UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

O «ENTABLAMENTO» EM DERRAMES
BASÁLTICOS DA BACIA DO PARANÁ:
ASPECTOS GENÉTICOS E
CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

NAHOR NEVES DE SOUZA JUNIOR

ORIENTADOR: PROF. DR. ANTENOR BRAGA PARAGUASSU

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: ÁREA GEOTECNIA.

SÃO CARLOS - JUNHO / 1992

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

**O “ENTABLAMENTO” EM DERRAMES BASÁLTICOS DA BACIA
DO PARANÁ: ASPÉCTOS GENÉTICOS E
CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA**

NAHOR NEVES DE SOUZA JUNIOR

Orientador: Prof. Dr. Antenor Braga Paraguassu

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: Área Geotecnia.

São Carlos – Junho/1992

*Porque assim diz o Senhor que tem criado os céus,
o Deus que formou a terra, e a fez; Ele
a estabeleceu, não a criou vazia, mas
a formou para que fosse habitada
Eu sou o Senhor, e não há outro.*

- Isaías 45:18 –

A ciência está sempre a descobrir novas maravilhas;
mas nada traz de suas pesquisas que,
corretamente compreendido,
esteja em conflito com
a revelação divina.

- E. G. WHITE –

AOS MEUS PAIS
NAHOR E RUTH

GRATIDÃO

A MINHA ESPOSA
NOEMI

AOS MEUS FILHOS
ISRAEL, TIAGO E
ANA CLAUDIA

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Antenor Braga Paraguassu, pela valiosa e sábia orientação.

Ao Prof. Dr. Jayme de Oliveira Campos (UNESP - Rio Claro), pelo estímulo e orientação na fase inicial do presente trabalho.

À Universidade Estadual Paulista - UNESP, pela permissão concedida para desenvolver o programa de doutorado, com dedicação exclusiva.

À Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG, por ter propiciado todos os meios necessários à execução de trabalhos de campo na obra de construção da UHE de Nova Ponte.

Aos geólogos António José R. Nardy (UNESP - Rio Claro) e Maria Heloísa B. O. Frascá (IPT - São Paulo), pelo inestimável auxílio nas análises petrográficas.

Aos geólogos Carlos A. Nóbrega (UNESP-Rio Claro), Lázaro V. Zuquette (USP-Ribeirão Preto), André Davino e aos técnicos do Departamento de Geotecnia (USP - São Carlos), Osvaldo Buckwieser Jr. e Décio Ap. Lourenço, pelo interesse, colaboração e companheirismo nas atividades de campo.

Ao Engenheiro Jorge Munaiar Neto, ao Químico António Garcia, do Departamento de Geotecnia (USP - São Carlos); ao técnico Antonio C. Gigante do Departamento de Transportes (USP - São Carlos) e ao Geólogo Fábio Taioli (IPT - São Paulo), pela dedicação e empenho nos ensaios laboratoriais.

Ao Engenheiro José Lins Rolim Filho (Universidade Federal do Pernambuco- Recife), pela amizade e prestatividade demonstradas nas várias etapas desta pesquisa.

Ao desenhista António Claret Carriel, pelo esmero com que procedeu a confecção dos gráficos e seções geológicas.

À Senhorita Célia Regina Ventura pela paciência e eficiência com que efetuou os serviços de datilografia.

A todas as pessoas, impossíveis de serem enumeradas, que contribuíram com informações, empréstimos de artigos e outros favores para a realização da presente pesquisa.

SUMÁRIO

	Pág.
Lista de Ilustrações.....	01
Resumo.....	05
Abstract.....	06
INTRODUÇÃO.....	07
 <u>Capítulo I - Basaltos da Bacia do Paraná: Síntese do Conhecimento Atual</u>	12
1 - Características Geológicas.....	13
1.1 - Vulcanismo Fissural.....	14
1.2 - Considerações sobre a Petrologia.....	18
1.3 - Tectônica.....	20
1.3.1 - Ativação Tectono-Magmática da Plataforma Sul-Americana.....	23
1.3.2 - Natureza dos Esforços.....	24
2 - Compartimentação Geológico-Geotécnica.....	26
3 - Propriedades Tecnológicas.....	31
3.1 - Principais Parâmetros Classificatórios.....	31
3.2 - Alterabilidade.....	37
 <u>Capítulo II - Compartimentação Estrutural "Entablamento-Colunata"</u>	42
1 - Sistemas de Diaclasamento Primário.....	44
2 - Basaltos do Grupo "Rio Columbia".....	47
2.1 - Considerações Gerais.....	48
2.2 - Aspectos Texturais e Estruturais.....	52
2.2.1 - Fatores Páleo-Ambientais.....	55
2.2.2 - Modelo de Gênese.....	57
2.3 - Características Geológico-Geotécnicas.....	66

	Pág.
2.3.1 - Projeto para Armazenagem Subterrânea de Rejeitos nucleares.....	67
2.3.2 - Projetos de Barragens e Reservatórios.....	71
3 - Conclusões.....	72
<u>Capítulo III - O Entablamento na Formação Serra Geral: Aspectos Genéticos</u>	74
1 - Afloramentos Estudados.....	75
2 - Evidências Geológicas.....	79
2.1 - Basaltos Hialofíticos.....	79
2.2 - Principais Feições Estruturais.....	83
2.3 - Classificação das Juntas Primárias.....	89
2.4 - Aspectos Páleo-Climáticos.....	94
2.5 - Alteração Hidrotermal em Juntas Tipo I.....	101
3 - Conclusões.....	111
<u>Capítulo IV - O Entablamento na Formação Serra Geral: Caracterização Geotécnica</u>	113
1 - Caracterização do Material Rochoso.....	115
1.1 - Propriedades Mecânicas.....	115
1.1.1 - Ensaio de Compressão Uniaxial.....	115
1.1.2 - Ensaio Dinâmico.....	127
1.1.3 - Ensaio Brasileiro.....	129
1.1.4 - Índice de Resistência à Compressão Puntiforme..	131
1.1.5 - Índice Esclerométrico.....	132
1.1.6 - Conclusões.....	135
1.2 - Propriedades Tecnológicas.....	138
2 - Comportamento como Maciço Rochoso.....	143
2.1 - Classificação Geomecânica.....	143
2.1.1 - Sistema RMR.....	146
2.1.2 - Sistema Q.....	147
2.1.3 - Principais Aplicações.....	148
2.2 - O Exemplo do Maciço Rochoso da UHE de Nova Ponte.....	151
2.2.1 - Aspectos Gerais.....	151

	Pág.
2.2.2 - A Zona de Contato Xisto-Basalto.....	152
2.2.3 - O Entablamento - Derrames I e II.....	169
2.3 - Comentários e Conclusões.....	172
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	176
BIBLIOGRAFIA.....	179
APÊNDICES.....	200
1 - Ensaio de Compressão Uniaxial.....	201
2 - Ensaio de Compressão Diametral.....	227
3 - Ensaio de Compressão Puntiforme.....	232
ANEXOS.....	238
1 - Parâmetros Tecnológicos dos Basaltos da Formação Serra Geral.....	239
2 - Sistema de Classificação Geomecânica RMR.....	244
3 - Sistema de Classificação Geomecânica Q.....	249

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- CAPÍTULO I -

Figura	pág.
I.1 - Mapa da América do Sul indicando as principais regiões geotectônicas e a Bacia do Paraná.....	15
I.2 - Mapas da Formação Serra Geral: a - localização na Bacia do Paraná; b - isópacas.....	16
I.3 - Coluna crono-estratigráfica da Bacia do Paraná.....	17
I.4 - Formação Serra Geral: as três regiões e respectivas litologias.....	21
I.5 - Basaltos da Bacia do Paraná: composição química.....	21
I.6 - Formação Serra Geral: aspectos texturais (a) e estruturais (b) típicos de núcleo dos derrames.....	22
I.7 - Derrame hipotético: seção esquemática com as principais feições lito-estruturais.....	28
I.8 - Classificação geológico-geotécnica do maciço basáltico de Porto Primavera.....	30
I.9 - Características geotécnicas de algumas feições geológicas em maciços basálticos.....	32
I.10- Tabela com as principais propriedades tecnológicas de basaltos compactos do Estado de São Paulo.....	34
I.11- Correlação entre os parâmetros porosidade aparente e absorção de água	38
I.12- Alterabilidade de rochas basálticas e classificação quanto ao emprego em obras civis.....	40

- CAPÍTULO II -

II.1 - Compartimentação entablamento/colunata: perfil esquemático e unidades estruturais	45
II.2 - Mapa de localização do Grupo Rio Columbia	49
II.3 - Coluna estratigráfica do Grupo Rio Columbia.....	51
II.4 - Sub-grupo Yakima (GRC): características gerais	53
II.5 - Grupo Rio Columbia: composição química.....	53
II.6 - Grupo Rio Columbia: seção esquemática de um derrame típico.....	54
II.7 - Grupo Rio Columbia: modelo de gênese dos derrames, conforme LONG & WOOD (1986).....	60

Figura	pág.
II.8 - Morfologia da superfície de juntas colunares de derrames basálticos	65
II.9 - Características geológicas e geotécnicas do derrame Cohassett (GRC)	69

- CAPÍTULO III -

III.1 - Compartimentação entablamento/colunata: aspectos estruturais (a) e texturais (b e c)	76
III.2 - Relação dos afloramentos de entablamentos em derrames da Formação Serra Geral	78
III.3 - Entablamento: características texturais da rocha, indicativas de rápido resfriamento	80
III.4 - Basaltos hialófiticos (FSG): a - aspectos texturais; b - composição química.....	82
III.5 - Entablamento típico: a - feições estruturais; b - aspectos texturais; c - composição química	84
III.6 - Feições estruturais do entablamento (afloramentos no município de S.Carlos)	85
III.7 - Feições estruturais do entablamento: entablamento - colunar	86
III.8 - Feições estruturais do entablamento: estrutura "em leque" (a); estrutura tipo "roseta" (b)	87
III.9 - Feições estruturais do entablamento: descontinuidades horizontais (a); bloco de desmonte (b)	88
III.10- Diaclasamento primário do entablamento: a - juntas tipo I; b - juntas tipo I e II	91
III.11- Diaclasamento primário do entablamento: polígonos de juntas tipo I (a) e tipo II (b)	92
III.12- Diaclasamento primário do entablamento: segmentos sub-horizontais em juntas tipo II	93
III.13- Brecha Basáltica arenosa - topo de entablamento	96
III.14- Modelo esquemático de sedimentação aquática de deserto	96
III.15- Seção geológica Serrana - Ribeirão Preto - Sertão-zinho	98
III.16- Corpo silto-arenoso intrusivo (derrame "c" - pedreira da Barragem de Três Irmãos)	98

Figura	pág.
III.17- Fatores páleo-ambientais na formação de entablamento (ex.no município de S.Carlos)	102
III.18- Junta tipo I: fissura colmatada e halo de alteração	104
III.19- Junta tipo I: representação esquemática do halo de alteração e microzonas de preenchimento	105
III.20- Junta tipo I (fotomicrografias) : a - halo de alteração; b - fissura preenchida	107
III.21- Junta tipo I (fotomicrografias): microzonas mineralógicas de preenchimento	108
III.22- Junta tipo I (fotomicrografias): microzonas mineralógicas de preenchimento	109

- CAPÍTULO IV-

IV.1 - Amostras de entablamento (ensaio de compressão uniaxial)	117
IV.2 - Equipamento utilizado no ensaio de compressão uniaxial	118
IV.3 - Quadro com resultados do ensaio de compressão uniaxial	119
IV.4 - Curvas tensão x deformação (ensaio de compressão uniaxial)	123
IV.5 - Diagrama para classificação de rochas intactas (Deere, 1968)	126
IV.6 - Ensaio dinâmico : a - equipamento; b - equações utilizadas	128
IV.7 - Ensaio brasileiro: a - amostras ensaiadas; b - modo de solicitação; c - resultados	130
IV.8 - Ensaio de compressão puntiforme: a - equipamento utilizado; b - resultados	133
IV.9 - Sistema classificatório integrado (resistência à tração, à compressão simples e à carga pontual)	134
IV.10- Ensaio esclerométrico: equipamento utilizado (a) e resultados (b e c)	136
IV.11- Avaliação da resistência à compressão simples, via índice esclerométrico, de basaltos compactos	137
IV.12- Parâmetros geotécnicos do entablamento: Formação Serra Geral x Grupo Rio Columbia	139

Figura	pág.
IV.13- Características tecnológicas do entablamento (Formação Serra Geral)	141
IV.14- Índices de alterabilidade do entablamento	142
IV.15- Modelo estrutural do entablamento	144
IV.16- Qualificação de maciços rochosos: principais sistemas classificatórios	149
IV.17- Obra de Nova Ponte (foto): contato xisto-basalto (entablamento)	153
IV.18- Obra de Nova Ponte: seção esquemática das principais feições geológicas	154
IV.19- Obra de Nova Ponte: seção geológica das paredes da galeria 1	157
IV.20- Obra de Nova Ponte: extensas descontinuidades sub-horizontais (derrame I)	163
IV.21- Obra de Nova Ponte: seção geológica esquemática ao longo do eixo da barragem	165
IV.22- Obra de Nova Ponte: modelo estrutural (II) do maciço local	168
IV.23- Obra de Nova Ponte: características geológicas e geotécnicas do derrame I	171
IV.24- Características geotécnicas do entablamento (Formação Serra Geral x Grupo Rio Columbia)	174

RESUMO

O entablamento, uma feição estrutural típica dos derrames basálticos do Grupo Rio Columbia (E.U.A.), corresponde a uma rocha seccionada por densa rede de juntas de resfriamento, com orientação subvertical predominante. Define-se, nesse caso, um modelo de gênese em que se admite a inundação de derrames de lava, por águas continentais de superfície. O resfriamento do corpo de lava, então submerso, se processa de maneira extremamente rápida, originando o intenso diaclasamento.

Identifica-se o mesmo litótipo basáltico, porém em ocorrências relativamente mais raras, nos derrames da Bacia do Paraná. Procede-se então, pela primeira vez, a atividades de reconhecimento e análise de determinadas condições páleo-climáticas, eventualmente presentes por ocasião do vulcanismo Serra Geral e diretamente ligadas à formação do entablamento.

Verifica-se ainda, que, em entablamentos não afetados intempérica ou tectonicamente, as juntas estreitamente espaçadas, mas fortemente seladas e/ou perfeitamente imbricadas, isolam pequenos blocos de rocha intacta de resistência mecânica muito alta. Este conjunto lito-estrutural, confere ao entablamento um comportamento geotécnico comprovadamente adequado, como civis de grande porte. Comportamento, suporte rochoso em obras igualmente apropriado ou satisfatório, verifica-se ao caracterizar-se tecnologicamente o material rochoso do entablamento, visando seu emprego como material de construção.

ABSTRACT

The entablature, a typical structural feature in flood basalt flows of the Columbia River Basalt Group-USA refers to a rock intersected by dense network of cooling joints originating small, irregular to hackly subvertical columns. In such case, a model which considers the inundation of the lava flow by water during cooling is determined. The lava flow quenching must have occurred rapidly generating the intense jointing.

Identical rock is identified, but more rarely, in basaltic lava flows of the Paraná Basin Brazil. Specific paleoenvironmental conditions are then considered, in the context of the Serra Geral Formation, for the first time, to characterize the entablature as for its origin.

In undisturbed entablatures, the joints, strongly sealed and perfectly interlocked, delimits intact small rock blocks of very high strength. This litho-structural complex yields to the entablature, as rock mass, a suitable geotechnical performance for civil works. The entablature intact rock presents technological characteristics likewise suitable viewing its application as construction material.

-INTRODUÇÃO-

O Tema Proposto

Fenômenos vulcânicos de grande magnitude, que se caracterizam por volumosas quantidades de lava basáltica expelidas através de extensas fissuras cristais, manifestaram-se em várias partes do mundo e estão associadas ao abrangente processo geológico denominado “tectônica de Placas” ou “Deriva dos Continentes”.

Nas diversas ocorrências então identificadas e estudadas, verifica-se relativa homogeneidade na composição química e mineralógica. Esta semelhança destaca-se notavelmente, quando confrontados os derrames basálticos da Formação Serra Geral e do Grupo Rio Columbia, respectivamente, na América do Sul e América do Norte. No entanto, estudos comparativos envolvendo características texturais e estruturais, revelam diferenças significativas entre os basaltos dessas duas ocorrências. Neste cenário distingue-se um litótipo basáltico singular: o entablamento.

O entablamento corresponde, basicamente, a uma feição estrutural de derrames basálticos, em que a rocha se encontra intensamente seccionada por densa rede de juntas primárias. Em análise petrográfica, constata-se ainda uma granulação extremamente fina e abundante matriz vítrea. Nos derrames basálticos Rio Columbia, o entablamento, feição invariavelmente presente, tem sido detalhadamente considerado em estudos geológicos e geotécnicos.

Em uma primeira abordagem comparativa, os basaltos menos fraturados e texturalmente mais grosseiros, ordinariamente identificados na Bacia do Paraná e exaustivamente estudados nas três últimas décadas, deveriam apresentar comportamento geotécnico superior ao entablamento. Outro aspecto, igualmente relevante, refere-se à origem do entablamento ou, o porquê de suas características texturais e estruturais tão singulares.

A importância do assunto não reside, unicamente, no estudo comparativo envolvendo o litótipo entablamento do Grupo Rio Columbia e, os basaltos da Formação Serra Geral. Na verdade, ainda que não divulgado no meio técnico, o entablamento também ocorre na Bacia do Paraná, se bem que, de maneira excepcional ou bem menos frequente.

