmatitos
PE	+	Tuparetama	Serrinha	Proterozóico inferior	Migmatitos, gnaisses
PI	-	Antônio Almeida	-	-	-
PI	-	Barro Duro	-	-	-
PI	-	Berengas	-	-	-

...Tabela 19

PI	0	Buriti dos Lopes	Vários	Terc-Quatern/Devoniano	Rocha Sedimentar
PI	+	Caracol	Vários	Arqueano sup - Prot. Inferior	Migmatitos
PI	+	Cocal	Várzea	Terc-Quatern/Devoniano	Rocha Sedimentar
PI	-	Conceição do Canindé	-	-	-
PI	-	Dirceu Arcoverde	-	-	-
PI	+	Dom Inocêncio	Faz. Angelical	Proterozóico médio	Xistos, granitos
PI	-	Fronteiras	-	-	-
PI	-	José de Freitas	-	-	-
PI	0	Paranaíba	Lama Preta	Terc-quaternário	Argilitos
PI	*	Paulistana	Vários	Proterozóico inferior	Gnaisses
PI	+	Pio IX	Vários	Proterozóico superior	Dolomitos
PI	-	Santa Filomena	-	-	-
PI	-	São Julião	-	-	-
PI	+	São Raimundo Nonato	Vários	Proterozóico médio	Micaxistos
PI	+	Simões	Faz. Várzea	Cretáceo	Arenitos
PI	-	Urucui	-	-	-
PI	-	Várzea Grande	-	-	-
PR	-	Adrianópolis	-	-	-
PR	*	Almirante Tamandaré	Morro Azul	Proterozóico superior	Dolomitos, metapelitos
PR	-	Araucária	-	-	-
PR	0	Balsa Nova	Faxina	Proterozóico	Filitos
PR	0	Bocaiúva do Sul	Vários	Proterozóico médio	Xistos, calcarenitos, talco
PR	0	Campo Grande	Retiro Grande	Proterozóico	Filitos
PR	*	Campo Largo	Vários	Proterozóico	Metasedimentos
PR	-	Candiso Abreu	-	-	-
PR	-	Cerro Azul	-	-	-
PR	-	Céu Azul	-	-	-
PR	0	Colombo	Vários	Proterozóico superior	Dolomitos, metapelitos
PR	-	Guaraqueçaba	-	-	-
PR	-	Ibaiti	-	-	-

...Tabela 19

PR	-	Imbuial	-	-	-
PR	-	Jaguariaiva	-	-	-
PR	-	Morretes	-	-	-
PR	-	Paranaguá	-	-	-
PR	-	Piraí do Sul	-	-	-
PR	-	Piraquara	-	-	-
PR	-	Pitangas	-	-	-
PR	*	Ponta Grossa	Vários	Proterozóico superior	Metasedimentos
PR	-	Quatiguá	-	-	Calcários e/ou dolomitos
PR	0	Rio Branco do Sul	Vários	Proterozóico superior	Dolomitos, quartzitos, calco-xisto
PR	-	São José dos Pinhais	-	-	-
PR	-	Sapopema	-	-	-
PR	-	Sengés	-	-	-
PR	-	Tijucas do Sul	-	-	-
PR	-	Timoneiras	-	-	-
PR	-	Tomazina	-	-	-
RJ	-	Angra dos Reis	-	-	-
RJ	-	Barra do Piraí	-	-	-
RJ	-	Barra Mansa	-	-	-
RJ	-	Cabo Frio	-	-	-
RJ	-	Cambuci	-	-	-
RJ	-	Campos	-	-	-
RJ	-	Cantagalo	-	-	-
RJ	-	Cordeiro	-	-	-
RJ	-	Itaboraí	-	-	-
RJ	-	Itaguaí	-	-	-
RJ	-	Italva	-	-	-
RJ	-	Itaocara	-	-	-
RJ	-	Itaperuna	-	-	-
RJ	-	Magé	-	-	-

...Tabela 19

RJ	-	Maricá	-	-	-
RJ	-	Marquês de Valença	-	-	-
RJ	-	Miguel Pereira	-	-	-
RJ	-	Monção	-	-	-
RJ	-	Paraíba do Sul	-	-	-
RJ	-	Piraí	-	-	-
RJ	-	Rezende	-	-	-
RJ	-	Rio Bonito	-	-	-
RJ	-	Rio de Janeiro	-	-	-
RJ	-	S Sebastião do Alto	-	-	-
RJ	-	São Fidélis	-	-	-
RJ	-	São Gonçalo	-	-	-
RJ	-	São Pedro da Aldeia	-	-	-
RJ	-	Saquarema	-	-	-
RJ	-	Tres Rios	-	-	-
RJ	-	Vassouras	-	-	-
RN	+	Acari	Córr. São Pedro	Proterozóico médio	Xistos, calcossilicáticas
RN	/0	Açu	Vários	Cretáceo superior	Gipsita
RN	/0	Afonso Bezerra	Vários	Cretáceo superior	Gipsita
RN	+	Almino Afonso	Vários	Proterozóico inferior	Gnaisse
RN	/0	Alto do Rodrigues	Vários	Cretáceo superior	-
RN	-	Apodi	-	-	-
RN	-	Areia Branca	-	-	-
RN	0	Augusto Severo	Vários	Proterozóico médio	Calcosilicáticas
RN	-	Barauna	-	-	-
RN	+	Barcelona	Poço do Serrote	Proterozóico inferior	Micaxistos, gnaisse
RN	+	Caicó	Vários	Proterozóico inferior	-
RN	+	Carnaúba dos Dantas	Logradouro	Proterozóico médio	Xistos, calcossilicáticas
RN	/0	Carnaubais	Vários	Cretáceo superior	Gipsita
RN	+	Carnaubas	Vários	Arqueano superior	Gnaisse