Verifica-se ainda, após minuciosa análise da literatura pertinente, nacional e estrangeira, a ausência de estudos específicos, onde o entablamento, no contexto da Formação Serra Geral, tenha sido caracterizado quanto à sua origem e no que diz respeito ao seu comportamento geotécnico, tanto como maciço rochoso quanto à nível de agregado para a construção civil.

Objetivos da Investigação

O entablamento, na Formação Serra Geral, embora de ocorrência restrita a alguns poucos locais, apresenta-se com todas as peculiaridades que possibilitaram, no passado, sua identificação e caracterização básica, publicadas no artigo clássico de TOMKEIEFF (1940).

A descrição das principais características geológicas do entablamento, em afloramentos do Estado de São Paulo, é superficialmente apresentada em trabalho prévio do autor (SOUZA JR., 1986). Esta sucinta abordagem revela-se insuficiente para o estabelecimento de um modelo genético consistente, bem como fornece poucos elementos para uma adequada caracterização geotécnica. Assim, com a finalidade de preencher esta lacuna, elaborou-se a presente pesquisa que compreende, fundamentalmente, dois grandes objetivos:

- Identificação dos processos específicos responsáveis pela formação do entablamento, conforme modelo já estabelecido para os derrames do Grupo Rio Columbia;
- Determinação de parâmetros geotécnicos, por meio de ensaios laboratoriais e trabalhos de campo, que possibilitem a avaliação do comportamento geomecânico do entablamento, à nível de rocha intacta ou ainda como suporte rochoso em projetos de grandes obras de engenharia.

Metodologia

Procedeu-se inicialmente a uma revisão minuciosa dos trabalhos mais abrangentes e atuais, concernentes aos basaltos da Bacia do Paraná, objetivando a apresentação das suas principais características geológicas e geotécnicas de maneira resumida e/ou esquemática.

Para a adequada caracterização geológica do entablamento, na Formação Serra Geral, julgou-se como fator de grande relevância a prévia análise da literatura referente aos derrames basálticos do Grupo Rio Columbia, com ênfase no litótipo em apreço. Destinou-se para tanto, praticamente, um capítulo do presente trabalho. Esta decisão fundamenta-se no fato de que o

modelo genético, concebido à princípio para os basaltos Rio Columbia, será também aplicado aos derrames basálticos da Bacia do Paraná.

Verificou-se ainda, que para a referida aplicação do modelo de gênese do entablamento, torna-se necessária a consideração de temas outros (fenômenos hidrotermais, particularidades petrográficas e estruturais etc.), aparentemente desvinculados dos objetivos de uma pesquisa voltada à geologia de engenharia. Na verdade, estes acréscimos contribuem para o estabelecimento consistente ou confirmação do modelo, bem como proporcionam subsídios de interesse à caracterização geotécnica.

As atividades de campo, objetivando sobretudo a identificação, descrição e classificação das feições estruturais de interesse à geologia e à geotecnia, foram desenvolvidas, preferencialmente, nas grandes pedreiras que exploram maciços basálticos tipo entablamento no município de Ribeirão Preto (SP) e, nos extensos cortes de escavação da obra de construção da usina hidrelétrica de Nova Ponte (MG). Neste local, o entablamento encontra-se notavelmente cortado por descontinuidades secundárias, o que possibilita a aquisição de elementos úteis no esclarecimento de determinados fenômenos tectônicos, geralmente observáveis nos maciços basálticos da Bacia do Paraná.

Os ensaios de caracterização mecânica e tecnológica foram executados no laboratório do Departamento de Geotecnia da EESC-USP. Em razão do intenso fraturamento do entablamento, para a determinação da resistência da rocha intacta, necessitou-se recorrer a ensaios índices, não tão precisos e confiáveis, relativamente ao ensaio de compressão uniaxial.

Os testemunhos de sondagem do furo A-115 da obra de Nova Ponte, foram adquiridos para a determinação de importante parâmetro geotécnico, o RQD. o valor deste parâmetro deverá ainda ser considerado na avaliação geomecânica do entablamento, segundo os dois principais métodos classificatórios: sistemas RMR e Q.

CAPÍTULO I

BASALTOS DA BACIA DO PARANÁ: SÍNTESE DO CONHECIMENTO ATUAL

O estudo do magmatismo Mesozoico da Bacia do Paraná, tem sido motivo de numerosos trabalhos, envolvendo os mais variados setores abrangidos pela Geologia. Mais recentemente, uma atenção especial vem sendo dedicada aos aspectos petrológicos, geoquímicos, paleomagnéticos e tectônicos dessas rochas vulcânicas.

Não menos expressiva tem sido a contribuição da geotecnia ao se defrontar, nas três últimas décadas, com a necessidade de caracterizar de maneira pormenorizada a mais importante litologia do referido magmatismo os basaltos da Formação Serra Geral. Neste período, foram implantadas as grandes usinas hidrelétricas, em áreas basálticas, no sul e sudeste do país.

Os mais recentes trabalhos de síntese, pertinentes ao assunto em questão, tanto em termos geológicos como geotécnicos, são significativamente abrangentes. Em PICCIRILLO & MELFI (1988), os basaltos, bem como os demais litótipos da Formação Serra Geral, são exaustivamente analisados quando às suas propriedades petrogenéticas e geofísicas. Descrições geológicas pormenorizadas, apresentação e análise de modelos de gênese e as principais implicações geotécnicas, referentes às diversas feições lito-estruturais de maciços basálticos, são encontrados em SOUZA Jr. (1985 e 1986).

Assim, o procedimento adotado na exposição a seguir não se prenderá à apresentação sistemática, na forma de uma explanação histórica, de todas as informações envolvendo os basaltos da Bacia do Paraná. Na realidade, pretende-se com o presente capítulo atingir os seguintes objetivos:

- Apresentar uma versão atualizada dos tópicos mais importantes referentes aos basaltos da Formação Serra Geral;
- Reunir elementos, de maneira a permitir a elaboração de esquemas ou modelos geológicos e geotécnicos, dos referidos basaltos, considerando-os como maciço rochoso e material de construção (agregados).

1 - Características Geológicas

A estrutural Bacia Sedimentar da Plataforma Sul do Paraná Americana, que constitui a província sediou a mais extensa manifestação vulcânica de natureza continental, na superfície terrestre (Figura I .1). As lavas da Formação Serra Geral (Figura I.2), produto dessa expressiva

atividade magmática, correspondem à penúltima unidade litológica na história deposicional da bacia. (Figura I.3).

Em termos globais, a Bacia do Paraná abrange uma área de aproximadamente 1.400.000 km², assim distribuída: Brasil - 1.100.000 km²; Paraguai - 100.000 km²; Uruguai 100.000 km² e Argentina - 100.000 km². O prolongamento meridional da bacia, em direção à Argentina, origina outra província conhecida por Bacia Chaco-Paraná (Figura I.1).

Ao se analisar o contorno atual da bacia (Figura I.2a), verifica-se que os limites são de natureza erosional ou de origem tectônica (grandes arcos ou soerguimentos). O seu nome deriva do Rio Paraná, que corre paralelo ao seu eixo maior em uma direção NE-SW, por cerca de 1.500 km.

No que se refere à natureza dos limites da província magmática da bacia, verifica-se a predominância de escarpas de “cuestas”. Na realidade, o termo “Serra Geral” provém dos imponentes escarpamentos, com desníveis de até 1.000 metros, formados pelos derrames de lava, no sul de Santa Catarina e nordeste do Rio Grande do Sul (ALMEIDA, 1956).

1.1 - Vulcanismo Fissural

Observando-se a Figura I.2a nota-se que dois terços da porção brasileira da bacia (734.000 km²), são cobertos por derrames de lavas. As fissuras que permitiram a ascensão de grandes volumes de magma basáltico, correspondem a fraturas e falhas de distensão que originaram, conseqüentemente, centenas de diques.

O grande Arco de Ponta Grossa com eixo dirigido a NW (Figura I.2a) foi, provavelmente, o cenário da mais expressiva manifestação deste vulcanismo fissural. Encontram-se dispostos paralelamente ao eixo do arco feixes de diques de diabásio, diversos deles com mais de 100 km de extensão e até centenas de metros de espessura (ALMEIDA, 1986).

Figura I.1 - Mapa da América do Sul indicando as principais regiões geotectônicas e a localização da Bacia do Paraná. (adap. de ZALAN et alii, 1990 e ALMEIDA et alii, 1981)
 I - Bacia do Paraná; II - Bacia Chaco-Paraná; a - Plataforma Sul-Americana; b - Cordilheira dos Andes; c - Plataforma Patagônica

Figura I.2 - Mapas da Formação Serra Geral: (a) localização na Bacia do Paraná (seg. BELLIENE et alii, 1986a) : 1 - embasamento cristalino; 2 - sedimentos pré-vulcânicos; 3 - formação Serra Geral; 4 - sedimentos pós-vulcânicos; 5 - estrutura tipo sinclinal; 6 - estrutura tipo arco; 7 - flexura; 8 - alinhamentos tectônicos e/ou magnéticos; (b) isopacas e extensão areal (seg. ZALAN et alii, apud PEATE et alii, 1988): CB - furo de sondagem (2-CB-1-SP) em Cuiabá Paulista, SP

Figura I.3 - Coluna crono-estratigráfica da Bacia do Paraná: distribuição temporal e espacial das principais unidades litológicas em uma seção hipotética SSE-NNW (seg. ZALAN et alii, 1990)

Na porção central da Bacia do Paraná, região em que a espessura do pacote sedimentar magmático que a preenche alcança valores máximos, até 7.000 metros (MILANI et alii, 1990), se verifica também a maior espessura para os derrames de lava, 1.723 metros. Estimando-se o valor de 660 metros para a espessura média e $1.200.000 \text{ km}^2$ para a área total, incluindo porções do Paraguai, Uruguai e Argentina, atinge-se a impressionante cifra de 750.000 km^3 de volume de material extrusivo (PEATE et alii, 1988).

O pacote de 1723 metros de basaltos, atravessado pela sondagem CB (Figura I.2b), inclui, pelo menos, 28 metros de arenitos distribuídos entre os sucessivos derrames. A análise petrográfica destes arenitos e dos arenitos da Formação Botucatu (Figura I.3), além de revelar significativa semelhança entre as duas litologias, atesta da continuidade de deposição das areias do “deserto Botucatu”, durante o extravasamento rápido e sucessivo das Lavas da Formação Serra Geral.

1.2 - Considerações sobre a Petrologia

Segundo COX (1980), as grandes províncias basálticas continentais são as seguintes: Paraná, Rio Columbia - EUA; Atlântico Norte; Deccan - Índia; Karroo - África do Sul; Antártida e Plataforma Siberiana. Estas 7 províncias são constituídas essencialmente por rochas denominadas de toleíticas, de composição mineralógica similar aquelas verificadas nos basaltos das dorsais oceânicas.

A distribuição das principais províncias basálticas continentais e conceitos sobre o desenvolvimento de novos oceanos apontam para a importância do vulcanismo fissural em decifrar a história da “deriva dos continentes”.

Para a área do Atlântico Sul, verifica-se que o vulcanismo fissural da Bacia do Paraná ocorre imediatamente antes do início da separação dos continentes Sul-Americano e Africano (BELLIENI et alii, 1984a). Semelhanças petrológicas entre os basaltos da Bacia do Paraná e os da província de Karroo (África do Sul), propiciam uma significativa sustentação a esta hipótese (BELLIENI et alii 1984b).

Estudos petrográficos, petroquímicos e paleomagnéticos, desenvolvidos por pesquisadores brasileiros e europeus, na década de 80 (BELLIENI et alii, 1986b, entre outros), revelaram detalhes esclarecedores concernentes aos “basaltos” da Formação Serra Geral e as

consequentes implicações geodinâmicas. As principais contribuições desse estudo estão reunidas em um único volume (PICCIRILLO & MELFI, 1988). As considerações a seguir apresentadas, envolvendo determinados aspectos petrológicas do magmatismo, em questão, foram basicamente extraídas deste livro.

Estruturas vesicular e amigdaloidal associadas, ou não, a materiais sedimentares interderrame, em maciços basálticos, constituem as feições lito-estruturais inequívocas de topo e base de um único derrame. Assim, a individualização dos derrames possibilita a avaliação de suas espessuras máxima e média, respectivamente, 100 metros e 10-20 metros.

As rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, na realidade, não são representadas exclusivamente por litótipos basálticos. Estes, denominados genericamente de basaltos toleíticos, correspondem, aproximadamente, a 90% de todo o material extrusivo. Associados aos basaltos ocorrem, subordinadamente, rochas intermediárias (andesitos toleíticos) e ácidas (riodacitos e riolitos) que representam cerca de 7% e 3%, respectivamente, do volume total.

Os derrames ácidos ocorrem na porção superior dos pacotes vulcânicos da província e, embora sua quantidade não exceda aos 3%, se estendem por 150.000 Km² e atingem até 400 metros de espessura no extremo sudeste da bacia. Classificam-se, em função de aspectos texturais, em: rochas ácidas do tipo Palmas-ATP (coloração cinza escuro e textura afírica); rochas ácidas tipo Chapecó-ATC (coloração cinza esverdeado e textura porfirítica).

Com base nas características litológicas e geoquímicas das lavas da Formação Serra Geral, a Bacia do Paraná deverá ser dividida, esquematicamente, em três regiões principais (Fig. I. 2a): Norte-RNP (acima do alinhamento do Rio Piquiri); Sul-RSP (abaixo do alinhamento do Rio Uruguai) e Central-RCP (entre os dois alinhamentos). A Figura I.4 apresenta a distribuição percentual, em volume, dos tipos litológicos principais nas três regiões então discriminadas.

Os resultados obtidos em análises petroquímicas confirmam a necessidade da referida compartimentação da bacia. Na parte sul (RSP), 93% dos basaltos apresentam baixa porcentagem de TiO₂; já na região norte (RNP), 94% contêm porcentagens relativamente altas. Na região central (RCP) verificam-se valores intermediários. Na Figura I.4 encontram-se registrados os valores médios de TiO₂.

REGIÕES	ROCHAS (% Vol.)			Ti O ₂
	BÁSICAS	INTERMEDIÁRIAS	ÁCIDAS	
NORTE (RNP)	99.7	-	0.3 (ATC)	3.4
CENTRAL (RCP)	92.0	< 1.0	8.0 (ATC/ATP)	1.4 a 3.5
SUL	65.0	22.0	13.0 (ATP)	1.4

Figura I.4 - Formação Serra Geral: estimativa das proporções volumétricas dos tipos litológicos principais e valores médios de Ti O₂ nas três regiões da Bacia do Paraná (seg. PICCIRILLO & MELFI, 1988; NARDY, 1988). ATC - Rochas ácidas tipo chapecô; ATP - Rochas ácidas tipo palmas

Analisando-se a distribuição litológica, incluindo a subdivisão das rochas ácidas e os valores de TiO₂, para cada região, verifica-se que a região central (RCP) é a que apresenta maior diversidade, comportando-se como uma verdadeira Zona de Transição entre RSP e RNP.

Os basaltos, objeto do presente estudo, cuja composição química encontra-se na Figura I.5, predominam nas três regiões da bacia. Em termos mineralógicos, são constituídos essencialmente por cinco componentes, na seguinte ordem decrescente quanto ao volume: plagioclásio; piroxênios (augita e pigeonita); matéria vítrea (até 70%); opacos (magnetita) e olivina (alterada). As variações percentuais dos cinco componentes; os diversos graus, quanto à granulação, em que estes se apresentam, conferem à rocha diferentes aspectos texturais. Prevalece, entretanto, a textura intersertal (Figura I.6a).

A observação de dezenas de afloramentos de basaltos, principalmente no Estado de São Paulo; as descrições e ilustrações contidas na ampla bibliografia disponível, envolvendo ocorrências de toda a bacia, permitem o estabelecimento de um padrão estrutural predominante. Os núcleos dos derrames, via de regra, encontram-se fraturados segundo diáclases irregularmente colunares (Figura I.6b). Padrões outros, embora bem menos frequentes, podem ser perfeitamente identificáveis, como se verificará no capítulo III.

1.3 - Tectônica

O tectonismo responsável pelo fraturamento ou reativação de fraturas pré-existentes da crosta, na era mesozoica da Bacia do Paraná, compreende em verdade dois grandes eventos intimamente associados:

- Extravasamento calmo e intermitente de enormes volumes de lava, em extensas áreas;
- A fragmentação do antigo megacontinente Gonduânico, que corresponde atualmente às províncias geográficas da América do Sul, África, Antártida, Madagáscar, Austrália e Índia.

Os eventos tectônicos que afetaram os maciços basálticos da Formação Serra Geral, embora ainda não bem compreendidas, evidenciam, em algumas situações, a atuação de esforços de natureza compressiva.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)								
Si O ₂	Ti O ₂	Al ₂ O ₃	Fe O*	Mn O	Mg O	Ca O	Na ₂ O	K ₂ O
51.59	3.10	13.61	13.65	0.23	4.75	8.59	2.92	1.57

* - Fe O + 0.9 Fe₂ O₃

Figura I.5 - Composição química dos basaltos da Bacia do Paraná (seg. LETERRIER et alii, apud PRESTIVIK & GOLES, 1985)

0 0,25 0,5 mm

NÍCOIS SEMI-CRUZADOS

(a)

(b)

Figura I.6 - Aspectos texturais e estruturais típicos de núcleo dos derrames da Formação Serra Geral: a) Fotomicrografia, onde se observam ripas de plagioclásio, grãos de piroxênio e, interstícios preenchidos por vidro devitrificado e argilo-minerais (derrame C - UHE Três Irmãos); b) Fraturamento irregular, predominantemente sub-vertical (pedreira Botupedra, estrada Botucatu-Vitoriana, SP)

1.3.1 - Ativação Tectono-Magmática da Plataforma Sul Americana

O vulcanismo fissural Serra Geral está vinculado ao evento tectônico denominado Reativação Wealdeniana (ALMEIDA, 1980), Evento Sul Atlantiano (SCHOBENHAUS et alii, 1984) ou ainda à Reativação Mesozoica da Plataforma Sul-Americana.

Na realidade, o fenômeno da Ativação Tectono-Magmática da plataforma Sul-Americana teve início no Paleozoico Superior (final do Permiano), atingiu sua intensidade máxima no Mesozoico (Jurássico e Cretáceo) e finalmente se dissipou no Cenozoico (Terciário Inferior). (ALMEIDA, 1986).

Os efeitos desse fenômeno foram verificados nas mais diferentes áreas da Plataforma Sul Americana. Entretanto, foi principalmente na Bacia do Paraná, que apresenta a maior área de rochas ígneas continuamente expostas do país, que a referida atuação se fez sentir de modo mais intensivo e diversificado (ALMEIDA, op. cit.).

A bacia é dominada por elementos tectônicos lineares que se orientam em três direções preferenciais: NW-SE; NE-SW e E-W. No entanto, tem-se constatado que a direção dos diques de diabásio é, predominantemente, NW-SE. Evidentemente, admite-se, então, que as fissuras alimentadoras das lavas Serra Geral tenham apresentado, preferencialmente, a mesma atitude (ZALAN et alii, 1990).

As três mencionadas direções parecem estar associadas a grandes lineamentos verificados no embasamento e, provavelmente, desenvolvidos durante o ciclo Brasileiro (Proterozóico Superior-Ordoviciano). (ZALAN et alii, op. cit.).

1.3.2 - Natureza dos Esforços

As extensas descontinuidades NW que condicionam a subida, a partir do manto, de grandes volumes de magma, cruzam não somente o espesso pacote sedimentar da Bacia do Paraná, mas também seu embasamento. Embora as zonas de fraqueza NE, pré-existent, tenham sido brandamente reativadas, durante o vulcanismo Serra Geral, posteriormente a este evento sua reativação pode ter sido mais enérgica, em um ou mais episódios.

Normalmente, para os sistemas de diques inferem-se condições tectônicas exclusivamente tracionais. Entretanto, tensões compressivas podem ter se desenvolvido ao tempo do vulcanismo (SOARES, 1980; SOUZA Jr., 1986), imediatamente após (AMARAL et alii,

1983) ou mesmo a partir do oligoceno (HASUI et alii, 1989). Na análise de mapas aeromagnetométricos, seções sísmicas e nas atividades de campo, desenvolvidas por ZALAN et alii (1990) e MILANI et alii (1990), foram encontradas frequentes evidências de falhamentos transcorrentes tanto, nas zonas de falha NW, quanto nas de direção NE.

As zonas de fraqueza do embasamento, desenvolvidas no Ciclo Brasileiro e reativadas durante o vulcanismo mesozoico, parecem estar também associadas, atualmente, às principais manifestações sísmicas intraplaca, no Brasil e particularmente nas regiões sudeste e sul do país (DIAS NETO, 1986). O estudo dos sismos mais recentes tem demonstrado, que estes estão relacionados, preferencialmente, a falhamentos inversos e transcorrentes, indicando um estado de compressão, predominantemente horizontal para a litosfera brasileira (ASSUMPÇÃO et alii, 1985).

Na verdade, as antigas zonas de fraqueza ou descontinuidades NE e NW, foram reativadas recorrentemente, com graus variáveis de intensidade, durante toda história deposicional da Bacia do Paraná e até o presente. Os movimentos ao longo das referidas zonas de falha, tiveram componentes tanto verticais como horizontais (ZALAN et alii, op. cit.). Assim, os basaltos da Formação Serra Geral foram, provavelmente, afetados por um campo de tensões de natureza ora distensiva, ora compressiva.

Os mecanismos responsáveis pela geração de esforços de distensão e compressionais e as ocasiões em que estes atuaram, mais ou menos intensamente, na Bacia do Paraná, não são ainda bem compreendidos. Entretanto, na história geológica da bacia a partir do Cretáceo, importantes esclarecimentos a este respeito podem ser obtidos, por meio de um estudo envolvendo os seguintes aspectos:

1 - A definição do conjunto de blocos crustais, delimitados a partir de suturas ou antigas zonas de fraqueza situadas no embasamento subjacente à bacia;

2 - A provável interação de movimentos tectônicos, abrangendo: os esforços horizontais (tensões intraplaca), decorrentes da migração dos continentes Sul-Americano e Africano e; mais localizadamente, os deslocamentos verticais da bacia (soerguimentos e subsidências);

3 - A natureza das descontinuidades secundárias nos maciços basálticos da Formação Serra Geral; as rochas basálticas, por serem mais rijas comparativamente às sedimentares, comportam-se de maneira mais sensível às solicitações tectônicas;

4 - Análise comparativa, envolvendo a natureza dos mecanismos focais de sismos ocorridos na bacia e o estado natural de tensões, determinado por meio de ensaios “in situ”.

Relevante contribuição ao conhecimento da estruturação e evolução tectônica do território paulista, abrangendo os Estados vizinhos, é apresentada em HASUI et alii (1989). A integração de grande volume de informações geofísicas e geológicas tornou então possível a compartimentação estrutural mais detalhada que se dispõem da referida área. Este estudo constitui importante passo em direção ao objetivo estabelecido pelo item 1.

As movimentações verticais, regionais e/ou locais, envolvem megablocos, blocos e subblocos crustais, de maneira recorrente e por vezes inversa; as dúvidas quanto a estes movimentos terem se manifestado independentemente, ou não, dos esforços tangenciais intraplaca; são fatores, entre outros, que dificultam a referida análise interativa (item 2).

As rochas basálticas da Formação Serra Geral têm sido exaustivamente estudadas, nos últimos 30 anos, face às necessidades impostas pelos projetos de grandes barragens no sul do país. Consequentemente, o número e a diversidade dos dados até então obtidos é significativo, possibilitando assim a obtenção dos parâmetros requeridos pelo item 3, no presente contexto.

Um dos resultados mais surpreendentes revelados pelo estudo da natureza dos falhamentos, que cortam os maciços basálticos, é que estes apresentam evidências da atuação, predominante, de esforços compressionais. Nos estudos desenvolvidos por SOUZA JR. & CAMPOS (1987a, 1990a) e SOUZA JR. (1989), algumas ideias são apresentadas na tentativa de se harmonizar os aspectos 2 e 3.

Atualmente, geólogos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT vêm desenvolvendo pesquisas, que abrangem o aspecto 4 e os outros então mencionados, no sentido de compreender a natureza dos processos geológicos diretamente relacionados à mobilização intermitente das suturas crustais, desde o Pré-Cambriano até o presente. Recentemente, este campo de investigação tem sido denominado, pelo meio técnico internacional, de “paleosismicidade” (HASUI et alii, 1989). Este assunto será ainda considerado no Capítulo IV (item 2.2.2), no contexto do litótipo objeto do presente trabalho.

2. Compartimentação Geológico-Geotécnica

A oportunidade de se estudar, basálticas nas várias etapas de projeto pormenorizadamente, rochas de grandes barragens, na região sul e sudeste do Brasil, se repetiu por dezenas de vezes ao longo dos últimos 30 anos. O conhecimento que se tem, atualmente, a respeito das feições litológicas e estruturais dos derrames basálticos da Bacia do Paraná é, seguramente, o resultado do grande volume de dados obtidos durante este período.

A execução de inúmeras sondagens; a abertura de trincheiras, poços e galerias de investigação; a realização obrigatória de mapeamentos de detalhe, em extensas superfícies de rocha basáltica, utilizando-se escalas de até 1:50; são alguns dos fatores que tornaram possível, na ocasião, a identificação, descrição e delimitação precisa de um grande número de feições geológicas.

Verificou-se que a compartimentação litológica e estrutural tradicional de um derrame singular (núcleo de basalto compacto, basalto amigdaloidal e vesicular nos horizontes periféricos e, eventualmente, materiais interderrame), pode ser gradual ou bruscamente substituída, com certa frequência, por feições outras de caráter localizado ou mesmo atravessando o derrame por completo (Fig. I.7).

O perfil esquemático apresentado na Figura I.7, ao mesmo tempo que reúne, hipoteticamente, várias feições geológicas em um único derrame, contém algumas simplificações e estilizações. A título de exemplo, no que se refere a duas variedades litológicas sempre presentes em maciços basálticos, observa-se que:

- O litótipo basalto compacto, ou denso (I), na realidade, apresenta-se fraturado em diferentes graus e segundo, pelo menos, três padrões estruturais (SOUZA JR. & CAMPOS, 1986);
- As brechas basálticas (V) representam o principal litótipo interderrame, no entanto, sua presença já foi detectada no núcleo de alguns derrames, com dimensões e formas geométricas variáveis.
- A grande diversidade litológica verificada nas brechas corresponde, via de regra, ao tipo de matriz, de origem sedimentar (arenosa, siltosa e/ou argilosa) e/ou carbonática; eventualmente, ocorrem lavas aglomeráticas (“matriz” basáltica) e brechas piroclásticas.

figura I.7 - Seção esquemática reproduzindo as principais feições lito-estruturais encontradas em derrames basálticos da Bacia do Paraná

Quando se tem por objetivo o desenvolvimento de estudos de estabilidade, das fundações de estruturas de concreto, de usinas hidrelétricas de grande porte, espera-se uma correspondência entre a compartimentação lito-estrutural e a compartimentação geomecânica do maciço rochoso. Nas UHEs de Barra Bonita, Bariri, Promissão, Ibitinga e Jupia, entre outras, verificou-se a referida correspondência, sem maiores problemas.

Entretanto, a complexidade litológica e estrutural do maciço basáltico da UHE de Ilha Solteira, não permitiu o estabelecimento de um zoneamento geomecânico do maciço, com base unicamente em uma compartimentação geológica. Recorreu-se então, pela primeira vez, a outros dois parâmetros denominados “grau de alteração” e “grau de fraturamento”. A quantidade de intervalos destes 2 parâmetros, classificados em ordem decrescente quanto à qualidade, pode ainda variar de acordo com a complexidade geológica local e às necessidades da obra.

Associando-se as características geológicas aos parâmetros geotécnicos em questão, obtêm-se uma compartimentação ou classificação geológico-geotécnica. Este procedimento tem sido adotado, a partir da obra da UHE de Ilha Solteira, em vários projetos de grandes barragens em áreas basálticas (Fig.I.8). A análise deste quadro permite as seguintes considerações:

- Uma mesma litologia pode apresentar graus variáveis de alteração e fraturamento e, conseqüentemente, pertencer a diferentes classes de maciço ou,
- Uma mesma classe de maciço, por exemplo, a classe IV, pode ser praticamente definida a partir dos parâmetros geotécnicos, independentemente da litologia presente.

A adequada conjunção de feições geológicas e propriedades geotécnicas, que resulta na subdivisão do maciço em classes, torna possível a execução planejada de ensaios mecânicos “in situ” e laboratoriais e, finalmente, possibilita a elaboração do modelo geomecânico do maciço.

Na figura I.9, as propriedades geológico-geotécnicas de rochas basálticas estão associadas ao parâmetro geomecânico “módulo de deformabilidade”. As heterogeneidades litológicas e estruturais de algumas feições, ficam evidenciadas na acentuada discrepância dos valores do módulo de deformabilidade.

As notáveis diferenças nas propriedades mecânicas de feições geológicas, podem conduzir a sérios problemas de estabilidade. Basalto denso e bolsões de brecha basáltica argilosa,

apresentando módulos de deformabilidade de 20 GPa e 0.1 GPa, respectivamente, podem ter ocorrido no núcleo do derrame II, nas fundações da Barragem de Ilha Solteira.

A permeabilidade e resistência ao cisalhamento dos maciços basálticos, são parâmetros também grandemente influenciados pela maior ou menor heterogeneidade lito-estrutural. As descontinuidades sub-horizontais inter e intraderrames constituem, evidentemente, importantes feições condicionantes destas duas propriedades geotécnicas, quando se tem em consideração projetos de barragens de grande porte.

CLASSE	Nº DE FRATURAS POR METRO	ALTERAÇÃO	LITOLOGIA
I	2	ROCHA Sã A MEDIANAMENTE ALTERADA	BRECHA BASÁLTICA BASALTO VESICULAR BASALTO VESÍCULO-AMIGDALOIDAL BASALTO COMPACTO
II	2 a 10		
III	11 a 20		
III*	20		
IV		ROCHA MUITO ALTERADA	
V	FRATURAMENTO OBLITERADO	ROCHA EXTREMAMEN- TE ALTERADA	

Figura 1.8 - Classificação geológico-geotécnica do maciço basáltico de Porto Primavera (modif. de TRESSOLDI et alii, 1986)

FEIÇÃO LITO-ESTRUTURAL (*1)	PARÂMETROS GEOTÉCNICOS			LOCAL	AUTOR
	MÓDULO DE DEFORMABILIDADE "IN SITU" — (10 ⁻¹ GPa)	GRAU DE ALTERAÇÃO/GRAU DE FRATURAM. (A1 a A5) (F1 a F5)			
BASALTO "COMPACTO" (1)	200	A1/F2		ITAIPU	CAMARGO et alii 1978
BASALTO VESICULAR E/OU AMIGDALOIDAL (2)	3.5 - 186	A4/F5 - A1/F2		ILHA SOLTEIRA	RUIZ et alii 1976
BRECHA BASÁLTICA (5)	1 - 61 (a) (b)	a - Matriz argilosa b - Matriz silto-arenosa	A5/F5 A1-A2/F2	ITAIPU	
"BASALTO LEVE" (9)	4 - 12	BRECHA BASÁLTICA HIDRO-TERMAZILADA	"A4"/F2 - F5 "A3"/F3 - F4	PORTO PRIMAVERA	TRESSOLDI et alii 1986
ZONA DE TRANSIÇÃO (10)	15 - 150				
ESTRUTURA CIRCULAR (12)	20 - 50	Feição geológica extremamente heterogênea; alto grau de fraturamento: sistema radial e concêntrico de pequenas descontinuidades.			BJORNBERG et alii 1980

(*1) - Ver Figura I.7;

Figura I.9 - Características geotécnicas de algumas feições geológicas em maciços basálticos

3. Propriedades Tecnológicas

No interior do Estado de São Paulo, e nas regiões dos Estados sulinos pertencentes à Bacia do Paraná, ao lado dos diabásios, os basaltos têm sido exaustivamente explorados em dezenas de pedreiras, para sua utilização como material natural de construção civil.

Considerando, especificamente, o emprego de basaltos como agregado para concreto e em enrocamentos, nas várias obras de barragens de grande porte já construídas e em construção, atinge-se valores da ordem de dezenas de milhões de metros cúbicos. Esta maciça utilização e a correspondente necessidade de rigorosos controles de qualidade, tornou possível um amplo conhecimento das propriedades tecnológicas dos basaltos da Formação Serra Geral.

3.1. Principais Parâmetros Classificatórios

Para a utilização das rochas, em geral, como agregado na construção civil, torna-se necessária a quantificação de determinadas propriedades que condicionarão seu comportamento, perante as múltiplas solicitações impostas pelas obras de engenharia.

A Figura I.10 apresenta os resultados de caracterização tecnológica de basaltos do Estado de São Paulo. As propriedades consideradas são aquelas julgadas necessárias, quando se tem em vista as principais aplicações das rochas como material de construção (concreto, pavimento, lastro de vias férreas etc.).

A resistência mecânica dos basaltos considerando, evidentemente, aqueles de estrutura densa ou compacta, via de regra, situa-se no mesmo nível das rochas de resistência alta (100-200 MPa) a muita alta (> 200 MPa), segundo critério adotado na presente pesquisa, ao se classificar as rochas quanto a resistência à compressão uniaxial (ver Fig. IV.9).

A resistência à compressão simples corresponde ao parâmetro, convencionalmente, utilizado para a avaliação da resistência mecânica. Este parâmetro correlaciona-se razoavelmente com as principais solicitações mecânicas atuantes em rochas. No entanto, tendo em vista determinadas solicitações específicas às quais será submetido um agregado, dependendo da finalidade ou aplicação, recorre-se a outros ensaios que reproduzem aproximadamente tais solicitações (YOSHIDA et alii, 1972).

É assim que, rotineiramente, são realizados três outros ensaios de caracterização mecânica: Resistência á Abrasão Los Angeles; Resistência ao Impacto Treton e Resistência ao Esmagamento. Quanto menor forem estes valores, melhor a qualidade da rocha. A determinação, praticamente simultânea, de certos parâmetros físicos, como: Massa Específica Aparente, Absorção de água e Porosidade Aparente, também contribui na avaliação tecnológica de rochas.

Os histogramas de frequência dos 7 parâmetros tecnológicos, em apreço, são apresentados no anexo 1. Em análise de regressão linear, observando-se a matriz de correlação, onde os parâmetros são confrontados entre si, verifica-se que:

- Via de regra, as correlações revelam baixos graus de dependência estatística;
- Pelo fato de determinadas solicitações serem desenvolvidas, semelhantemente, durante os 3 ensaios de caracterização mecânica de agregados (Los Angeles, Treton e Esmagamento); seria razoável admitir a existência de forte correlação entre estes parâmetros; no entanto, o mais alto coeficiente de correlação obtido foi 0,43 (Los Angeles x Esmagamento);
- A única situação em que se verifica um alto coeficiente de dependência é quando são comparados os parâmetros Porosidade e Absorção; uma curva exponencial corresponde a função de melhor ajuste (Fig. I.11).