...Tabela 19

RN	+	Ceará Mirim	Marassanduba	Cretáceo superior	Margas
RN	-	Cerro Corá	-	-	
RN	+	Cruzeta	Bairro da Caieira	Proterozóico inferior	Gnaisse, migmatito
RN	+	Currais Novos	Vários	Proterozóico médio	Gnaisse, calcossilicáticas
RN	+	Equador	Vários	Proterozóico médio	Xisto c/ lentes de metacalcário
RN	-	Felipe Guerra	-	-	-
RN	+	Florania	Vários	Proterozóico médio	Metagrauvas, xistos
RN	0	Gov. Dix Sept Rosado	Vários	Cretáceo	Argilitos, gipsita
RN	-	Ipanguaçu	-	-	-
RN	+	Ipueira	Vários	Proterozóico médio	Gnaisses c/ lentes de metacalcário
RN	-	Jandaira	-	-	-
RN	+	Janduis	Faz. Açude Novo/Esplanada	Proterozóico médio	Gnaisses c/ lentes de metacalcário
RN	+	Jardim das Piranhas	Retiro II	Proterozóico inferior	Gnaisse, calcossilicáticas
RN	+	Jardim do Seridó	Vários	Proterozóico médio	Calcossilicáticas
RN	-	João Câmara	-	-	-
RN	+	Jucurutu	Vários	Proterozóico médio	Metagrauvas, granitos
RN	/0	Lajes	Queiroz	Proterozóico médio	Gnaisse
RN	-	Macau	-	-	-
RN	+	Martins	Lucrécia	Proterozóico inferior	Gnaisse
RN	+	Messias Targino	Vários	Proterozóico inferior	Gnaisse
RN	*	Mossoró	Vários	Cretáceo superior	Gipsita
RN	+	Nova Palmeira	Sítio Quixadá	Proterozóico médio	Xisto c/ lentes de metacalcário
RN	+	Olho d'água do Borge	Faz. Brejo	Proterozóico inferior	Gnaisse
RN	+	Ouro Branco	Vários	Proterozóico médio	Gnaisses c/ lentes de metacalcário
RN	+	Parau	Vários	Proterozóico	Gnaisses, metagrauvas, granito
RN	+	Parelhas	Vários	Proterozóico médio	Gnaisses c/ lentes de metacalcário
RN	/0	Pendências	Vários	Cretáceo superior	-
RN	0	Rafael Godeiro	Faz. Pedra d'água	Proterozóico inferior	Gnaisse
RN	+	Riacho do Santana	Sítio Pau	Proterozóico inferior	Gnaisse
RN	+	S Gonçalo do Amarante	Massaranduba	Cretáceo superior	Margas

...Tabela 19

RN	-	Santana do Seridó	-	-	-
RN	/0	Santana dos Matos	Jardim/Ferveadeira	Proterozóico	Gnaisse, migmatito
RN	/0	São José do Sabugi	Riacho de Fora	Proterozóico inferior	Gnaisse, migmatito
RN	+	São José do Seridó	Vários	Proterozóico médio	Gnaisse, calcossilicáticas
RN	+	São Rafael	Vários	Proterozóico médio	Metagrauvacas, granitos
RN	0	São Tomé	Vários	Proterozóico médio	Gnaisse, micaxisto
RN	+	São Vicente		Proterozóico médio	Metagrauvacas
RN	/0	São Vicente do Seridó	Vários	Proterozóico médio	Gnaisses c/ lentes de metacalcário
RN	+	Serra Negra do Norte	Faz. Riacho Fundo	Proterozóico inferior	Gnaisse, skarn
RN	+	Telmo Marinho	Faz. cabeça de Boi	Proterozóico inferior	Micaxistos, gnaisse
RN	+	Upanema	Upanema	Cretáceo superior	-
RN	+	Várzea da Caatinga	Pedra d'água	Proterozóico inferior	Gnaisse
RO	+	Costa Marques	Rio Antônio João	Siluriano-devoniano	Arenito
RO	0	Pimenta Bueno	Vários	Siluriano-devoniano	Arenito, folhelho
RO	+	Presidente Medici	Faz. 2 Jaci	Siluriano-devoniano	Arenito
RR	+	Boa Vista	Nova Olinda	Jurássico-cretáceo	Basaltos
RR	-	Bonfim	-	-	-
RR	-	Normandia	-	-	-
RS	*	Arroio Grande	Vários	Proterozóico superior	Ortognaisses
RS	*	Bagé	Vários	pm-s	Xistos, quartzitos
RS	-	Bonfim	-	-	-
RS	-	Butiá	-	-	-
RS	/0	Caçapava do Sul	Vários	pm-s	Xistos
RS	*	Cachoeira do Sul	Vários	pm-s	Xistos, gnaisse
RS	*	Dom Feliciano	Vários	Arqueano	Gnaisses
RS	*	Dom Pedrito	Vários	Arqueano/Permeano	Xisto, filito, quartzito/Folhelho
RS	/0	Encruzilhada do Sul	Vários	Arqueano	Xistos, gnaisses
RS	-	Frederico Westphalen	-	-	Calcita
RS	-	Gravataí	-	-	-
RS	-	Iraí	-	-	Calcita

...Tabela 19

RS	-	Lavras do Sul	-	-	-
RS	+	Mostardas	Lagoa das Mostardas	Quaternário-pleistoceno	Depósitos lagunares
RS	-	Pântano Grande	-	-	-
RS	*	Pedro Osório	Vários	Proterozóico superior	Ortognaisses
RS	+	Pelotas	Colônia Pescadores Z3	Quaternário-holoceno	Depósitos lagunares
RS	-	Pinheiro Machado	-	-	-
RS	-	Planalto	-	-	-
RS	+	Rio Pardo	Vários	Arqueano	Gnaisses
RS	-	Rodeio Bonito	-	-	Calcita
RS	*	Santana da Boa Vista	Vários	pm-s	Xistos
RS	*	São Gabriel	Vários	Arqueano/Permeano	Xisto, filito, quartzito/Folhelho
RS	+	São José do Norte	Capão das Cariocas	Quaternário-holoceno	Conchas em areias litorâneas
RS	0	São Sepé	Vários	Arqueano	Migmatitos
RS	*	Viamão	Morro da Grota	Proterozóico superior	Sienogranito
SC	*	Anitápolis	Alto do Rio Pinheiro	Cretáceo	Complexo ultramáfico cristalino
SC	*	Botuverá	Vários	Arqueano	Xistos, filitos
SC	-	Brusque	-	-	-
SC	+	Camboriu	Vários	Arqueano	Granito
SC	-	Canoinhas	-	-	-
SC	-	Imbituba	-	-	-
SC	-	Itaiópolis	-	-	-
SC	0	Itajaí	Cabeçudas	Arqueano	Micaxistos
SC	+	Itapema	Serra do Rio Pequeno	Arqueano	-
SC	-	Jaguaruna	-	-	-
SC	-	Lages	-	-	-
SC	-	Laguna	-	-	-
SC	-	Mafra	-	-	-
SC	-	Monte Castelo	-	-	-
SC	0	Nova Trento	Cerro da Caatinga	Arqueano	Xistos, filitos
SC	-	Orleans	-	-	-

...Tabela 19

SC	-	Papanduva	Nova Cultura	-	-
SC	-	Presidente Nereu Ramos	-	-	-
SC	-	Rio do Campo	-	-	-
SC	-	Salete	-	-	-
SC	-	Siderópolis	-	-	-
SC	-	Taio	-	-	-
SC	0	Tijucas	João daCosta/Rio do Meio	Arqueano	Xistos
SC	-	Treze de Maio	-	-	-
SC	/0	Vidal Ramos	Vários	Arqueano	Xistos, filitos
SE	*	Aracaju	Vários	Cretáceo superior	Folhelhos, arenitos
SE	-	Cotinguiba	-	-	-
SE	+	Itabaiana	F. R. dos Laços	Cretáceo inferior	-
SE	-	Lagarto	-	-	-
SE	*	Laranjeiras	Vários	Cretáceo superior	-
SE	-	Macambira	-	-	-
SE	*	Maruim	Vários	Cretáceo inferior	-
SE	*	Nossa Sra. do Socorro	Faz. Mucuri	Cretáceo superior	Calcarenitos, margas
SE	*	Pacatuba	Vários	Cretáceo inferior	-
SE	0	Pedra Mole	Vários	Proterozóico superior	-
SE	-	Pinhão	-	-	-
SE	+	Poço Redondo	Bonsucesso	Proterozóico	Metacarbonatos
SE	+	Porto da Folha	Vários	Proterozóico médio-inferior	Biotita xisto
SE	+	Riachuelo	Pedra Branca	Cretáceo inferior	-
SE	-	Rosário do Catete	-	-	-
SE	*	Simão Dias	Vários	Proterozóico superior	Filitos, metassedimentos
SE	*	Siriri	Castanhal	Cretáceo inferior	Anidrita, gipsita
SE	+	Sto Amaro das Brotas	Faz. Canabrava	Cretáceo inferior	Metassedimentos
SP	+	Apiá	Vários	Proterozóico superior	Metasedimentos
SP	-	Araçariguama	-	-	-
SP	-	Araçoiaba da Serra	-	-	-

...Tabela 19

SP	+	Araras	Faz. São José	Permeano	-
SP	-	Avaré	-	-	-
SP	0	Barra do Turvo	Cór. Lavras do Pedro	Proterozóico médio	Metassedimentos
SP	0	Cajamar	Vários	pm-s	Metassedimentos
SP	-	Cajuru	-	-	-
SP	-	Campos do Jordão	-	-	-
SP	-	Cananéia	-	-	-
SP	+	Capão Bonito	Capela do Alto	Proterozóico médio	Calco-xistos, quartzitos
SP	-	Capela do Alto	-	-	-
SP	-	Capivari	-	-	-
SP	-	Charqueada	-	-	-
SP	-	Cruzeiro	-	-	-
SP	-	Cubatão	-	-	-
SP	-	Cunha	-	-	-
SP	-	Eldorado	-	-	-
SP	0	Guapiara	Vários	Proterozóico superior	Metassedimentos
SP	-	Iguape	-	-	-
SP	-	Iperó	Bacaetava	-	-
SP	-	Ipeuna	-	-	-
SP	0	Iporanga	Vários	Proterozóico superior	Metassedimentos
SP	-	Itanhaem	-	-	-
SP	-	Itapetininga	-	-	-
SP	+	Itapeva	Vários	Proterozóico médio	Metassedimentos
SP	-	Itararé	-	-	-
SP	-	Jacupiranga	-	-	-
SP	-	Juquerí	-	-	-
SP	-	Laranjal Paulista	-	-	-
SP	-	Limeira	-	-	-
SP	0	Mairinque	Faz. Santojo/Santo Antônio	pm-s	Metassedimentos
SP	-	Miracatu	-	-	-

...Tabela 19

SP	-	Mombuca	-	-	-
SP	-	Paranapanema	-	-	-
SP	-	Pariquera-açu	-	-	-
SP	-	Pereiras	-	-	-
SP	-	Piedade	-	-	-
SP	-	Pinamonhangaba	-	-	-
SP	-	Piracicaba	-	-	-
SP	0	Pirapora do Bom Jesus	Vários	pm-s	Metassedimentos
SP	-	Porongaba	-	-	-
SP	0	Ribeira	Sít. Ribeira da Ilha	Cretáceo	Granito, sienito
SP	/0	Ribeirão Branco	Vários	Proterozóico médio	Metassedimentos
SP	-	Rio Claro	-	-	-
SP	-	Rio das Pedras	-	-	-
SP	-	Salto de Pirapora	-	-	-
SP	-	Santa Rosa do Viterbo	-	-	-
SP	-	Santana de Parnaíba	-	-	-
SP	-	Santos	-	-	-
SP	-	São Bento do Sapucaí	-	-	-
SP	-	São José do Barreiro	-	-	-
SP	-	São Luis do Paraitinga	-	-	-
SP	-	São Paulo	-	-	-
SP	-	São Pedro	-	-	-
SP	0	São Roque	Morro Ibaté/Água salgada	pm-s	Metassedimentos
SP	0	Sorocaba	Vários	pm-s	Metassedimentos
SP	-	Taguaí	-	-	-
SP	-	Tapiratiba	-	-	-
SP	0	Tatuí	Bairro Enxovia	pm-s	Metassedimentos
SP	-	Taubaté	-	-	-
SP	-	Tietê	-	-	-
SP	0	Votorantim	Ventania/F. Santa Maria	Proterozóico med-sup	Metassedimentos

...Tabela 19

TO	-	Almas	-	-	-
TO	-	Araguatins	-	-	-
TO	-	Arapoema	-	-	-
TO	-	Arraias			
TO	-	Aurora do Tocantins	Aurora do Norte	-	-
TO	+	Colinas	-	Permeano	Siltitos / Formação Pedra de Fogo
TO	-	Conceição do Tocantins	-	-	-
TO	*	Couto Magalhães	Faz. Cocal	Proterozóico inferior	Xistos, filitos, ardósias
TO	-	Cristalândia	-	-	-
TO	-	Dianópolis	-	-	-
TO	-	Filadélfia	-	-	-
TO	-	Formoso do Araguaia	-	-	-
TO	0	Guaraí	Vários	Permeano	Siltitos / Formação Pedra de Fogo
TO	-	Lizarda			
TO	-	Natividade	-	-	-
TO	+	Nova Olinda	Vários	Permeano	Formação Pedra de Fogo/sediment
TO	-	Palmeirópolis	-	-	-
TO	-	Taguatinga	-	-	-
TO	-	Xambioa	-	-	-