Para o emprego vantajoso de determinada rocha em construção civil, os valores dos parâmetros tecnológicos em questão deverão estar dentro de certos limites (IPT, 1980). Comparando-se estes valores com os valores médios da Figura I.10, verifica-se que os basaltos compactos se enquadram no grupo das rochas de comportamento tecnológico adequado.

A forma dos fragmentos constitui outro importante fator, na resistência mecânica dos agregados, para as diversas finalidades em obras civis. A forma aproximadamente cúbica, via de regra, é a mais desejável, e está presente em praticamente todas as 30 amostras de basaltos analisadas.

AMOSTRA	LOCAL	MASSA ESPECÍFICA (g/cm ³)	ABSORÇÃO (%)	POROSIDADE (%)	ABRASÃO LOS ANGELES (%)	IMPACTO TRETON (%)	ESMAGAMENTO (%)	COMPRESSÃO UNIAxIAL (MPa)	AUTOR
1	Pedreira S.João - Araçatuba	2.82	0.34	1.27	15	9	10	135	A
2	P.Araraquara - Araraquara	2.86	0.37	1.05	14	6	15	220	A
3	P.Bombarda - Araraquara	2.87	0.42	0.98	16	5	13	190	A
4	P.Morada do Sol - Araraquara	2.87	0.39	0.89	17	8	12	205	A
5	P.Fortuna - Assis	2.90	0.27	0.78	20	7	18	155	A
6	P.Antonio Silva - Assis	2.92	0.31	0.90	21	8	20	140	A
7	P.Botupedra - Botucatu	2.84	0.30	0.86	14	5	14	175	A
8	P.Belém de Vala - Botucatu	2.81	0.54	0.98	16	6	13	190	A
9	P.Carrascoza - Cravinhos	2.89	0.31	0.89	16	9	15	155	A
10	P.G.Gouveia - Dois Córregos	2.88	0.84	2.36	14	11	16	140	A
11	P.Jaboticabal - Jaboticabal	2.93	0.30	0.90	15	10	14	180	A

Figura I.10 - Quadro apresentando as principais propriedades tecnológicas de basaltos compactos do Estado de São Paulo - 30 amostras (histogramas de frequência: anexo 1)

AMOSTRA	LOCAL	MASSA ESPECÍFICA (g/cm ³)	ABSORÇÃO (%)	POROSIDADE (%)	ABRASÃO LOS ANGELES (%)	IMPACTO TRETON (%)	ESMAGAMENTO (%)	COMPRESSÃO UNIAXIAL (MPa)	AUTOR
12	Pedreira Jau - Jáu	2.82	0.75	2.10	18	5	16	135	A
13	P.Itaporã - Jáu	2.80	0.67	1.53	20	7	15	150	A
14	P.Rondon - Lençóis Paulista	2.91	0.38	1.12	16	5	13	170	A
15	P.Bandeirantes - Matão	2.92	0.30	0.89	17	7	18	125	A
16	P.G.Gouveia - Olímpia	3.27	0.84	2.75	14	7	14	175	A
17	P.Orlândia - Orlândia	2.88	0.22	0.63	15	9	15	114	A
18	P.Salmourão - Oswaldo Cruz	2.95	0.21	0.60	11	5	12	199	A
19	P.Colacy - Pederneiras	2.98	0.12	0.35	12	4	16	210	A
20	P.I.Paranapanema - Pirapozinho	2.96	0.38	1.11	13	6	12	185	A
21	P.S. Januário - Rancharia	2.92	0.32	0.93	17	6	16	156	A
22	P.São Paulo - Ribeirão Preto	2.72	0.41	0.94	19	6	14	120	A

Figura I.10 - Continuação

AMOSTRA	LOCAL	MASSA ESPECÍFICA (g/cm ³)	ABSORÇÃO (%)	POROSIDADE (%)	ABRASÃO LOS ANGELES (%)	IMPACTO TRETON (%)	ESMAGAMENTO (%)	COMPRESSÃO UNIA- XIAL (MPa)	AUTOR
23	Pedreira O. Terreri - Ribeirão Preto	2.71	0.37	1.01	17	8	15	105	A
24	P. Transfônica - São José do Rio Preto	2.86	0.71	2.03	13	8	14	185	A
25	P. S. Manuel - São Manuel	2.95	0.30	0.89	17	6	16	124	A
26	Barragem de Jupia	2.92	0.70	2.10	12	10	12	109	B
27	B. Barra Bonita	2.82	0.50	1.40	17	12	14	196	B
28	B. Capivara (Basalto "A")	2.90	1.50	7.80	15	9	10	151	C
29	B. Ilha Solteira	2.94	0.75	2.19	20	8	13	190	C
30	Serra de Brotas	2.83	0.84	2.36	14	11	16	198	C
AUTORES		Média	0.49	1.49	15.8	7.4	14.4	162.7	
A - IPT - (1980)									
B - RUIZ - (1966)		DESVIO	0.283	1.342	2.56	2.08	2.24	32.81	
C - YOSHIDA - (1972)		PADRÃO							

Figura I.10 - Continuação

Figura I.11 - Correlação estatística entre os parâmetros Porosidade Aparente e Absorção de Água (ver Fig. I.10)

3.2. Alterabilidade

A alterabilidade, isto é, a maior ou menor suscetibilidade que tem uma dada rocha à alteração, é importante fator na qualificação tecnológica de rochas. É por intermédio deste parâmetro que se tenta elucidar, ou mesmo prever, a não rara transformação de determinados basaltos compactos e sãos, em um material completamente desagregado, em questão de semanas. Trabalho de síntese, abordando este assunto, encontra-se em SOUZA JR. (1988).

A diminuição da resistência mecânica, dentre outras consequências inconvenientes para obras civis, é o resulta do inevitável da alteração intempérica das rochas. Assim, o reconhecimento prévio, dos possíveis mecanismos responsáveis por este processo degenerativo, é extremamente importante.

Estudos sistemáticos envolvendo exclusivamente rochas basálticas, revelaram a presença de 4 fatores diretamente relacionados ao processo de alteração: ocorrência de argilo-minerais em rocha sã (FARJALLAT, 1970, 1971 e 1972); microfissuramento ou porosidade; permeabilidade e confinamento (FARJALLAT, 1974 e 1975).

Evidentemente, quanto menor a permeabilidade e a porosidade, menor será a alterabilidade de uma determinada rocha. A influência dos argilo-minerais na alterabilidade é fator dependente da permeabilidade e estado microfissural da rocha. A natureza e origem dos argilo-minerais em rochas basálticas inalteradas, são aspectos abordados em ROISEMBERG et alii (1984). Confinamento lateral, mesmo que reduzido, pode influir grandemente no fechamento de microfissuras, principalmente quando se trata de basaltos mais compactos e menos permeáveis.

Ensaio visando a determinação de coeficientes de alterabilidade (k), com valores que variam de zero (resistência máxima) a um (suscetibilidade máxima à alteração), foram efetuados por FARJALLAT (1971) e YOSHIDA (1972). A integração dos parâmetros: permeabilidade, porosidade e alterabilidade, objetivando uma classificação tecnológica, especificamente de basaltos compactos, pode ser verificada no quadro da Figura I.12.

BASALTO COMPACTO AMOSTRAS (*)	PERMEABILIDADE (mdcy)	POROSIDADE (%)	ALTERABILIDADE	COEFICIENTE DE ALTERABILIDADE (K)	UTILIDADE EM ENGENHARIA CIVIL
OLÍMPIA (16)	0.027	1.43	FRACA	0.0085	0.01 > K > 0.001: Rochas seguramente aprovadas para materiais de construção em geral
SERRA DE BROTAS (29)	-	-	-	0.0088	
ILHA SOLTEIRA (30)	0.061	1.56	FRACA	0.0093	
CAPIVARA Basalto Tipo "A" (28)	0.159	2.18	MODERADA	0.0505	0.1 > K > 0.01: Rochas de características intermediárias, de emprego restrito

(*) - Ver Figura I.10

Figura I.12 - Alterabilidade de rochas basálticas em função da permeabilidade, porosidade, alterabilidade e classificação quanto ao emprego em obras civis (seg. FARJALLAT, 1975; YOSHIDA, 1972)

Finalmente, com base no oportuno trabalho de síntese, sobre alterabilidade de basaltos compactos (ou densos), elaborado por FRAZÃO e CARUSO (1983), conclui-se que:

- Os basaltos compactos mais alteráveis, são aqueles que apresentam maiores teores em argilo-minerais expansivos e grau de microfissuração mais elevado;
- Os basaltos compactos de coloração escura (pretos e cinza-escuros) apresentam em geral menor alterabilidade relativamente àqueles de coloração clara (cinza-claro) e/ou com pigmentações verdes (presença de argilo-minerais).

CAPÍTULO II

- COMPARTIMENTAÇÃO ESTRUTURAL “ENTABLAMENTO-COLUNATA” -

Na época do extravasamento das lavas da Formação Serra Geral, evidentemente, parte do magma proveniente das profundezas da crosta solidificou-se na forma de corpos intrusivos. Uma das consequências deste fato, refere-se a dificuldade de se definir determinadas rochas, quanto à sua origem extrusiva ou intrusiva.

Estudos comparativos, abrangendo as características mineralógicas e a natureza do diaclasamento primário, mostram-se insuficientes nesta análise discriminativa. Por outro lado, a natureza dos contatos litológicos, inferior e superior, que delimitam os corpos ígneos, nem sempre revelam aspectos esclarecedores; ou seja, tanto as soleiras de diabásio (ou dolerito) como os derrames basálticos, em determinadas sequências estratigráficas, situam-se entre camadas de arenitos da Formação Botucatu.

Nesse contexto, o entablamento, uma variedade estrutural dos basaltos, destaca-se proeminentemente. Sua origem, incontestavelmente, está vinculada ao processo de resfriamento de derrames de lava basáltica. As características geológicas do entablamento são notavelmente particulares, sendo possível sua identificação independentemente da escala adotada: micro ou macroscopicamente, ou ainda à nível de afloramento. As peculiaridades deste litótipo basáltico singular, certamente estão associadas a características geotécnicas igualmente específicas.

Em trabalho anterior (SOUZA JR. 1986), são apresentadas, pela primeira vez, as principais feições lito-estruturais do entablamento em maciços basálticos da Bacia do Paraná. Com exceção dessa primeira e sucinta abordagem, não se tem conhecimento de pesquisas em que o entablamento tenha sido estudado individualmente, tanto em termos geológicos como geotécnicos, no contexto dos basaltos da Formação Serra Geral. Neste sentido, objetivando análises mais profundas e conclusivas, reservou-se os capítulos III e IV onde o basalto em questão é considerado, respectivamente quanto às suas características geológicas e geotécnicas.

O entablamento, na realidade, está geneticamente ligado a uma outra feição estrutural denominada “colunata”. É por intermédio do estudo comparativo destas duas feições, que melhor se individualiza o entablamento. Assim, proceder-se-á, no presente capítulo, a uma breve descrição das principais definições e ocorrências, com ênfase nos basaltos do grupo Rio Columbia (noroeste dos E.U.A.), onde a compartimentação entablamento-colunata tem sido detalhadamente estudada.

1 - Sistemas de Diaclasamento Primário

Excetuando-se as porções periféricas de natureza vesicular e amigdaloidal, determinados derrames de lava basáltica apresentam interessante compartimentação estrutural. Verifica-se, nitidamente, a presença de dois sistemas de diaclasamento primário, completamente distintos.

Embora esta feição estrutural tenha sido identificada e documentada a partir do século XVII, o primeiro trabalho científico que se tem conhecimento, foi publicado por TOMKEIEFF (1940). Estudos posteriores, conduzidos por SPRY (1962), estabeleceram definitivamente as características básicas e a nomenclatura referentes aos compartimentos em questão.

O derrame hipotético da Figura II.1, reúne as principais características então definidas. Para a adequada compreensão deste perfil esquemático, alguns esclarecimentos são necessários:

- A colunata inferior, geralmente bem desenvolvida, destaca-se relativamente à colunata superior (zona pseudocolunar); no conjunto, o realce é então dado pela colunata inferior e o entablamento;
- Estes dois compartimentos, em uma primeira observação, evocam o estilo arquitetônico dos antigos templos gregos: fileiras de colunas na parte inferior (colunata), sustentando a porção superior (entablamento);
- O contato ou transição entre a colunata inferior e o entablamento, via de regra, é mais abrupto que entre este e a colunata superior;
- A colunata inferior é composta por colunas prismáticas regulares, com simetria predominantemente hexagonal e diâmetros em torno de 60 centímetros;
- A colunata superior, vez por outra sob a forma de colunas verdadeiras, apresenta diâmetros de 120 centímetros, em média, para as colunas individuais;
- O entablamento, em uma situação de extrema irregularidade, mostrou-se fragmentado em pequenos blocos à semelhança de “cacos de tijolo”; o aspecto colunar, quando presente, corresponde a delgadas colunas sinuosas e irregulares (diâmetros inferiores a 30 centímetros), em um arranjo aparentemente caótico;

Figura II.1 - Perfil esquemático indicando: os três compartimentos estruturais de um derrame basáltico (colunatas, inferior e superior, e entablamento); as unidades estruturais do entablamento (1 - chevron invertido, 2 - leque invertido, 3 - bacia, 4 - roseta, 5 - chevron, 6 - leque); as possíveis variações na espessura dos três compartimentos, com adelgaçamentos das colunatas superior (A) e inferior (B) e do entablamento (C). (adap. de TOMKIEFF, 1940 e SPRY, 1962)

- O diaclasamento colunar, visivelmente desordenado, do entablamento, pode ocultar determinados padrões simples de colunamento (estruturas 1 a 6), que se combinam de maneira regular ou irregular originando sistemas mais complexos;
- Em determinados derrames, um dos compartimentos pode estar ausente ou mesmo com a espessura bastante reduzida; nas posições A e B, as espessuras da colunata superior e inferior, respectivamente, são praticamente desprezíveis; a mesma tendência observa-se na posição c, no que diz respeito ao entablamento;
- Além das diferenças estruturais, um outro interessante aspecto merece ser considerado: o conteúdo em água é duas vezes superior no entablamento.

A análise química e a composição mineralógica, nada revelam que possa justificar a transição abrupta entre os referidos compartimentos e, muito menos, defini-la como contato entre derrames distintos. No entanto, a superfície que delimita a colunata inferior e o entablamento, comumente coincide com quebras de relevo, podendo então ser facilmente confundida com o contato entre dois diferentes derrames.

No modelo ora apresentado, estabeleceu-se a terminologia clássica, até hoje adotada, para os compartimentos em questão. No entanto, os argumentos referentes a origem desta compartimentação carecem de fundamentos mais consistentes, especialmente, no que diz respeito ao intenso fraturamento do entablamento e seu contato abrupto com a colunata.

No mecanismo de formação das três zonas estruturais, sugerido por TOMKEIEFF (1940), considera-se que na parte central do derrame (entablamento), sem qualquer interferência externa, ocorra uma aceleração das isothermas críticas (ou de fratura), que se movem das superfícies superior e inferior em direção ao centro.

A adoção simples e direta de tal mecanismo implicaria necessariamente na presença de entablamentos em todos os derrames. Em verdade, não se verifica esta situação nos bens estudados basaltos do Grupo Rio Colúmbia e, muito menos, nos derrames da Formação Serra Geral, onde o núcleo da grande maioria dos derrames, até então diretamente estudados, não corresponde a entablamentos.

Os estudos empreendidos por TOMKEIEFF (op. cit.) se concentraram na região de Antrin, Irlanda do Norte, onde se localiza a notável ocorrência “Giant's Causeway”, caracterizada pela presença de colunata formada por colunas excepcionalmente simétricas. A rocha local corresponde a um basalto toleítico de granulação fina, composto por plagioclásio, piroxênio (augita), opacos e matriz abundante (predomina material vítreo).

2. Basaltos do Grupo Rio Columbia

O Grupo Rio Colúmbia (E.U.A.) constitui um dos exemplos clássicos de vulcanismo fissural, do tipo continental. Os principais trabalhos de síntese sobre o assunto, são os seguintes: WATERS (1961); WRIGHT et alii (1973); SWANSON et alii (1979); SWANSON & WRIGHT (1981) e HOOPEN (1982).

Os derrames basálticos Rio Columbia foram excepcionalmente preservados por um clima semiárido; estão notavelmente dissecados, em estreitos e profundos “canyons”, pelo sistema fluvial Columbia-Snake. A acessibilidade e o estado menos alterado destes basaltos, possibilitaram detalhados e bem fundamentados estudos, mais que qualquer outro empreendido nos demais platôs basálticos do mundo (HOOPER, 1982).

O sistema entablamento-colunata ocorre frequentemente nos derrames então estudados. São vários os artigos, que se dedicam à descrição pormenorizada das feições ostentadas pela referida compartimentação estrutural. O Platô Columbia constitui, provavelmente, uma exceção, por apresentar uma alta proporção de derrames que exibem entablamentos, o que não tem sido verificado em outras províncias de derrames basálticos (LONG & WOOD, 1986).

O modelo geológico, recentemente estabelecido, que descreve o provável mecanismo gerador de entablamentos, está consistentemente alicerçado em uma série de fatores, facilmente identificáveis nos derrames Rio Columbia.