**TABELA 20 - OCORRÊNCIAS BRASILEIRAS DE MÁRMORES.** Fontes: CPRM(1997); DNPM (1997); ABPC (1978)

(\*) Depósitos ou Jazidas (0) Lavra em exploração

(/0) Lavra abandonada (+) Ocorrências

(-) Sem informações

AL	/0	Mata Grande	Serra da Jibóia/Rio Moxotó	Proterozóico superior	Leuco-granito
BA	-	Água Quente	-	-	-
BA	-	Alegre	Celina	-	-
BA	-	América Dourada	-	-	-
BA	+	Anagé	Faz. Paiol/Mandioca/Jardim	Arqueano	Gnaisse
BA	-	Angical	-	-	-
BA	-	Barra	-	-	-
BA	0 /0	Belmonte	Vários	Proterozóico superior	Biotita-gnaisse
BA	+	Boa Nova	Vários	Arqueano	Granulito
BA	+	Boquirá	Vários	Arqueano	Rochas vulcano-sedimentares
BA	+	Botuporá	Vários	Arqueano	Anfibolito, talco
BA	*	Brumado	Vários	Arqueano	Dolomitos
BA	-	Caem	-	-	-
BA	+	Campo Formoso	Faz. Araras/Marroca	Quaternário	Calcário
BA	-	Canarana	-	-	-
BA	-	Canavieiras	-	-	-
BA	-	Canudos	-	-	-
BA	-	Caririnha	-	-	-
BA	+	Casa Forte	Faz. Pascasso	Arqueano	Micaxisto
BA	0	Casa Nova	Vários	pm	Micaxisto
BA	-	Central	-	-	-
BA	-	Côcos	-	-	-
BA	-	Contendas do Sincora	-	-	-
BA	+	Curaçá	Vários	Proterozóico superior	-
BA	+	Dom Inocência	Faz. João Alves	Arqueano	Ortognaisse
BA	-	Encruzilhada	-	-	-
BA	-	Euclides da Cunha	-	-	-
BA	-	Ibiassuce	-	-	-

...Tabela 20

BA	-	Ibipitanga	-	-	-
BA	+	Ibitiara	Faz. Mutuca	pm	Metassedimentos
BA	-	Ibitiba	-	-	-
BA	-	Ibotirama	-	-	-
BA	-	Ipirá	-	-	-
BA	-	Irecê	-	-	-
BA	-	Itamarajú	-	-	-
BA	/0	Itapebi	Vários	ps	-
BA	+	Itiuba	Faz. Fervedouro	Arqueano/Transamazônico	Escarnito
BA	0	Jacobina	Vários	Q	Calcários
BA	+	Jequié	Pedra Assunção/F. Torta	Arqueano	Chamoquitos
BA	0 /0	Juazeiro	Vários	Quatern/ Proterozóico superior	-
BA	-	Jussara	-	-	-
BA	-	Laje	-	-	-
BA	+	Livramento do Brumado	Lagoa Funda/Olho d'Água	Arqueano/Transamazônico	Quartzito, itabirito
BA	-	Macaçuba	-	-	-
BA	+	Macaúbas	Vários	Arqueano	Rochas vulcano-sedimentares
BA	/0	Manoel Vitorino	Vários	Arqueano	Migmatito, gnaiss
BA	-	Mascote	-	-	-
BA	*	Mirangaba	Vários	Q	Calcários
BA	+	Monte Santo	Vários	Arqueano/Transamazônico	Calcossilicáticas
BA	-	Morpara	-	-	-
BA	0	Morro do Chapéu	Faz. Pedra Branca/Camirim	Quaternário	Calcário
BA	+	Oliveira dos Brejinhos	Morrinho da Ponta da Serra	Arqueano	Rochas granito-migmatíticas
BA	-	Ouricangas	-	-	-
BA	*	Ourolândia	Vários	Q	Calcários
BA	+	Paramirim	Serra das Cabeças	Arqueano	Anfibolito, talco
BA	+	Pau Brasil	Vários	Proterozóico superior	-
BA	/0	Paulo Afonso	Faz. Tigre	Proterozóico superior	Granito
BA	-	Pindobaçu	-	-	-

...Tabela 20

BA	+	Poções	Riacho Meio/B. Jesus Serra	Arqueano	Granulitos
BA	+	Potiraguá	Vários	Proterozóico superior	-
BA	-	Prado	-	-	-
BA	+	Pres. Jânio Quadros	Faz. Serra/Ventania	Arqueano	Metaultrabásica
BA	+	Quijingue	Vários	Arqueano/Transamazônico	Diopsidito
BA	-	Remanso	-	-	-
BA	-	Retirolândia	-	-	-
BA	+	Riacho de Santana	Vários	Arqueano	Suite "Greenstone Belts"
BA	-	Rio Antônio	-	-	-
BA	-	Ruy Barbosa	-	-	-
BA	+	Santa Luz	Faz. Lagoa do Bras	Arqueano	Diopsidito
BA	-	Santa Luzia	-	-	-
BA	0	Santo Sé	Faz. Varginha	Arqueano	Ortognaisse
BA	-	São Desidério	-	-	-
BA	+	Senhor do Bonfim	Vários	Arqueano/Transamazônico	Calcossilicáticas
BA	-	Sta Cruz da Vitória	-	-	-
BA	-	Tanhaçu	-	-	-
BA	+	Uaua	Vários	Arqueano/Transamazônico	Calcossilicáticas
BA	-	Valente	-	-	-
BA	-	Vargem Alta	Queimado	-	-
BA	0	Vitória da Conquista	Estreito	Arqueano	Micaxisto, gnaisse
BA	+	Xique-Xique	Faz. Estreito	Quaternário	Calcários
GO	+	Americano do Brasil	Americano do Brasil	Proterozóico inferior	Micaxisto
GO	+	Anicuns	Vários	Proterozóico inferior	Xisto, metacherts
GO	-	Campinaçu	-	-	-
GO	+	Caturai	Goianira	Arqueano	Rochas básicas
GO	*	Corumbá	Vários	pm	Calco-xisto
GO	-	Cristalândia	-	-	-
GO	-	Edéia	-	-	-
GO	-	Goianira	-	-	-

...Tabela 20

GO	-	Goiás	Araguapaz	-	-
GO	-	Iaciara	-	-	-
GO	-	Indiara	-	-	-
GO	+	Itaberaí	F. São Bento/Gogomé	Proterozóico inferior	Xisto
GO	+	Itapaci	Vários	Arqueano	Calco-xistos, quartzito
GO	+	Nerópolis	Nascente R. Barreirão	Arqueano	Rochas calcossilicáticas
GO	-	Niquelândia	-	-	-
GO	-	Nova Roma	-	-	-
GO	-	Palmeira de Goiás	-	-	-
GO	-	Silvânia	-	-	-
GO	-	Uruaçu	-	-	-
MG	-	Águas Formosas	-	-	-
MG	-	Além paraíba	-	-	-
MG	-	Areado	-	-	-
MG	-	Augusto de Lima	-	-	-
MG	-	Barbacena	-	-	-
MG	-	Bicas	-	-	-
MG	+	Boa Esperança	Faz. Chale	pm	Biotita-gnaïsse
MG	0	Caetanópolis	Faz. Lontra	Proterozóico superior	Ardósias
MG	+	Campos Altos	Capoeira Funda/Tigre	pm	-
MG	-	Chiador	-	-	-
MG	/0	Diamantina	Rodeador/NE Diamantina	Proterozóico superior	Filitos, metasedimentos
MG	*	Guanhaes	Vários	Arqueano	Gnaïsse leucocrático
MG	-	Guarara	-	-	-
MG	-	Guimaranã	-	-	-
MG	-	Ibiturama	-	-	-
MG	-	Inhaúma	-	-	-
MG	0	Itabirito	Faz. Da Rocinha	Proterozóico inferior	Filitos, itabirito, quartzito
MG	-	Itacambira	-	-	-
MG	-	Itumirim	-	-	-

...Tabela 20

MG	-	Jaboticatubas	-	-	-
MG	+	Ladainha	Vila Aparecida-Ladainha	Arqueano	Biotita-gnaiss
MG	-	Lagamar	-	-	-
MG	-	Leopoldina	-	-	-
MG	0	Mar de Espanha	Oriente/ Esperança/Matinha	Brasiliano	Gnaiss, quartzito, granito
MG	-	Mariana	-	-	-
MG	-	Monjolos	-	-	-
MG	0	Ouro Preto	Macacos/Mata Mata	Proterozóico inferior	Filitos, itabiritos
MG	*	Paraopeba	Faz. Pontinha/Lontra	Proterozóico superior	Ardósias
MG	0	Patos de Minas	Faz. Ranchinho	Proterozóico superior	
MG	+	Pirapetinga	Faz. Pouso Alto	Proterozóico superior	Biotita-gnaiss, migmatito
MG	-	Recreio	-	-	-
MG	-	S Antônio Aventureiro	-	-	-
MG	*	Sabinópolis	Córrego Valongo	Arqueano	Gnaiss leucocrático
MG	-	Santa Bárbara	-	-	-
MG	-	Santana do Deserto	-	-	-
MG	/0	Santana do Pirapama	Faz. Inhame	Proterozóico superior	Filitos, quartzitos
MG	/0	Santana do Riacho	Vários	Proterozóico superior	Xistos, folhelhos ardósianos
MG	*	Senador Cortes	Cabeceiras Rio S. Lourenço	Proterozóico superior	Gnaiss, granito
MG	*	Senhora do Porto	Cór. Felix/Rib. dos Pintos	Arqueano	Gnaiss leucocrático
MG	0	Sete Lagoas	Riacho Campo/Lag. Grande	Proterozóico superior	Calcissilito, margas, micrito
MG	-	Simão Pereira	-	-	-
MG	+	Teófilo Otoni	Teófilo Otoni-Pote	Arqueano	Biotita-gnaiss
MG	-	Vazante	-	-	-
MS	*	Bodoquena	Rio Betione		Rochas carbonáticas
MS	+	Bonito	Cabeceiras Cór. Pitangueiras	pm	Rochas carbonáticas
MS	/0	Miranda	Br-362/ Próximo a Miranda	Proterozóico superior	Xistos, filitos
PE	-	Camutanga	-	-	-
PE	*	Caruaru	Cachoeira Seca	Proterozóico sup /Brasiliano	Monzogranito
PE	-	Floresta	-	-	-