2.1 - Considerações Gerais

Os basaltos do Grupo Rio Columbia distribuem-se em vasta área, na porção noroeste da América do Norte, abrangendo o sudeste do Estado de Washington, norte de Oregon e oeste de Idaho (Fig. II.2). Correspondem a basaltos toleíticos, entretanto, localmente podem ocorrer andesitos e riolitos (SWANSON & WRIGHT, 1981).

A intensidade do correspondente evento magmático, desenvolvido à época do Mioceno, pode ser avaliada pela expressiva área abrangida (200.000 km²), onde foram acumulados 325.000 km³ de lavas basálticas (REIDEL, 1983; MANGAN et alii, 1986). Próximo ao centro do Platô Columbia verificou-se, por meio de dados de sondagem, espessuras em torno de 3.000 metros para o pacote de derrames basálticos (HOOPER, 1982).

Figura II.2 - Mapa da parte Noroeste da América do Norte, indicando a área abrangida pelos derrames basálticos do Grupo Rio Columbia. (seg. WATERS, 1961; MCDUGALL, 1976)

As fissuras condutoras de grandes volumes de lava, ou os atuais diques, concentram-se na porção leste da província e orientam-se segundo a direção NNW (SWANSON et alii, 1975 e 1981). No contexto da tectônica local, as mesmas fissuras deverão ser consideradas fraturas de extensão, tendo em vista seu paralelismo com a tensão, máxima principal, horizontal, atuante na mesma época. (CAMP & HOOPER, 1981; BARRASH et alii, 1983).

Os eventos tectônicos que afetaram a área, durante o Mioceno, estão associados a movimentos regionais envolvendo as placas litosféricas da América do Norte e Pacífico. Semelhantemente ao ocorrido na Bacia do Paraná, os basaltos do Platô Rio Columbia, foram deformados por reativação de falhas mais antigas e, são cortados por falhamentos normais, transcorrentes e inversos. Verificam-se em determinadas superfícies verticais, de cisalhamento, estrias de atrito horizontais sobrepostas a estrias verticais (BARRASH et alii, op. cit.).

O detalhamento geológico do Grupo Rio Columbia, desenvolvido ao longo de aproximadamente três décadas, possibilitou sua subdivisão estratigráfica em várias unidades, atingindo-se o nível de Membro, que pode corresponder, em algumas situações, a um único derrame. (Figura II.3).

Para a definição das 5 formações e os 14 membros, representados na coluna geológica da Figura II.3, foram necessários estudos meticulosos de 120 a 150 derrames, envolvendo determinados aspectos (HOOPER, 1982), a seguir apresentados:

- 1 - Características estruturais, à nível de afloramento, como: espessura e compartimentação entablamento-colunata;
- 2 - Presença de discordâncias erosivas e materiais sedimentares interderrames (tufos, conglomerados, arenitos etc.);
- 3 - Características petrográficas, onde se considerou, primordialmente, o tipo e quantidade de fenocristais;
- 4 - Composição química (elementos principais e acessórios); foram individualizados 31 tipos químicos (SWANSON & WRIGHT, 1981);
- 5 - Análises químicas de derrames e diques, tornando possível correlações precisas entre os derrames e suas respectivas fissuras alimentadoras;
- 6 - Estabelecimento de unidades magneto-estratigráficas, com base na polaridade magnética natural remanescente.

A partir desses 6 fatores, então apresentados, alguns pesquisadores lograram determinar a possança de Membros, considerados como derrames unitários (Figura II.4). O derrame Pomora, praticamente percorreu toda a província de leste a oeste, o que corresponde à impressionante distância de mais de 550 km.

SÉRIE		GRUPO	SUB-GRUPO	FORMAÇÃO	MEMBRO			
MIOCENO	SUPERIOR	COLUMBIA RIVER BASALT	YAKIMA BASALT	SADDLE MOUNTAINS BASALT	Lower Monumental			
					Ice Harbor			
					Buford			
	Elephant Mountain							
	Pomona							
	Esquatzel							
	Weissenfels Ridge							
	Asotin							
	Wilbur Creek							
	Umatila							
	WANAPUM BASALT			Priest Rapids				
				Roza				
				Frenchman Springs				
				Eckler Mountain				
	INFERIOR			GRANDE RONDE BASALT	Picture Gorge Basalt

Figura II.3 - Coluna estratigráfica do Grupo Basaltos Rio Columbia (simplif. de SWANSON et alii, 1979)

MEMBRO	ÁREA (Km ²)	VOLUME (Km ³)	ESPESSURA MÉDIA (m)	EXTENSÃO (Km)
ELEPHANT MOUNTAIN	10.350	103	10	-
POMONA	18.000	540	30	550
UMATILA	5.180	233	45	-
ROZA	40.000*	1.500	30	300

* Valor original estimado

Figura II.4 - Características gerais de alguns membros do sub-grupo Yakima (ver Figura II.3) pertencentes ao Grupo Basaltos Rio Columbia (seg. SCHMINCKE, 1967; SWANSON et alii, 1975; HOOPER, 1982)

Os extravasamentos dos derrames do Subgrupo Yakima, em geral, foram volumosos e extremamente rápidos. Admitem-se períodos de poucos dias (uma ou duas semanas, no máximo), para erupções envolvendo centenas de quilômetros cúbicos de lava (SWANSON et alii, 1975).

COMPOSIÇÃO QUÍMICA									
Si O ₂	Ti O ₂	Al ₂ O ₃	Fe O*	Mn O	Mg O	Ca O	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
51.59	2.44	14.63	12.56	0.20	5.21	8.99	2.70	1.12	0.56

* Fe O + 0.9 Fe₂ O₃

Figura II.5 - Composição química dos basaltos do Grupo Rio Columbia (valores médios obtidos a partir dos 31 tipos químicos de SWANSON & WRIGHT, 1981)

Duas outras características apresentadas pelos derrames basálticos Rio Colúmbia, assemelham-se significativamente aquelas, correspondentes, nos basaltos da Formação Serra Geral:

- 1 - A análise mineralógica revela os seguintes componentes: plagioclásio, piroxênios (augita e pigeonita), opacos e olivina (traços ou mesmo ausente); a matriz (vítrea), geralmente presente, pode atingir até 80% (vol.) da rocha;
- 2 - A composição química (Figura II.5) é notavelmente semelhante àquela verificada nos basaltos da Bacia do Paraná (ver Figura I.5).

As características estruturais que permitem a individualização de derrames basálticos, são muito variáveis. No entanto, o modelo estabelecido por SWANSON (1967), para os basaltos Yakima em uma área específica da província (Figura II.6), continua sendo, até o presente, a seção esquemática mais utilizada e representativa do Grupo Basaltos Rio Colúmbia.

2.2 - Aspectos Texturais e Estruturais

Nos Membros Umatila e Elephant Mountain da Formação Saddle Mountains (Figura II.3 e II.4), estudados detalhadamente por SCHMINCKE (1967), verifica-se que a abrupta transição da colunata inferior para o entablamento, é acompanhada por uma igualmente brusca mudança na textura.

Conforme o mesmo autor, a colunata caracteriza-se por apresentar maior granulação e porcentagem relativamente baixa (13%) de matriz vítrea (textura hipocristalina). O entablamento corresponde a um basalto praticamente vítreo, onde a abundante matriz (73%) envolve minúsculos cristais de plagioclásio e piroxênio (textura hialopilitica).

Estudando o extenso Subgrupo Yakima, SWANSON (1967) obteve praticamente os mesmos resultados. O entablamento, correspondendo de 70 a 80% da espessura total dos derrames, em média, apresenta granulação mais fina (vítrea), comparativamente à colunata, implicando em uma história de resfriamento e solidificação bem mais rápida.

O núcleo de um derrame ostentando uma textura relativamente mais vítrea, constitui, aparentemente, uma situação paradoxal. À princípio, espera-se que as taxas de resfriamento, nas margens de um derrame, sejam maiores que aquelas desenvolvidas no seu interior.

Por outro lado, em todos os artigos da vasta bibliografia disponível, onde os basaltos do extenso Platô Rio Columbia estão minuciosamente caracterizados, não se verifica nenhuma evidência, geoquímica ou petrológica, que explique as marcantes diferenças texturais e estruturais entre entablamentos e colunatas.

Sendo assim, deverão ser consideradas determinados fatores paleoambientais, em pesquisas objetivando o esclarecimento do enigma em questão. Finalmente, a solução do problema favorecerá a elaboração de modelo representativo do fenômeno.

2.2.1 - Fatores Paleoambientais

A porção basal do derrame-modelo, apresentado na Figura II.6, é constituída por espiráculos e lavas “em almofadas”, que são muito frequentes nos derrames Rio Columbia. O estudo destas feições geológicas, quanto à gênese, permite o estabelecimento de algumas situações paleoclimáticas. Extensos derrames escoando sobre pântanos ou brejos, teriam

também, em determinadas condições, ocasionado a ruptura da drenagem pré-existente (WATERS, 1960).

Assim, “explosões” de vapor resultantes da presença de sedimentos saturados de água, sob o derrame, teriam originado os espiráculos. Por outro lado, o represamento de cursos d’água pelo corpo de lava que avança, teria possibilitado a penetração de derrame posterior no extenso lago então formado, preenchendo-o com um complexo de lavas “em almofadas”.

Estruturas circulares, representando emissões secundárias de lava, foram identificadas no Membro Roza do Grupo Rio Columbia. As 100 estruturas individualizadas, e não alinhadas, estão associadas ao entablamento. Nas considerações sobre sua origem, evoca-se também a existência de água em subsolo saturado, com rápida elevação do nível freático em depressão topográfica preenchida pelo derrame de lava (McKEE & STRADLING, 1970; HODGES, 1978).

Espiráculos, lavas “em almofadas” (“pillow-lava”) e estruturas circulares, foram igualmente identificadas em determinados derrames basálticos na Formação Serra Geral (ver Figura I.7 – item 2 do capítulo anterior).

O fator comum nos mecanismos geradores das referidas feições lito-estruturais (presença de águas de superfície), está igualmente vinculado à gênese dos materiais interderrame do Grupo Rio Columbia. Os sedimentos depositados entre os sucessivos derrames são, comumente, de origem fluvial e/ou lacustre. (CAMP, 1981; MANGAN et alii, 1986).

Eventos tectônicos, ocorridos contemporaneamente ao extravasamento dos derrames Rio Columbia, estão nitidamente patenteados nas bruscas mudanças de espessura dos derrames e materiais sedimentares depositados entre estes. Consequentemente, admite-se uma paleotopografia muito acidentada ou montanhosa (SWANSON, 1967; CAMP & HOOPER, 1981).

Assim, é razoável admitir-se um paleoambiente onde ocorreram chuvas torrenciais, escoamentos fluviais e formação de extensos lagos, de até 30m de profundidade, represados naturalmente pelo próprio escoamento, dos derrames, associado a elevações paleotopográficas. Em algumas situações, a água represada e em ascensão encobriu ou mesmo fluiu sobre derrames estacionados, em processos de solidificação (SWANSON, 1967; SWANSON & WRIGHT, 1981; CAMP, 1981).

2.2.2 - Modelo de Gênese

O mecanismo gerador da compartimentação entablamento colunata começa a ser delineado, a partir do instante em que se considera a interferência das referidas águas de superfície, no interior do derrame de lava, durante sua história de resfriamento.

A primeira abordagem, neste sentido, foi apresentada por SAEMUNDSON (apud BJORNSON et alii, 1982), em 1970, ao estudar os derrames basálticos da Islândia. Associou-se então, pela primeira vez, o fator “inundação” a uma particular ocorrência de entablamento. Neste caso, os derrames solidificaram-se, em vales ou “canyons”, sob águas fluviais represadas.

Interpretações mais específicas foram efetuadas por JUSTUS (1978), a partir da análise das feições geométricas do diaclasamento, irregularmente colunar, ostentado pelo entablamento:

- Em fase inicial de resfriamento (lento), admite-se a solidificação parcial do derrame em suas porções periféricas (colunatas superior e inferior);
- Posteriormente, estando agora o derrame submerso, a água penetra em seu interior, através das diáclases subverticais da colunata superior; inicia-se então um rápido processo de resfriamento e, conseqüente formação de densa rede de fraturas irregulares à incipientemente colunares (entablamento).

O fenômeno de resfriamento diferenciado em derrames de lava submersos, verificou-se, “in situ”, por ocasião da erupção “Heimaey”, na Islândia, em 1973 (BJORNSON et alii, 1982). Água, em grande quantidade, foi bombeada sobre o derrame de lava, na tentativa de impedir seu fluxo e desviá-lo para fora do povoado local. A área submetida a este processo (7.000 m²) ficou envolvida por vapor d'água.

Furos de sondagem revelaram, posteriormente, que após duas semanas de “irrigação”, a solidificação da lava havia progredido até a profundidade de, aproximadamente, 12 metros. Esta impressionante velocidade de resfriamento corresponde, em verdade, a uma taxa de propagação, da frente de solidificação, de 90 centímetros por dia.

Após a completa consolidação da lava, procedeu-se à sua escavação, quando então constatou-se significativas diferenças estruturais, entre o horizonte do corpo de lava afetado pela água e aquele imediatamente inferior:

- A porção inferior, caracterizou-se por apresentar fraturas largamente espaçadas;
- A rocha do compartimento superior encontrava-se intensamente fraturada e fragmentada, em pequenos blocos de 10 a 20 centímetros de diâmetro, à semelhança do entablamento.

Com base em todas estas evidências, LONG & WOOD (1986) estabeleceram o mecanismo mais provável para a origem de entablamentos e colunatas, no interior de derrames de lava basáltica. Elaborou-se então um modelo numérico para se determinar, com precisão, os efeitos da penetração de água em derrame, recém-imobilizado, que se resfria. Este modelo abrange os seguintes fatores, relacionados especificamente à formação de entablamentos:

- 1 - Ambiente subtropical com chuvas extremamente fortes;
- 2 - Considerável escoamento de água e desenvolvimento de pequenos e extensos lagos naturais;
- 3 - Derrame de lava invadindo rapidamente vales fluviais e lagos;
- 4 - Rompimento do sistema de drenagem local e represamentos;
- 5 - Inundação ou estabelecimento de extenso lago sobre o topo do derrame, estacionado e, em fase inicial de consolidação;
- 6 - Migração descendente de água através de fissuras do horizonte já solidificado;
- 7 - Fase de rápido resfriamento, desenvolvida sempre de maneira descendente.

No entanto, o entablamento não está presente em alguns derrames e, em outros, encontra-se intercalado a colunatas "internas". Assim, os 7 fatores mencionados, especialmente os 4 últimos, estão ausentes ou mesmo ocorrem intermitentemente. As possíveis situações, decorrentes de variações paleoclimáticas, correspondem, no modelo então concebido, às três condições exemplificadas na Figura II.7 e descritas a seguir:

Derrames Tipo I

Os derrames tipo I, relativamente delgados (10 a 30 metros de espessura) e posicionados em paleodeclives, não foram capazes de romper possíveis sistemas de drenagem e, consequentemente, não foram inundados: ou ainda, seu extravasamento coincidiu com condições superficiais de clima seco.

Assim, são constituídos por colunata altamente irregular, cujas colunas apresentam diâmetros que variam de um a dois metros. O entablamento está então, neste caso, sempre ausente.

Este tipo de derrame de um só compartimento estrutural, apresenta grande persistência textural ao longo de qualquer seção vertical. Em análise petrográfica, predominam as texturas intergranular e intersertal.

Derrames Tipo II

A repetição de entablamentos e colunatas, resultando em até 9 compartimentos (ver Figura II.9), está associada a múltiplos eventos de inundação alternados por períodos de seca.

Para os 5 compartimentos, representados na Figura II.7 a história da consolidação do derrame pode ser perfeitamente compreendida, observando-se, hipoteticamente, os movimentos das frentes de solidificação superior e inferior:

- 1 - Antes de o derrame ser inundado, 25% da lava se solidifica, formando a colunata superior e parte da colunata inferior;
- 2 - A frente de solidificação superior do derrame, agora submerso, avança rapidamente de cima para baixo, originando o entablamento “superior”;
- 3 - Na mesma etapa, a frente de solidificação inferior avança lentamente, de baixo para cima, promovendo um pequeno acréscimo à colunata inferior;
- 4 - A etapa seguinte, caracterizada por um “período de seca”, ou não influxo de água, provoca a redução de velocidade da frente de solidificação superior; consequentemente, forma-se a colunata “interna”;
- 5 - Nesta etapa, considerando-se o correspondente aumento da colunata inferior, 75% da lava já se transformou em rocha basáltica;
- 6 - Nova inundação acelera mais uma vez a isoterma superior de fraturamento, desenvolvendo então o entablamento “inferior”.

7 - Finalmente, as frentes de solidificação, superior e inferior, encontram-se no contato entablamento inferior/colunata inferior.

Nos derrames tipo II, com espessuras de 45 a 76 metros, a distinção entre entablamentos e colunatas é grandemente facilitada, quando são considerados determinados aspectos texturais. As colunatas apresentam textura intersertal a intergranular, enquanto os entablamentos correspondem a basaltos sub-hialofíticos. A quantidade de matriz vítrea nos entablamentos (35 a 65%) é bem maior, comparativamente à colunata (15 a 25%).

Derrames Tipo III

Na terceira situação, estabelecida pelo modelo, a etapa inicial de consolidação (25%) pode assemelhar-se à etapa correspondente nos derrames tipo II. No entanto, em alguns casos, a colunata superior não está presente, indicando que a penetração de água, no topo do derrame, ocorreu imediatamente após o estabelecimento do processo de solidificação da lava.

A permanência de águas fluviais ou lacustres sobre o derrame, até que se complete sua solidificação, evidencia-se, conforme o modelo em questão, ao verificar-se: a ausência de colunatas “internas” e a grande espessura do único e bem definido entablamento.

Os derrames tipo III (ver Figura II.6), apresentam espessuras que variam de 30 a 80 metros. Em análise comparativa, ao considerar-se uma espessura padrão para os três tipos de derrame (Figura II.7), verifica-se que o tipo III:

- Completa sua solidificação em um menor período;
- Apresenta as maiores e menores espessuras, respectivamente, para o entablamento e colunata inferior.

Segmentos de Junta Colunar

Segmentos sub-horizontais, verificados em superfícies de juntas colunares, foram interpretados por RYAN & SAMMIS (1978) como: o registro do avanço progressivo ou as sucessivas etapas de desenvolvimento da própria junta, em lavas basálticas que se resfriam.

A identificação e o significado de determinados aspectos geométricos destes segmentos, confirmam o processo de desenvolvimento ascendente das juntas colunares, a partir da base do derrame, em colunatas. O mesmo fenômeno pode ser observado em ensaios laboratoriais, utilizando-se ligas de alumínio e materiais poliméricos.

Os estudos desenvolvidos por DeGRAFF & AYDIN (1987), AYDIN & DeGRAFF (1988) e DeGRAFF et alii (1989), acrescentam mais detalhes ao processo e confirmam a hipótese inicialmente elaborada por RYAN & SAMMIS (op. cit.). A Figura II.8 ilustra as principais características do fenômeno em apreço e, de sua análise extrai-se as seguintes considerações:

- 1 - As bandas ou segmentos, orientados perpendicularmente ao eixo das colunas, apresentam as seguintes dimensões: largura de 3 a 23 centímetros e comprimento de 20 a 100 centímetros;
- 2 - A superfície de cada segmento, se observada atentamente, revelará a presença de delicadas feições geométricas, na forma de estrias de baixo relevo, encurvadas, denominadas estruturas “em pluma” (HODGSON, 1961; POLLARD & AYDIN, 1988);
- 3 - A identificação da estrutura "em pluma", possibilita a definição do ponto de partida e trajetória de propagação das bandas, individualmente;
- 4 - Na colunata inferior, todos os pontos de origem estão localizados junto ao limite inferior dos segmentos e, indicam que estes propagam-se lateralmente;
- 5 - A sucessiva propagação ou formação das bandas, perpendicularmente ao eixo da coluna, corresponde, na realidade, a um desenvolvimento ascendente da junta;
- 6 - A borda inferior dos segmentos, quando curva, sempre apresenta a forma de um “J” vertical, se observada em perfil;
- 7 - Indicadores direcionais verificados em compartimentos sobrepostos à colunata inferior (entablamentos e colunatas internas), obedecem a mesma regra; porém, o perfil das bordas curvas, localizadas, neste caso, no limite superior dos segmentos, corresponderia a um “J” invertido (desenvolvimento descendente da junta).

Este mecanismo de propagação das juntas colunares, confirma o processo de desenvolvimento de entablamentos e colunatas, estabelecido no modelo de LONG & WOOD (1986). Constitui ainda, importante fator na elucidação estratigráfica de derrames, ao se deparar com exposições isoladas ou incompletas de lavas colunares; por exemplo, na definição da posição relativa da colunata (inferior ou interna).

Níveis Vesiculares

Níveis ou zonas vesiculares, via de regra, situam-se nas porções periféricas de derrames basálticos (ver Figura II.6). Entretanto, excepcionalmente, o núcleo (entablamento) de espessos derrames pode apresentar faixas contínuas de macro e microvesículas, com persistência lateral de até 30 quilômetros (McMILLAN et alii, 1987 e 1989).

As intercalações de basalto compacto e níveis vesiculares, correspondem à presença de hiatos na exsolução de vapor d'água da lava. Os contatos superior e inferior de uma determinada zona vesicular, com o basalto compacto, é abrupto e gradacional, respectivamente.

A natureza dos referidos contatos, aponta para o mesmo mecanismo de consolidação de lavas defendido por LONG & WOOD (1986). O fenômeno, reproduzido em modelo numérico, considera: o movimento ascendente de níveis de bolha em derrame de lava, sendo interceptado ou paralisado pela passagem descendente da frente de solidificação superior. As frentes superior e inferior de consolidação da lava encontrar-se-ão, finalmente, em uma profundidade equivalente a 80% da espessura total do derrame.

2.3. Características Geológico-Geotécnicas

A vasta bibliografia consultada, referente aos basaltos do Grupo Rio Columbia, não revela estudos específicos de caracterização tecnológica, em abordagem diferenciada ou comparativa, envolvendo o material rochoso, componente de entablamentos e colunatas, como material de construção civil.

Em trabalho alusivo ao assunto (HIGGS, 1976), considera-se exclusivamente a alterabilidade dos basaltos Rio Columbia, face à presença de argilo-minerais expansivos, sem a referida discriminação estrutural.

Propriedades geológicas e geomecânicas de entablamentos e colunatas foram determinadas, por intermédio de um grande número de ensaios laboratoriais e "in situ", em duas situações específicas:

- Projeto de extensa obra subterrânea para armazenagem de rejeitos radioativos;
- Projetos de implantação de grandes barragens na bacia do Rio Columbia.

2.3.1. Projeto para Armazenagem Subterrânea de Rejeitos Nucleares

O projeto, coordenado pelo Departamento de Energia dos EUA, iniciou-se em 1976, com previsão de custos em torno de trinta bilhões de dólares, devendo ser concluído em 1998. Os nove locais, previamente considerados como adequados à disposição de rejeitos radioativos, compreendem, em realidade, apenas 4 tipos litológicos: basaltos, evaporitos, tufos e granitos. (ERIKSSON, 1986).

Os estudos de caracterização geológica e geotécnica, desenvolvidos em 6 etapas, são extremamente minuciosos, semelhantes àqueles normalmente requeridos em projetos de usinas nucleares. Abrangem ainda a hidrogeologia, hidrogeoquímica e nos ensaios geomecânicos considera-se a influência do confinamento, da temperatura e do tempo (RUSSEL et alii, 1984; CAMPBELL, 1987).

Na concepção preliminar do reservatório, em basalto, as dimensões são impressionantes: a cavidade subterrânea deverá apresentar uma largura de 1700 metros e comprimento de 3400 metros, a uma profundidade de 100 metros (ABRAMSON e SCHIMDT, 1984).

Para o desenvolvimento de pesquisas visando rochas basálticas, selecionou-se um local específico (Hanford) próximo a Richland, no Estado de Washington. Na investigação geológica de subsuperfície, através de furos de sondagem, tendo em vista a profundidade requerida pelo projeto, identificaram-se 4 derrames (KIM & Me CABE, 1984).

Derrame Cohassett

Os 4 derrames então selecionados apresentam adequada espessura e núcleos de basalto denso, com grande persistência lateral. Entretanto, dentre estes, optou-se pelo espesso derrame denominado “Cohassett”.

O derrame Cohassett pertence à Formação Grande Ronde; sua exata posição estratigráfica foi definida por LANDON & LONG (1989). O conhecimento, pormenorizado, da sequência estratigráfica dos derrames Rio Columbia, tornou possível o desenvolvimento de estudos paralelos, em outros locais onde tal derrame aflora.

O modelo genético estabelecido por LONG & WOOD (1986), com base nas características estruturais e petrográficas de entablamentos e colunatas, foi aplicado ao derrame Cohassett. Na Figura II.9a, a seção esquemática deste derrame revela a presença de nove compartimentos estruturais, originados segundo o mesmo critério definido para os derrames tipo II (ver Figura II.7).

Figura II.9 - Características geológicas e geotécnicas do derrame Cohasset (Formação Grande Ronde - Grupo Rio Columbia).

a - Estilos de junta colunar em nove compartimentos, onde se alternam: entablamentos (E), colunatas (C) e entablamentos colunares (EC); setas indicam a interface de encontro das frentes de solidificação superior e inferior; trecho pontilhado (34-45 m) corresponde à zona vesicular; BB: brecha basáltica (seg. De GRAFF et alii, 1989).

b - Propriedades geológica-geotécnicas (seg. KIM & McCABE, 1984).

No derrame em questão, nota-se a presença de dois compartimentos com características intermediárias (entablamento colunar). Verifica-se ainda, que a frente de solidificação inferior foi responsável por apenas 20% (colunata inferior) da consolidação total do derrame.

Os resultados preliminares da caracterização geotécnica do basalto denso que será exposto nas escavações subterrâneas, indicam que o núcleo do derrame Cohassett é composto por rocha altamente resistente e apresenta baixa permeabilidade (KIM & Me CABE, 1984)

Os valores médios dos parâmetros geomecânicos de amostras de rocha intacta do entablamento e da colunata (Fig. II.9b), demonstram que o material rochoso do entablamento é algo mais resistente e, mecanicamente, mais homogêneo, relativamente à colunata.

Nos resultados obtidos pelo parâmetro “grau de faturamento”, verifica-se sensível diferença ao comparar-se, os valores do entablamento e da colunata. Constata-se ainda resultados distintos, para o mesmo parâmetro, ao confrontar-se os valores encontrados em afloramentos com aqueles determinados em testemunhos de sondagem.

Evidentemente, espera-se um maior grau de fraturamento para o entablamento, relativamente à colunata. As medidas em afloramentos e testemunhos de sondagem foram, possivelmente, efetuadas no sentido horizontal e vertical, respectivamente; os resultados colocariam então em evidência o comportamento anisotrópico do derrame Cohassett, quanto ao diaclasamento primário.

A qualidade do maciço basáltico Cohassett, determinada em função do intervalo dos valores de RQD, conforme a classificação estabelecida por DEERE (1968) é considerada satisfatória a boa.

Membro Pomona (Derrame Inferior)

Ensaio “in situ”, simulando solicitações termomecânicas, foram efetuados na mesma localidade (Hanford), porém em uma profundidade inferior (45 metros), onde ocorre o Membro Pomona da Formação Saddle Mountains. Paralelamente, realizaram-se ensaios de caracterização geotécnica (HOCKING et alii, 1990).

O maciço basáltico local, minuciosamente estudado, corresponde, na verdade, ao espesso entablamento do derrame inferior - Membro Pomona (derrame tipo III - ver Figura II.6). O levantamento geológico das juntas subverticais e sub-horizontais, revelou a ausência de direções

preferenciais; entretanto, considerando-se o estilo geométrico destas juntas, verifica-se a presença de 3 famílias distintas:

- Juntas com alto ângulo de mergulho ($66-90^\circ$), correspondem às faces das colunas e perfazem 47% do total.
- Juntas descontínuas, de baixo ângulo de mergulho ($0-37^\circ$), são limitadas pelas colunas e apresentam menor frequência (30%).
- Juntas com inclinação intermediária ($38-65^\circ$), igualmente confinadas pelas faces colunares, são menos abundantes (23%).

A análise dos três grupos de fraturas, então identificados, revela que as juntas colunares subverticais (mergulho de $66-90^\circ$) são mais contínuas e abundantes, relativamente às sub-horizontais. Esta disposição espacial do diaclasamento primário, no entablamento, confere ao maciço o comportamento denominado “transversalmente isotrópico”, com eixo de simetria vertical.

Determinou-se ainda, o grau de fraturamento (15 juntas/metro), o parâmetro RQD (46), os fatores RMR (65) e Q (15), e o módulo de deformabilidade (30 GPa). Os valores de RMR e Q, segundo BIENIAWSKI (1979), e BARTON (1974), situam o entablamento, em apreço, no campo dos maciços rochosos de boa qualidade. O módulo de deformabilidade foi calculado indiretamente, conforme a formulação empírica de BIENIAWSKI (1978).

2.3.2. Projetos de Barragens e Reservatórios

A Bacia do Rio Columbia e afluentes, onde foram implantadas várias barragens, está localizada em área de clima árido. Comumente, o nível freático nas imediações dos reservatórios, encontra-se abaixo do nível do lago (MONAHAN, 1969). Consequentemente, na caracterização geológico-geotécnica de determinado maciço basáltico, destaca-se a importância da definição de seu comportamento hidrogeotécnico.

Detalhados estudos, têm indicado que os derrames de lava são altamente anisotrópicos, quanto à permeabilidade. A execução de inúmeros ensaios em furos de sondagem tem demonstrado que, à semelhança dos derrames basálticos da Formação Serra Geral, a permeabilidade é muito maior na zona de contato, relativamente ao núcleo dos derrames. Derrames espessos, via de regra, são impermeáveis em sua porção central (MONAHAN, op. cit.).

Analisando os vários exemplos disponíveis, no que diz respeito à estanqueidade de reservatórios em áreas basálticas, o referido autor conclui que: são raros os casos de insucesso, enquanto a lista de exemplos bem-sucedidos é extensa.

Nas fundações da Barragem de “Boardman” (Oregon), em um dos afluentes do Rio Columbia ocorre o entablamento do derrame Pomona, que apresentou permeabilidade relativamente baixa (PEACOCK & ARNOLD, 1985).

3. Conclusões

As marcantes feições que caracterizam o entablamento, diferenciado-o relativamente à colunata, são facilmente compreendidas, ao se adotar um modelo geológico que considere determinada situação paleoambiental.

As condições paleogeográficas e paleoclimáticas, na região noroeste dos Estados Unidos da América, durante o Mioceno, foram comprovadamente propícias à inundação de derrames, recém-extravassados, do Grupo do Rio Columbia (DeGRAFF et alii, 1989).

A identificação e confirmação do mecanismo originador de entablamentos e colunatas, então apresentados, fundamentam-se em diversos fatores (estruturais, texturais, petrográficos, etc.). Assim, o modelo inicialmente proposto por LONG & WOOD (1986) tem se mostrado, até então, suficientemente consistente.

No que se refere às características geotécnicas destes basaltos, considerando-se especificamente o entablamento, verifica-se uma interessante situação. A rocha, ainda que intensamente fraturada, corresponde a um maciço de boa qualidade geotécnica, cuja permeabilidade é extremamente baixa (KHALEEL, 1989). Os pequenos blocos de material rochoso, delimitados pela densa rede de juntas, apresentam elevada resistência mecânica.

Para a utilização dos resultados da caracterização geotécnica do entablamento, do Grupo Rio Columbia, em análise comparativa com o “mesmo” litótipo identificado, à princípio, na Formação Serra Geral, torna-se necessário, antes de tudo, a verificação das semelhanças, em termos geológicos. A correspondência quanto aos aspectos texturais e estruturais, já se constatou em pesquisa anterior (SOUZA JR., 1986). Entretanto, com respeito a origem do entablamento, indefinida no contexto da Formação Serra Geral, estudos comparativos legítimos não podem ainda ser efetuados. Assim, necessariamente, deverão ser identificadas, na Bacia do Paraná, na época do evento Serra Geral, fatores paleoambientais propícios a formação de entablamentos.

CAPÍTULO III

- O ENTABLAMENTO NA FORMAÇÃO SERRA GERAL: ASPECTOS GENÉTICOS -

A compartimentação entablamento-colunata, nos derrames basálticos da Formação Serra Geral, foi primeiramente observada (07/02/1985) no extenso corte da pedreira da prefeitura do município de Jaú (SP) - Figura III.1a, em pesquisa desenvolvida por SOUZA JR. (1986).

Em estudos posteriores do autor, verificou-se que a colunata, quando presente, revela um diaclasamento irregularmente colunar semelhante àquele apresentado pelos derrames basálticos típicos da bacia onde não se formaram entablamentos.

Por outro lado, determinadas feições texturais e estruturais do entablamento, facilmente identificáveis, possibilitam sua perfeita individualização. Justifica-se assim um estudo voltado preferencialmente a este compartimento, cujas várias exposições são suficientes para a definição de suas principais características.

Os inúmeros estudos petrológicos, desenvolvidos até o presente, mostram-se inadequados quando se tem por objetivo o reconhecimento desta feição estrutural singular. Não se verificam diferenças, na composição química e mineralógica, entre o entablamento e o núcleo de outros derrames com características estruturais notavelmente distintas.

Assim, proceder-se-á neste capítulo, à descrição das principais feições texturais e estruturais do entablamento e à verificação da provável ligação entre estas feições e o modelo de gênese, estabelecido por LONG & WOOD (1986) e, aplicado pela primeira vez aos derrames basálticos da Formação Serra Geral.

1. Afloramentos Estudados

Extenso vulcanismo basáltico fissural, tipo continental, associado a materiais sedimentares interderrames, caracterizam tanto a Formação Serra Geral como o Grupo Rio Columbia. As semelhanças na composição química e mineralógica são notáveis. Entretanto, a natureza do diaclasamento primário, nos derrames das duas províncias, revela significativas diferenças.

Os derrames basálticos com diaclasamento irregular, e desprovidos de entablamentos, são predominantes na Bacia do Paraná (ver Fig. I.6b) e correspondem aos maciços ordinários, na classificação apresentada por SOUZA JR. (1986). O mesmo tipo estrutural, menos frequente no

Os Derrames Tipos II e III, mais abundantes no Grupo Rio Columbia, apresentam entablamentos e colunatas, via de regra, bem desenvolvidos e de fácil reconhecimento. O mesmo não ocorre nos basaltos do Brasil meridional; a compartimentação entablamento-colunata, ou maciço bidiferenciado conforme SOUZA JR. (op. cit.), raramente é observada.

Nos estudos desenvolvidos por este autor, no Estado de São Paulo, verifica-se apenas uma ocorrência em que a compartimentação estrutural clássica (ver Figura II.6) apresenta-se com nitidez (ver Fig. III.1a). Neste afloramento, a compartimentação colunata superior-entablamento-colunata inferior, confere ao maciço as mesmas características estabelecidas para os Derrames Tipo III (ver Figura II.7), na classificação de LONG & WOOD (op. cit.). Na Figura III.1b e 1c observa-se ainda, claramente, as diferenças texturais entre o entablamento e a colunata.