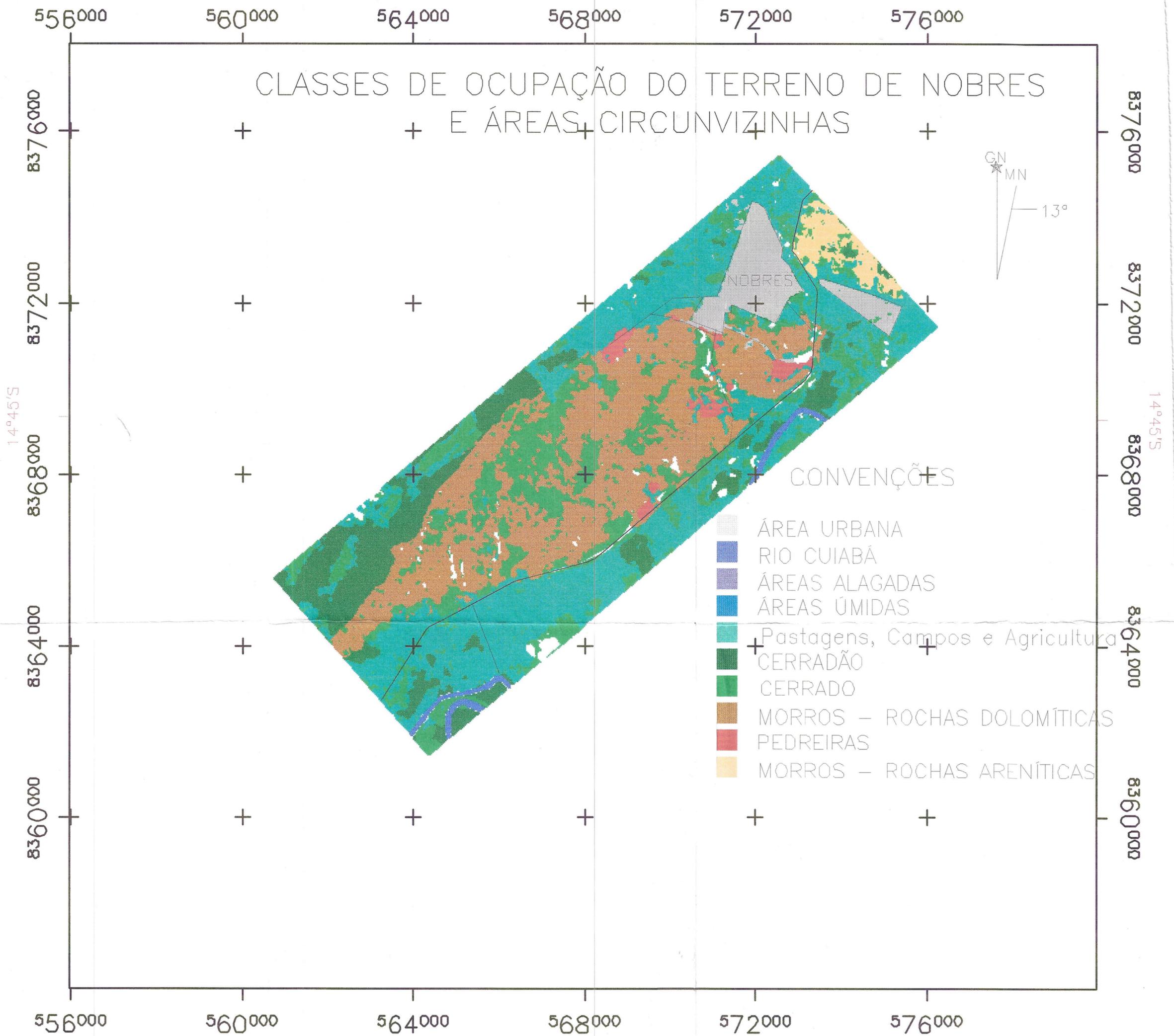
...Tabela 20

PE	0	També	Sítio Quebec	Proterozóico inferior	Gnaisses, migmatitos
PE	*	Venturosa	Carrapateira, Guanabara	Proterozóico sup./ Brasileiro	Granodiorito
PI	-	Fronteiras	-	-	-
PI	0	Pio IX	Quixabá	Proterozóico inferior	Gnaisse, granito
PI	-	Teresina	Contendas	-	-
PR	-	Almirante Tamandaré	-	-	-
PR	0	Bocaiúva do Sul	Vários	Proterozóico superior	Filitos
PR	0	Campo Largo		Proterozóico superior	Filitos
PR	0	Castro	Vários	Proterozóico superior -médio	Metasedimentos
PR	/0	Cerro Azul	Vários	Proterozóico superior	Metasedimentos
PR	-	Guaraqueçaba	-	-	-
PR	-	Jaguariaiva	-	-	-
PR	0	Rio Branco do Sul	Vários	Proterozóico superior	Filitos
PR	-	Rio Negro	-	-	-
PR	-	Senges	-	-	-
RJ	-	Cambuci	-	-	-
RJ	-	Campos	-	-	-
RJ	/0	Cantagalo	Vários	“	Gnaisse, anfíbrito
RJ	0	Cordeiro	Faz. Saudade	“	Anfíbrito-biotita-gnaisse
RJ	-	Italva	-	-	-
RJ	0	Itaocara	S. Águas Quentes	-	Biotita-gnaisse, anfíbrito
RJ	-	Itaperuna	-	-	-
RJ	+	Pádua	Faz. do Rochedo/Zé Tomaz	Proterozóico superior	Leucognaisse
RJ	-	São Fidélis	-	-	-
RN	-	Açu	-	-	-
RN	-	Augusto Severo	-	-	-
RN		Felipe Guerra	-	-	-
RN	-	Ípauguaçu	-	-	-
RN	-	Jucurutu	-	-	-
RN	-	Messias Targino	-	-	-

RN	-	Pendências	-	-	...Tabela 20
RN	-	Santana dos Matos	-	-	-
RN	-	São João do Sabugi	-	-	-
RN	+	São Rafael	Vários	pm	Metagrauvaca
RN	+	São Tomé	Carnaúba/Pedra Preta	pm	Micaxisto
RS	-	Arroio Grande	-	-	-
RS	-	Bagé	-	-	-
RS	-	Caçapava	-	-	-
RS	+	DomPedrito	Arroio Taquarembinho	Arqueano/Transamazônico	-
RS	+	Lavras do Sul	Vários	Arqueano/Brasiliano	Granito, gnaiss
RS	-	Pinheiro Machado	-	-	-
RS	-	Santana do Boa vista	-	-	-
RS	+	São Gabriel	Arroio das Canas	Arqueano/Brasiliano	Granito, gnaiss
SC	+	Camboriú	Vários	Arqueano/Brasiliano	Granitóides
SC	+	Itapema	Serra do Rio Pequeno	Arqueano/Brasiliabo	Granitóide
SC	/0	Itajaí	Cabeçudas	Arqueano/Brasiliano	Micaxisto
SC	-	Presidente Nereu	-	-	-
SE	+	Canindé São Francisco	Vários	Proterozóico superior	Metabásicas, ultrabásicas, xistos
SE	*	Lagarto	Faz. Carica/Cumbé		-
SE	+	Poço Redondo	Povoado Bomsucesso	pm	Metacarbonatos
SE	-	Porto da Folha	-	-	-
SE	+	Simão Dias	Próx. Rio Caica	Proterozóico superior	-
SP	/0	Apiá	Sít. Serrinha/Rio Acima	Proterozóico superior	Metacalcários
SP	0	Capão Bonito	Bairro Capuava	pm	Filitos
SP	+	Eldorado Paulista	Vários	-	-
SP	+	Iporanga	Cór. Areadinho	pm	Metasedimentos
SP	+	Jacupiranga	Lavrinhas	Arqueano	Migmatitos
SP	0	Ribeira	Mor Preto/E. Velho/S Pedro	pm	Metacalcários
SP	-	Barra do Turvo	Barra do Turvo	-	-
SP	-	Itapeva	-	-	-
TO	-	Palmas	-	-	-