A dificuldade de se reconhecer maciços bidiferenciados, na Bacia do Paraná, reside nos seguintes fatores:

- Colunatas inferiores pouco desenvolvidas ou mesmo ausentes;
- A escassez de afloramentos suficientemente extensos para expor ambos os compartimentos;
- A exploração preferencial do entablamento, em pedreiras de grande porte, em razão das facilidades nos processos de desmonte e britagem;
- A difícil distinção entre colunatas (quando afloram isoladamente) e os já referidos maciços ordinários; o diaclasamento, irregularmente colunar, em ambos os casos é semelhante.

Os afloramentos até então identificados na Figura III. 2, correspondem, com exceção dos quatro primeiros (o nº 1 já ilustrado na Figura III .1a), a entablamentos típicos. Assim, por razões de ordem prática e de interesse acadêmico, as considerações desenvolvidas a seguir têm por objetivo, unicamente, a caracterização do entablamento.

AFLORAMENTO	LOCAL
1- Pedreira-Prefeitura	Município de Jauú-SP
2- Derrame B	UHE - Água Vermelha (Rio Grande)-SP/MG
3- Derrame C - (Pedreira)	UHE - Três Irmãos (Rio Tietê) - SP
4- Corte de Estrada	Km 297 - Rodovia Jauú-Brotas-SP
5- Pedreira Construcap	Município de Ribeirão Preto - SP
6- Pedreira Said	
7- Pedreira Inderp	
8- Pedreira Leão & Leão	
9- Pedreira Said II	
10- Pedreira Carrascoza	
11- Cachoeira Fazenda Canchim	MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS - SP
12- Cachoeira Monjolinho (CPFL)	
13- Pedreira - FEPASA (Abandonada)	
14- Pedreira - Prefeitura (Abandonada)	
15- Corte de Estrada	Km 125 - Rodovia Descalvado - São Carlos - SP
16- Derrames I e II	UHE - Nova Ponte (Rio Araguari) - MG
17- Corte de Estrada	Rodovia Araguari (MG)-Caldas Novas-GO
18 - Serra Azul	Estrada Vicinal entre Serra Azul e Serrana - SP
19- Pontos de Amostragem (NARDY, 1988) - PR: 400,401, 402, 403, 426, 427, 532, 535 e 544	

Figura III.2 - Relação dos afloramentos de entablamentos em derrames basálticos da Formação Serra Geral

OBS: Os afloramentos 2 e 19 não foram observados diretamente.

2. Evidências Geológicas

Para o reconhecimento do entablamento, como o resultado de um processo de rápido resfriamento de lavas basálticas, algumas evidências texturais seriam úteis, como as que se seguem:

- A granulação bem mais fina e a maior quantidade de matriz vítrea, comparativamente à colunata (ver Fig. III.1b);
- A morfologia dendrítica dos cristais de magnetita (Fig. III.3a), contrastando com os mesmos cristais, bem desenvolvidos, na colunata (ver Fig. III.1c);
- Cristais de plagioclásio com "cavidades" e apresentando em suas extremidades o formato de "cauda de andorinha" (Fig. III.3b - COX et alii, 1984).

As evidências texturais, como demonstrado, estão intimamente associadas a características estruturais, igualmente notáveis. No entanto, a vinculação de todas estas peculiaridades ao entablamento, não tem sido, aparentemente, distinguida pelos estudiosos da Bacia do Paraná, como será exemplificado a seguir.

2.1. Basaltos Hialofíticos

Na publicação apresentada por PICCIRILLO & MELFI (1988), são abordados os aspectos petrogenéticos e geofísicos ligados ao vulcanismo mesozoico da Bacia do Paraná. Entretanto, ao deparar-se com o grande volume de informações e o detalhamento das características químicas e mineralógicas, contidas na referida publicação, divisa-se um ilimitado campo de possibilidades para análises diversas, em áreas outras do conhecimento geológico.

Na região central da bacia (RCP), onde encontra-se a maior variedade de litótipos vulcânicos, verifica-se a presença de basaltos com interessantes características texturais e estruturais. São rochas, intensamente fraturadas, que apresentam altas porcentagens de matéria vítrea e granulação extremamente fina. No entanto, tendo em vista os objetivos do estudo (autores op. cit.), os basaltos em questão não foram analisados separadamente.

(a)

NÍCOIS DESCRUZADOS

(b)

NÍCOIS SEMI-CRUZADOS

Figura III.3 - Características texturais do entablamento, indicativas de rápido resfriamento (seções delgadas gentilmente cedidas por A.J.R. Nardy):

- a - cristais dentríticos de magnetita (amostra nº 402)
- b - cristais de plagioclásio com "buracos" e terminações em "cauda de andorinha" (amostra nº 532)

A simples correlação de determinadas propriedades, apresentadas pelos basaltos de aspecto vítreo, permite a obtenção de importantes e bem fundamentadas interpretações, aparentemente, não visualizadas pelos autores já citados:

- Todas as amostras analisadas apresentam a textura hialofítica: feno e/ou micro fenocristais de plagioclásio e/ou piroxênios e opacos, imersos em matriz vítrea abundante (Fig. III.4);
- Ao nível de afloramento, pelo menos três características despertam à atenção (Nardy, comunicação pessoal): rocha inalterada, porém extremamente fraturada; cor preta e textura afanítica;
- A análise de imagens de satélite possibilita, com relativa facilidade, a individualização dos referidos basaltos; verifica-se um aumento considerável na densidade e pequeno comprimento dos lineamentos de relevo e drenagem.

Nota-se ainda, que os basaltos em questão apresentam, em alguns casos, composição química e mineralógica praticamente idêntica a outros basaltos. Entretanto, as feições texturais e estruturais, se confrontadas, podem revelar notáveis diferenças.

Por outro lado, nos basaltos hialofíticos analisados, verificam-se diferenças sensíveis, quanto à composição química. Assim, conclui-se que, provavelmente, algum fator superficial, singenético à consolidação das lavas, propiciou um resfriamento acentuadamente mais rápido para estes basaltos.

Embora não reconhecido em estudos petrológicos da Formação Serra Geral, o material rochoso do entablamento, provavelmente, corresponda aos basaltos com textura hialofítica. Evidentemente, a textura quase vítrea está intimamente vinculada a uma, igualmente notável, feição estrutural - rocha intensamente fraturada (Figura III.5). Ambas as características, textural e estrutural, são significativamente distintas daquelas verificadas nos basaltos em geral (ver Fig. I.6).

Figura III.5 - Entablamento - Formação Serra Geral (pedreira Construcap - Ribeirão Preto-SP). Notar semelhança, nas características texturais e composição mineralógica, com os basaltos hialofítico (ver Fig. III.4. a) Rocha intensamente fraturada, com predomínio do diaclasamento sub-vertical. b) Foto-micrografia mostrando ripas cinza-esverdeadas de plagioclásio, cristais alaranjados de piroxênio, imersos em matriz vítrea. c) Composição química (resultados gentilmente cedidos por N.M.M. GONCALVES)

2.2 Principais Feições Estruturais

Na maioria dos afloramentos observados, o entablamento apresenta grande espessura, correspondendo, em algumas situações em que os contatos são identificados, ao próprio derrame, praticamente, em sua totalidade. O alto grau de fraturamento, sua característica mais marcante, revela a predominância do diaclasamento subvertical. Este, por sua vez, pode ocultar um incipiente colunamento (diaclasamento pseudocolunar) expresso sob a forma de superfícies colunares, relativamente mais planas, com menor (Fig. III.6a) ou maior (Fig. III.6b) proeminência.

A manifestação de juntas colunares mais regulares, aparentando colunatas, podem subdividir o entablamento em dois ou mais compartimentos (Fig. III.7), à semelhança dos derrames do Grupo Rio Columbia. Os horizontes com estas características são denominados de entablamento-colunar (ver Fig. II.9a). O diaclasamento pseudocolunar, estrutura intrínseca ao entablamento, pode confundir-se com o entablamento-colunar. No entanto, apenas este deverá apresentar feições texturais e estruturais (menor grau de fraturamento) semelhantes às aquelas verificadas na colunata inferior.

A subverticalidade do diaclasamento primário no entablamento, pode ser localmente substituída por feições estruturais mais ou menos regulares e simétricas (ver Fig. II.1) e que assumem a forma de leques (ver Fig. III.8a), rosetas (Fig. III.8b), etc.

Fraturas horizontais, apresentando superfícies relativamente planas, com espaçamento e persistência variados, são verificadas em alguns afloramentos (Fig. III.9a). Em determinadas pedreiras, estas discontinuidades condicionam o tamanho dos blocos de rocha obtidos no processo de desmonte (Fig. III.9b).

(a)

0 1 2 3 m

(b)

Figura III.6 – Exemplos de espessos entablamentos onde a colunata inferior está ausente (S.Carlos, SP): a) cachoeira Monjolinho – contato com derrame inferior situa-se na base da cachoeira; b) pedreira da prefeitura – notar diaclasamento pseudo-colunar.

(a)

(b)

Figura III.7 – Horizontes de entablamento-colunar no interior do próprio entablamento (pedreira Inderp – Ribeirão Preto-SP):

- a – entablamento-colunar com contato inferior irregular.
- b – exposição de dois compartimento de entablamento-colunar, alternados.

(a)

(b)

Figura III.8 - Exemplos de unidades estruturais do entablamento:

- a - estrutura "em leque" (pedreira Said II - Ribeirão Preto - SP)
- b - parte inferior de estrutura tipo "roseta" (derrame "C" - Barragem de Três Irmãos, SP)

(a)

(b)

Figura III.9 – Fraturamento horizontal no entablamento (ver Fig. II.6).

- a - notar graus variáveis de espaçamento e persistência das fraturas (Pedreira Said - Ribeirão Preto-SP)
- b - grande bloco, cuja superfície de fratura horizontal delimita o diaclasamento vertical, perpendicularmente (Pedreira Construcap - Ribeirão Preto-SP)

2.3. Classificação das Juntas Primárias

Excetuando-se as descontinuidades horizontais de maior persistência, de origem incerta, o entablamento é essencialmente caracterizado pelo seu típico sistema de diáclases subverticais. Estas, estreitamente espaçadas, cortadas por pequenas fraturas extremamente irregulares, são ainda substituídas, localmente, por superfície relativamente ampla e lisa. Verifica-se então, em análise estrutural mais detalhada, a existência de 3 tipos de juntas no entablamento (Figuras II.10, 11 e 12).

Juntas Tipo I (Fig. III.10a)

Apresentam comprimento variável e largura de 20 a 30 centímetros, são mais contínuas, encontram-se preenchidas por película milimétrica e, conferem o aspecto pseudocolunar ao entablamento; suas superfícies subverticais podem ainda estar subdivididas por pequenas bandas ou segmentos sub-horizontais (ver Fig. II.8 e III.6b).

Juntas Tipo II (Fig. III.10b, 11 e 12)

Delimitam “microcolunas” (ver Fig. III.5a) com diâmetros geralmente inferiores a 10 centímetros e apresentam, em seção longitudinal, uma sucessão de pequenos segmentos sub-horizontais (ver Fig. II.8), que parecem guardar certa regularidade entre si e relativamente as juntas tipo I.

Juntas Tipo III

Correspondem a pequenas fraturas de disposição caótica e descontínuas, são as responsáveis pela fragmentação das microcolunas por ocasião de desmontes à fogo, quando então são mais facilmente identificadas nos pequenos fragmentos; quando mais regulares ou planas, são horizontais e podem estar associadas às fraturas horizontais mais contínuas (ver Fig. III.9).

Em seção horizontal (Fig. III.11), nota-se que as microcolunas, delimitadas individualmente por juntas tipo II, são eventualmente envolvidas ou contornadas por diáclases maiores (juntas tipo I). Estas não são cruzadas por aquelas e, na região de contato, são geralmente perpendiculares entre si.

As feições geométricas das descontinuidades primárias no entablamento, então apresentadas, permitem a definição dos seguintes aspectos:

- Cronologia dos 3 tipos de juntas;
- Sentido de propagação das juntas tipo II.

As fraturas primárias, com graus variáveis de persistência, em basaltos, têm sido interpretadas como o resultado de uma sequência de eventos e não um episódio único ou instantâneo (SPRY, 1962). A formação de fraturas, polígonos ou colunas progressivamente menores, foi verificada, in situ, em um lago de lava em processo de resfriamento nas ilhas Hawaií (PECK & MINAKAMI, 1968).

No contexto da fragmentação progressiva de um derrame em resfriamento as juntas tipo I teriam se desenvolvido inicialmente. As juntas tipo II e III teriam sido formadas subsequentemente. Tendo em vista, entretanto, as evidências de rápido resfriamento do entablamento, e a presença de segmentos de junta simetricamente encurvados (Fig. III.12b), é possível admitir-se uma quase simultaneidade, mesmo que localmente, na formação dos 3 tipos de juntas.

No modelo estrutural estabelecido por TOMKEIEFF & SPRY (ver Fig. II.1), o colunamento irregular do entablamento corresponde, aparentemente, às fraturas tipo I, ou ainda, os 3 tipos de juntas em apreço, provavelmente, não tenham sido identificados ou discriminados pelos referidos autores. No entanto, examinando-se a descrição geológico-geotécnica das descontinuidades do entablamento, no derrame Pomona – Grupo Rio Columbia (ver Capítulo II - item 2.3.1), verifica-se uma provável correspondência com as juntas tipo I (47%) e tipo II e III (53%).

Os segmentos das fraturas tipo II (Fig. III.12), se cuidadosamente analisados, revelarão determinadas feições geométricas, identificadas inicialmente nas colunatas dos derrames Rio Columbia (ver Fig.II.8), ou seja:

- As bandas ou segmentos, orientados perpendicular e simetricamente às juntas tipo I, apresentam, em média, um centímetro de largura por dez centímetros de comprimento;
- Em alguns segmentos observa-se tênues estruturas “em pluma”, indicando que estas bandas se desenvolveram a partir das juntas verticais tipo I e, ao mesmo tempo, propagaram-se descendentemente;
- A natureza dos limites ou bordas dos segmentos, revelando, quando observadas em perfil, o formato de um “J” invertido (Fig. III.12c), constitui um guia seguro da sucessiva propagação descendente das juntas tipo II.

Tendo em vista a íntima relação entre os 3 tipos de juntas, evidentemente, não apenas as fraturas tipo II, mas todo o diaclasamento primário do entablamento, desenvolve-se sempre, sem exceção, do topo em direção ao núcleo de um derrame em processo, excepcionalmente rápido, de resfriamento.

(a)

(b)

Figura III.10 – Pedreira CONSTRUCAP – Ribeirão Preto-SP

a - junta tipo I;

b - juntas tipo II e III delimitando pequena seção de uma microcoluna.

(a)

(b)

Figura III.11 – Seções horizontais (ou transversais), ao fraturamento subvertical no entablamento, destacando juntas tipo I (faces de polígonos irregulares) que delimitam microcolunas (juntas tipo II):
- indistintas (a – Pedreira Construcap, Ribeirão Preto, SP);
- bem definidas (b – Derrame I, UHE de Nova Ponte, MG)

Características texturais peculiares, feições estruturais singulares, enfim, todas as evidências geológicas apontam, notavelmente, para o mesmo mecanismo de formação de entablamentos já estabelecido para os derrames basálticos do Grupo Rio Columbia. O modelo, em sua concepção básica, considera determinadas condições paleoambientais propícias à inundação de derrames, imediatamente após seu extravasamento.

2.4. Aspectos Paleoclimáticos

Os pesquisadores da Formação Serra Geral, desde fins do século passado, são unânimes quanto às condições paleoambientais prevalecentes durante o evento Serra Geral: o ambiente desértico da Formação Botucatu permaneceu durante o extravasamento dos derrames basálticos. Os arenitos dessa Formação intercalam-se entre os derrames com espessuras variáveis, originando, via de regra, uma mistura de arenito e fragmentos de basalto vesículo-amigdaloidal (brecha arenosa - Fig. III.13). Esta situação de contemporaneidade, pelo menos parcial, é verificada ao se constatar interpenetrações litológicas, envolvendo os derrames inferiores e os depósitos eólicos superiores (SOARES & LANDIM, 1973).

Os ambientes desérticos não são caracterizados exclusivamente por depósitos eólicos. Localmente, verifica-se sedimentação promovida por rios efêmeros e lagos de deserto (SUGUIO, 1980). As chuvas torrenciais temporárias constroem leques aluviais, depósitos de canal e, nas partes topograficamente mais baixas, formam depósitos lacustres (Fig. III.14). Na sedimentação lacustre, delgadas camadas plano-parallelas de silte e argila intercalam-se com leitos arenosos. Os canais fluviais, anastomosados, contribuem com sedimentos mais grosseiros que se alternam, igualmente, com sedimentos de deposição eólica.

Depósitos subaquosos, com as mesmas características, são frequentemente encontrados na Formação Botucatu e nos sedimentos interderrames. Os sedimentos do evento Botucatu estão representados, em verdade, por três fácies (SOARES, 1973): fácies torrencial (arenitos conglomeráticos); lacustre (siltitos e argilitos) e eólica (predominante).

A presença de depósitos argilosos de natureza lacustre, entre alguns derrames de lava basáltica, aponta para um paleoclima não necessariamente seco (PETRI, 1983). O extravasamento dos derrames teria alterado profundamente a drenagem pretérita, e favorecido o represamento de águas pluviais e fluviais (PETRI & FÚLFARO, 1983).