# **ANEXO I**

## **MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO**

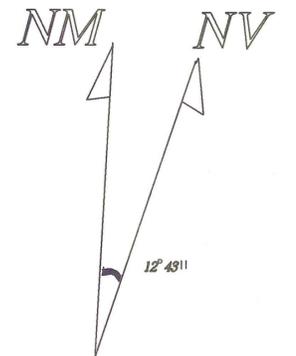


## **ANEXO II**

# **MAPA LITOLÓGICO DA ÁREA URBANA DE NOBRES, MATO GROSSO**

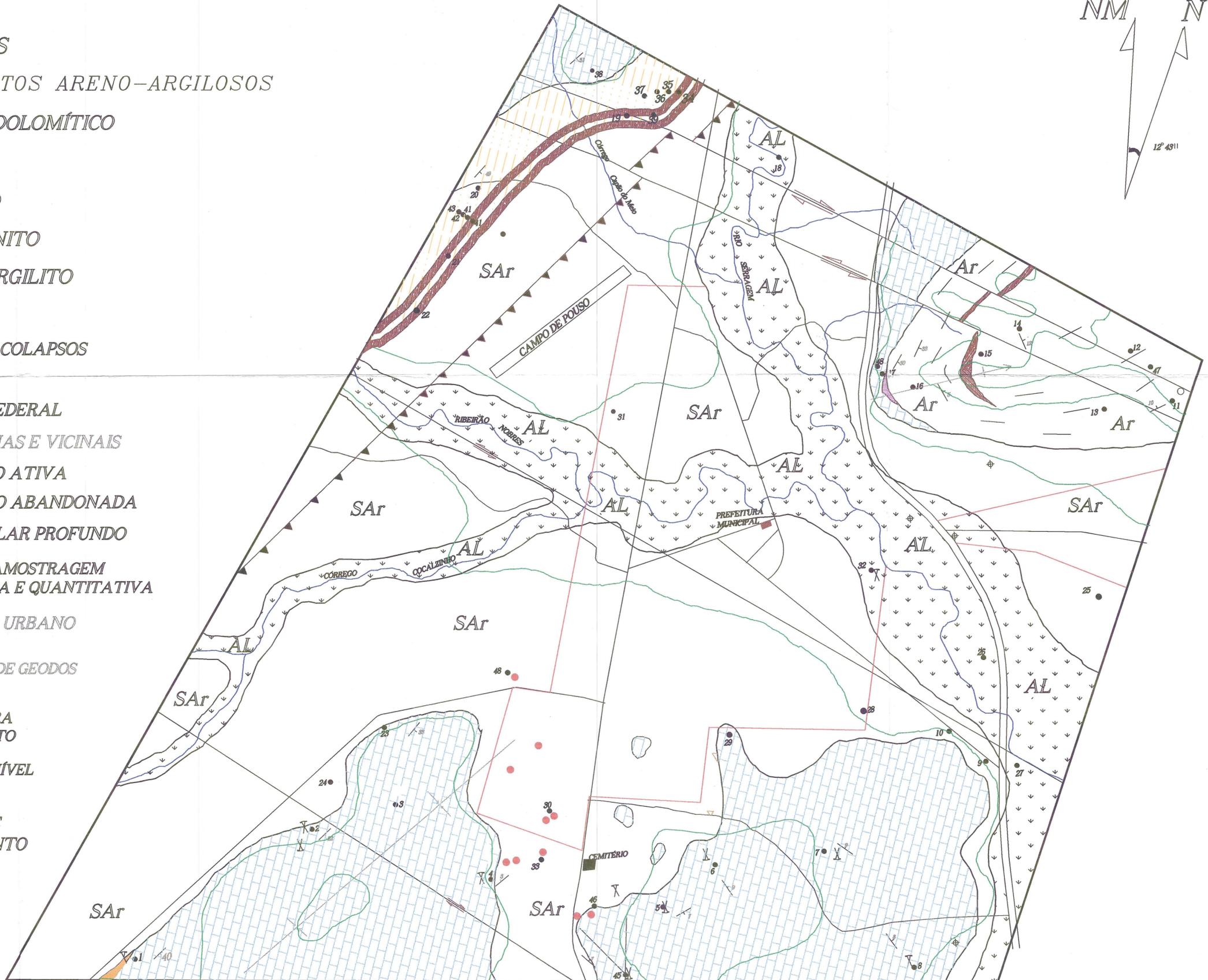
# MAPA LITOLÓGICO DA ÁREA URBANA DE NOBRES - MT

ANEXO II



## LEGENDA

- AL ALUVIÕES
- SAr SEDIMENTOS ARENO-ARGILOSOS
- ARENITO DOLOMÍTICO
- Ar ARENITO
- DOLOMITO
- DOLOARENITO
- SILTITO/ARGILITO
- SILEXITO
- FEIÇÕES DE COLAPSOS
- DRENAGEM
- RODOVIA FEDERAL
- VIAS URBANAS E VICINAIS
- MINERAÇÃO ATIVA
- MINERAÇÃO ABANDONADA
- POÇO TUBULAR PROFUNDO
- PONTOS DE AMOSTRAGEM QUALITATIVA E QUANTITATIVA
- PERÍMETRO URBANO
- OCORRÊNCIA DE GEODOS DE QUARTZO
- EIXO DE DOBRA COM CAIMENTO
- CURVAS DE NÍVEL
- FALHAS DE RASGAMENTO



## **ANEXO III**

# **GEOMORFOLOGIA CÁRSTICA**



**GEOMORFOLOGIA CÁRSTICA**

**ANEXO III**

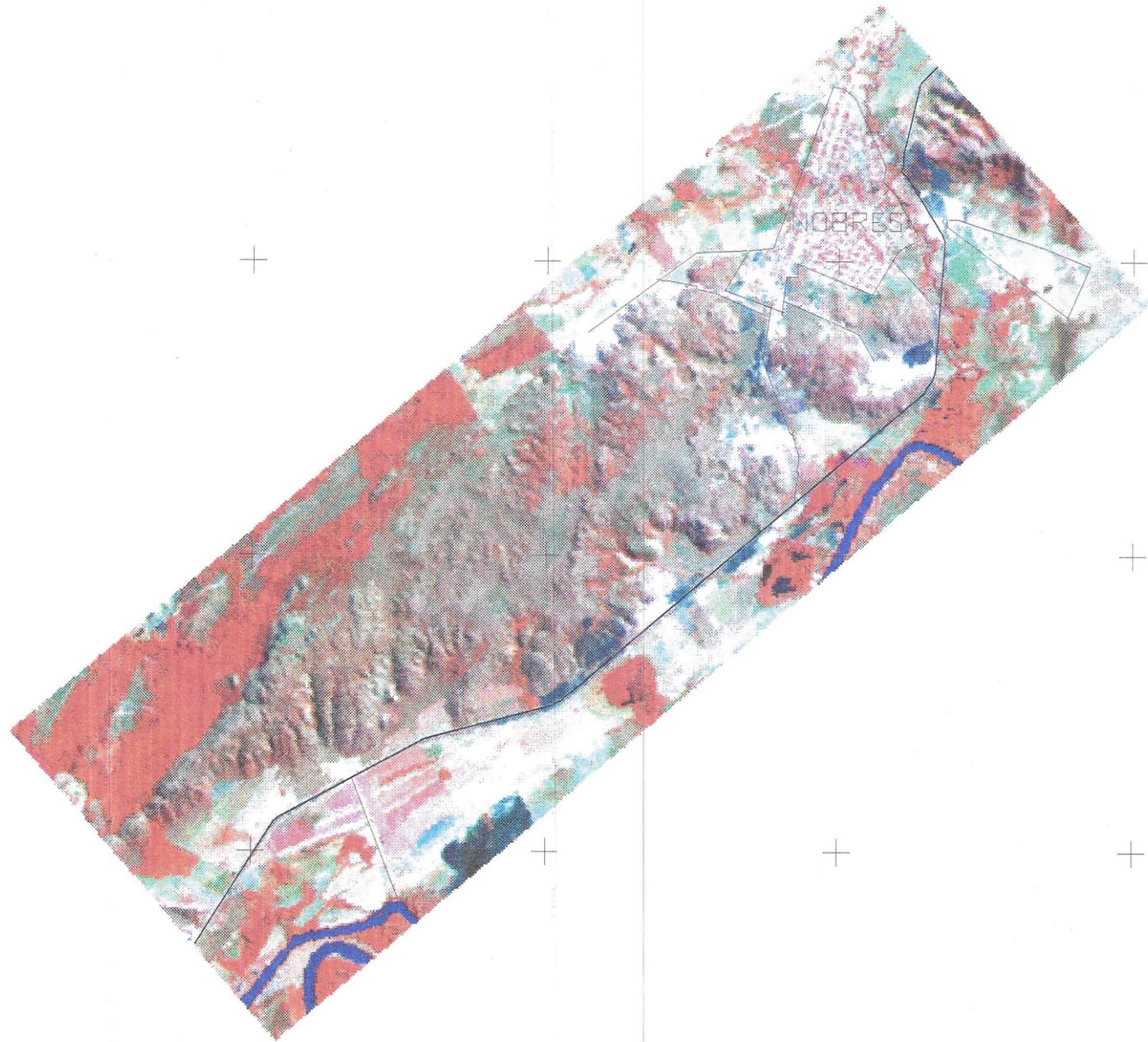
-  VALE CÁRSTICO
-  TORRES CÁRSTICAS
-  MORROS CÁRSTICOS
-  VALES CEGOS INTERMITENTES COM INTERRUPÇÕES NO LEITO ROCHOSO
-  VALES CEGOS INTERMITENTES COM INTERRUPÇÕES NOS MATERIAIS INCONSOLIDADOS
-  ÁREAS ALAGADAS (LAGOS CÁRSTICOS ?)
-  ÁREA ÚMIDA INTERMITENTE
-  ZONA DE OCORRÊNCIAS DE COLAPSOS E SUBSIDIÊNCIAS
-  ZONAS DE DISSOLUÇÃO SUPERFICIAL

0 1500 m  
ESCALA

## **ANEXO IV**

### **IMAGEM DE SATÉLITE**

# IMAGEM LANDSAT TM5



BASE 227 PONTO 70D (29/07/92)

BANDAS 453

556000

560000

564000

568000

572000

576000

8376000

8372000

8368000

8364000

8360000

8376000

8372000

8368000

8364000

8360000

14°45'S

14°45'S

556000

560000

564000

568000

572000

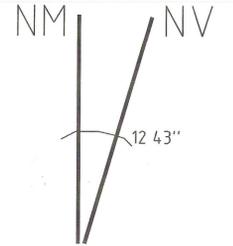
576000

## **ANEXO V**

### **MAPA DA ZONA MAIS FAVORÁVEL AOS PROCESSOS DE CARSTIFICAÇÃO**

# CARTA DA ZONA MAIS FAVORÁVEL A OCORRÊNCIA DE COLAPSOS DA CIDADE DE NOBRES, MT

# ANEXO V



## LEGENDA

- TRAÇADO VIÁRIO URBANO
- ZONA MAIS FAVORÁVEL A OCORRÊNCIA DE COLAPSOS
- TERRENO CÁRSTICO

- COLAPSOS
- RN 740 X (IBGE)
- LINHAS GRAVIMÉTRICAS

## MEMORIAL DESCRITIVO

Á área urbana do município de Nobres (MT) está assentada, em toda a sua extensão, sobre um substrato rochoso carbonático, recoberto na superfície por materiais inconsolidados que chegam atingir 20 metros de espessura. As evidências para esta afirmação foram baseadas nas seguintes razões: (1) a área está inserida, estruturalmente, na zona de um eixo de uma dobra sinclinal, com rochas carbonáticas aflorantes em todo o entorno do perímetro urbano; (2) todos os perfis litológicos dos poços tubulares profundos existentes na área, descrevem uma camada superficial de materiais inconsolidados, seguidos de rocha carbonática, até o final da perfuração; e (3) nos trabalhos de campo.

E, tendo como princípio (Tabela 26) que a região apresenta alta potencialidade a carstificação, todo o perímetro urbano da cidade de Nobres (MT) está sujeito a ocorrência de problemas cársticos, representado na legenda desta carta como *terreno cárstico*.

Mesmo considerando-se toda a área como sendo predisponente aos problemas cársticos (colapsos e/ou subsidências), diferenciou-se uma zona da área urbana como sendo a mais favorável a ocorrência de colapsos. Os limites desta zona foram estabelecidos baseando-se na existência de problemas ocorridos; nas zonas de dissolução superficiais delimitadas pela fotointerpretação (anexo III); nas anomalias gravimétricas negativas, obtidas pela prospecção geofísica (Figura 79); nos canais de drenagens que desaparecem quando encontram os materiais inconsolidados (Anexo III); e por estar inserida dentro dos limites do poljé.

Além disso, nesta zona poderá haver a propagação dos problemas existentes, ou seja, a continuidade dos processos de carstificação subsuperficiais.