Figura III.13 - Brecha basáltica arenosa - topo de entablamento (aflor. 5 - Pedreira construcap): fragmentos de basalto vesículo amigdaloidal, envolvidos por matriz arenosa de coloração avermelhada)

Figura III.14- Modelo esquemático de sedimentação aquática de deserto: 1 - depósitos de leque aluvial; 2 - depósitos de canal; 3 - depósitos lacustres (modif. de MENDES, 1984)

As características de determinadas feições lito-estruturais, onde se associam “arenitos” e basaltos da Formação Serra Geral, observadas por SUGUIO & FÚLFARO (1974), conduziram estes autores à seguinte afirmação:

- “Um fato importante aqui registrado é a existência de água percorrendo as superfícies basálticas, inclusive proporcionando o aparecimento de pequenos lagos”.

As depressões paleotopográficas, onde acumularam-se as águas provenientes de chuvas torrenciais ocasionais, foram originadas pelo próprio relevo paleodunar ou ainda por falhamentos. A região de Ribeirão Preto (SP), onde encontram-se as melhores exposições de entablamentos (afloramentos 5 a 10 - ver Fig.III.2), localiza-se em depressão de formato circular (Fig.III.15 - SINELLI, 1970; SOARES et alii, 1973).

Exemplos em Fundações de Grandes Barragens

Nas obras de construção de barragens de grande porte, em áreas basálticas, onde os afloramentos de escavação expõem a superposição de vários derrames e seus respectivos contatos, verificam-se frequentemente evidências inequívocas de sedimentação subaquosa interderrame. A estas evidências, nem sempre é possível associar entablamentos.

Materiais sedimentares hidroclásticos, interderrames, correspondentes a lentes de siltitos e/ou argilitos, foram identificados na Barragem de Promissão Rio Tietê (KAJI, 1969), Barragem de Capivara-Rio Paranapanema (OLIVEIRA, 1969) e, em outros locais de implantação dessas obras (GUIDICINI & CAMPOS, 1968). Estas ocorrências estão, via de regra, associadas às brechas basálticas, cujos fragmentos de basalto vesículo-amigdaloidal encontram-se envolvidos pelo mesmo material sedimentar.

A ascensão, sob pressão, de sedimentos saturados de água, subjacentes a derrames que escoam, originam os “diques intrusivos”, caracterizados inicialmente por WASHBURNE (1930). No derrame “C”, obra de Três Irmãos - Rio Tietê, cujo topo ostenta entablamento típico, verifica-se corpo sedimentar intrusivo com a semelhança de um lacólito (Fig. III.16).

Figura III.16 - Corpo silto-arenoso intrusivo apresentando o formato de um lacólito (derrame "c" - pedreira da Barragem de Três Irmãos): notar fragmentos de basalto vesicular englobados pela intrusão

As intrusões de sedimentos no interior dos derrames, quando assumem formas mais complexas e de maiores proporções, são denominadas de “espiráculos”. Estas e outras feições, como estruturas circulares e “pillow-lavas” (ver Fig. I.7 e II.6), quando ocorrem em derrames basálticos tipo continental, estão vinculadas à presença de águas de superfície em ambientes fluvial e/ou lacustre.

No derrame superior da Barragem de São Simão - Rio Paranaíba, onde os espiráculos se manifestam de maneira notável (MOLLER & CABRERA, 1976), a descrição das características estruturais do basalto denso, parecem corresponder ao próprio entablamento: rocha afanítica, de coloração negra, microfraturada; as diáclases com espaçamento de 5 a 30 centímetros e disposição aparentemente caótica, quanto vistas à distância, apresentam um colunamento subvertical incipientemente desenvolvido.

As estruturas circulares da Barragem de Água Vermelha – Rio Grande, estudadas detalhadamente por ARAÚJO (1982), atravessam preferencialmente o derrame “B”. Este, nas escavações da obra, representa um autêntico maciço bidiferenciado (colunata inferior entablamento), o que pode ser perfeitamente deduzido, a partir da descrição de suas características estruturais e com base nas fotos contidas nesse trabalho.

As “pillow-lavas” ou lavas “em almofadas”, estruturas típicas de derrames que avançam mar adentro, são também frequentemente identificadas na base dos derrames Rio Columbia (WATERS, 1960). Na Formação Serra Geral, foram reconhecidas na Barragem de Foz do Areia Rio Iguaçu (MARQUES FILHO et alii, 1981) e no derrame II da Barragem de Nova Avanhandava- Rio Tietê (MANO, 1987). Nesta última ocorrência, considera-se que o derrame II, escoou, com submersão parcial, em ambiente lacustre.

Em ambas as ocorrências de “pillow-lavas”, e em outras onde se verifica sedimentação subaquosa interderrame, o entablamento não está presente ou ainda, a ausência de elementos conclusivos na literatura examinada não permite seu reconhecimento. Assim, as feições geológicas indicativas da presença de águas meteóricas, durante o vulcanismo Serra Geral, manifestam-se na base e/ou topo (entablamento) dos derrames, o que reflete na realidade, combinações diversas de situações paleotopográficas e paleoclimáticas específicas.

Chuvas torrenciais ao incidirem sobre determinada superfície pré-derrame, irregular, podem ter favorecido o desenvolvimento de cursos fluviais e/ou formação de lagos. Este ambiente, ao ser invadido por volumosos derrames de lava, teria propiciado o desenvolvimento de “pillow-lavas”, espiráculos etc. A interrupção ou truncamento da drenagem teria ainda possibilitado, circunstancialmente, o represamento, a ascensão e o transbordamento das águas meteóricas, inundando assim grandes áreas do derrame.

No derrame, então estacionado e submerso, desenvolver-se-ia a compartimentação entablamento/colunata, de acordo com a intensidade e periodicidade das inundações. Esta inter-relação pode ser perfeitamente exemplificada; no entanto, dentre os poucos afloramentos estudados (ver Fig. III.2), são raros aqueles em que os derrames são expostos por completo. Assim, os poucos exemplos de derrames com entablamento, a seguir apresentados, são úteis mesmo que não reflitam todas as possíveis situações:

- a) Transbordamento intermitente: alternância de entablamentos e colunatas internas (afloramento 7);
- b) Transbordamento imediato e de curta duração: formação do entablamento e colunata inferior; ausência da colunata superior (afloramentos 2 e 3);
- c) Inundação tardia (após a formação da colunata superior), mas prolongada: desenvolvimento da compartimentação clássica – colunata superior, entablamento e colunata inferior (afloramento 1);
- d) Inundação imediata e prolongada: ausência das colunatas inferior e superior, ou seja, o entablamento prevalece da base ao topo (afloramentos 12, 14, 16); essa possível situação – maior velocidade de resfriamento e consolidação do fluxo de lava – poderia ser acrescentada ao modelo da Figura II.7 (“derrames tipo IV”).

A eficiência com que o rápido resfriamento e consolidação se processam, devido a penetração descendente de água em derrames de lava inundados, pode ser exemplificada no derrame I do afloramento 16. Esta ocorrência, onde os 70 metros de espessura do derrame correspondem, praticamente, ao próprio entablamento, indica que a isoterma superior de solidificação, do corpo de lava, movimentou-se tão rapidamente que atingiu a base do derrame antes que a isoterma crítica inferior iniciasse seu movimento ascendente.

Exemplo da Região de São Carlos

A continuidade lateral do entablamento, em alguns derrames, é interrompida com a exposição de rocha basáltica de textura relativamente mais grosseira e fraturas com maior espaçamento. Consiste em outras palavras, no contexto do modelo de LONG & WOOD (1986), a uma associação lateral do entablamento com derrame tipo I. Esta situação indica pelo menos um fator, evidentemente, de caráter paleoambiental: derrame parcialmente submerso, durante o processo de consolidação.

Na região de São Carlos-SP, nos afloramentos 12, 13 e 14 (ver Fig. III.2), o entablamento corresponde a espesso derrame, que revela complexas associações litológicas em seu contato inferior e lateralmente. Fundamentando-se exclusivamente em observações de campo, elaborou-se um modelo geológico (Fig. III.17) que compreende as 4 etapas, resumidamente descritas a seguir:

- I - Relevo paleodunar, com desníveis topográficos acentuados, invadido por derrame (1º) à noroeste com extensão lateral bloqueada à sudeste;
- II - Recobrimento do derrame por delgada camada de areia e, estabelecimento de pequeno lago (1º) em depressão do “deserto” Botucatu adjacente ao referido derrame;
- III - Extravasamento de um segundo, espesso e extenso derrame (cobre o primeiro derrame e o primeiro lago); formação de espiráculos (sobre o antigo lago) e processo diferencial de resfriamento, desenvolvidos no derrame (2º) parcialmente inundado por extenso lago (2º), represado à sudeste por dique alimentador;
- IV – Após consolidação e erosão, o corpo magmático de um único derrame (2º) encontra-se compartimentado lateralmente, em termos estruturais: “derrame tipo IV” (entablamento) à noroeste e derrame tipo I à sudeste.

Figura III.17- Esquema geológico, reproduzindo prováveis etapas no desenvolvimento do entablamento e feições lito-estruturais adjacentes, em determinada região do Município de São Carlos (SP)

2.5. Alteração Hidrotermal em Juntas Tipo I

O modelo ou hipótese formulada por LONG & WOOD (1986), elucidando o mecanismo de rápido resfriamento do entablamento, mostra-se suficientemente consistente quando aplicado aos derrames basálticos do Grupo Rio Columbia. Verifica-se ainda a existência dos mesmos princípios, que nortearam a elaboração de tal hipótese, ao se estudar os entablamentos da Formação Serra Geral. Assim, esta segunda aplicação constitui evidência confirmatória do modelo em apreço.

No entanto, é altamente desejável para uma hipótese científica, que esta seja também confirmada por “nova” evidência, envolvendo fatos que não eram conhecidos ou não eram levados em conta no momento da formulação. Muitas hipóteses e muitas teorias em ciência natural tiveram, efetivamente, a confirmação consideravelmente robustecida por esses fenômenos “novos” (HEMPEL, 1981).

Ao se estudar as interessantes particularidades estruturais do entablamento, verifica-se que seu aspecto colunar, conferido pelas juntas tipo I, não tem sido, aparentemente, explorado em pesquisas divulgadas pela extensa bibliografia pertinente. A observação cuidadosa dessa descontinuidade, revela um detalhe que não pode ser menosprezado, face à sua constância nas juntas até então examinadas por este autor. O “novo” detalhe, exemplificado na Fig. III.18, refere-se ao preenchimento e às bordas ou halos de alteração incipientemente desenvolvidos em algumas juntas tipo II, porém sempre e nitidamente observadas em juntas tipo I.

O estudo de caracterização tecnológica dos basaltos de Nova Ponte (entablamento típico), desenvolvido pelo IPT (CEMIG, 1988), compreendeu, coincidentemente, a análise mineralógica de uma amostra (lâmina nº 7243) contendo um segmento de fratura, aqui denominada junta tipo I. Embora as, já mencionadas, bordas de reação não tenham sido então identificadas, o preenchimento dessa junta, em basalto inalterado intempericamente, revelou as seguintes características:

- Espessura de até 2 milímetros;
- Preenchimento simétrico, das bordas em direção ao centro, com os seguintes minerais: zeólitas; argilo-minerais verdes; calcedônia ou novamente zeólitas;
- Na análise da fração argilosa, por difratometria de raios-x, identificou-se a presença de argilo-mineral do grupo das esmectitas.

(a)

(b)

Figura III.18 – Juntas tipo I mostrando fissura colmatada e halo de alteração (Pedreira Construcap – Ribeirão Preto-SP): a – seção transversal; b – corpos de prova, onde juntas tipo II estão associadas à mais contínua (tipo I)

Em pesquisa desenvolvida por GONÇALVES (1987), a mesma feição foi meteticulosamente analisada, sob vários aspectos, em amostras retiradas da pedreira Construcap (entablamento típico). Os principais resultados deste estudo, exemplificados esquematicamente na Figura III.19, podem ser resumidamente apresentados nos 6 itens que se seguem:

- 1 - O conjunto, halo de alteração e preenchimento da fissura, apresenta uma espessura que varia de 5 a 10 milímetros;
- 2 - Os minerais secundários, presentes tanto no halo de alteração como preenchendo as fissuras, são de origem comprovadamente hidrotermal;
- 3 - A interação rocha-fluído, no halo de alteração, promoveu a hidratação, dissolução e recristalização da matriz vítrea;
- 4 - O vidro foi então localmente substituído por filossilicatos (celadonita, nontronita e saponita) e, eventualmente, por minerais do grupo das zeólitas;
- 5 - As fissuras, totalmente seladas, encontram-se preenchidas por assembleias mineralógicas de cores claras, simetricamente dispostas segundo 6 microzonas distintas;
- 6 - Os minerais de preenchimento correspondem aos próprios minerais de alteração hidrotermal do halo de alteração, acrescentando-se ainda a calcedônia e opala.

GONÇALVES (1987) verifica ainda que os fenômenos específicos, então considerados, de difusão iônica e recristalização de filossilicatos em atividades hidrotermais, são similares àqueles observados em interações experimentais basalto-água do mar.

A observação microscópica do preenchimento de juntas tipo I, possibilita a identificação das referidas microzonas, em sequências geralmente incompletas e descontínuas. Com base nas detalhadas descrições e elucidativas ilustrações de GONÇALVES (op. cit.), o autor da presente pesquisa identificou os seguintes detalhes:

- A delimitação do halo de alteração (Fig.III.20a);
- Os contornos irregulares da fissura e das microzonas (Fig. III.20b);
- Identificação das 4 primeiras microzonas, dentre as 6 já discriminadas (Fig.III.21a);
- Fissura colmatada, quase que exclusivamente, por argilo-mineral (Fig.III.21b);
- Região central de fissura preenchida por calcedônia (Fig. III.22).

Figura III.19 - Representação esquemática e estilizada de zona de alteração hidrotermal, em fratura de rocha basáltica (Pedreira Construcap): halo cinza e sequência mineralógica, composta de 6 microzonas, preenchendo a fissura (modif. GONÇALVES, 1987)

Figura III.20 - Características geométricas da zona de alteração em juntas tipo I (Pedreira Construcap - Ribeirão Preto): a - borda de tonalidade mais clara, adjacente à fissura (halo de alteração); b - contornos irregulares e espessuras variáveis de microzonas de minerais secundários preenchendo fissura

Figura III.21 - Sequências incompletas de microzonas mineralógicas de preenchimento (ver fig. III.19) (pedreira Construcap - Ribeirão Preto): a - identificação das 4 primeiras microzonas; b - cristais de zeólitas bordejando fissura e argilo-mineral completando a colmatção

(a)

NÍCOIS DESCRUZADOS

(b)

NÍCOIS CRUZADOS

Figura III.22 - Preenchimento de fissura composto predominantemente, por zeólitas e calcedônia (da borda, em direção ao centro) (pedreira Construcap - Ribeirão Preto)

O halo cinza de alteração, representando uma zona da rocha afetada por soluções hidrotermais percolantes, parece corresponder a uma característica exclusiva do entablamento. Não se tem verificado a mesma feição nas demais rochas basálticas da Bacia do Paraná, já exaustivamente estudadas (GUIDICINI & CAMPOS, 1968; SOUZA JR., 1986; PICCIRILLO & MELFI, 1988).

Nas juntas primárias dos basaltos em geral, o preenchimento é facilmente destacável (GUIDICINI & CAMPOS, *op. cit.*), enquanto nas juntas tipo I, perfeitamente seladas, o mesmo não acontece. A menor frequência com que as juntas colunares se manifestam, em vários afloramentos dos entablamentos estudados, reflete, pelo menos parcialmente, a dificuldade do maciço se romper através das juntas tipo I, por ocasião dos desmontes à fogo.

A presença de argilo-minerais em rochas basálticas inalteradas intempericamente, teria uma origem deutérica, como resultado da ação dos resíduos finais de cristalização sobre as fases previamente cristalizadas (ROISEMBERG *et alii*, 1984). Os principais produtos argilosos neo-fomados seriam: montmorilonita; nontronita; caolinita; illita e clorita. Verifica-se, no entanto, por simples comparação, significativa diferença entre esta paragênese e àquela encontrada na zona de alteração das juntas tipo I.

Analisando-se o assunto, um outro fator merece ser ainda considerado. A alteração hidrotermal de baixa temperatura (inferior a 150°C), em rochas basálticas de fundo oceânico, conforme MELSON & THOMPSON (1973), ANDREWS (1977), SCHEIDEGGER & STAKES (1980), MEHEGAN *et alii* (1982), entre outros, produz filossilicatos e zeólitas semelhantes aqueles observados em pesquisas experimentais e no estudo efetuado por GONÇALVES (1987).

Consequentemente, admite-se que a paragênese mineralógica secundária, em questão, quando em ambiente marinho, é o resultado de reações hidrotermais devido à interação rocha basáltica-água marinha, após a consolidação da lava submersa. A interação basalto-água doce em ambiente continental deveria, em princípio, produzir assembleia mineralógica distinta; no entanto, as diferenças seriam mínimas conforme GONÇALVES (*op. cit.*).

O desconhecimento do entablamento, e das condições paleoambientais vinculadas à sua gênese, induziu, naturalmente, GONÇALVES (*op. cit.*) a adotar um complicado sistema de interação rocha-solução residual, na fase final de consolidação da lava, em ambiente subaéreo. Na verdade, como decorrência do até então exposto, conclui-se que as juntas tipo I estavam

submersas (ambiente flúvio-lacustre) por ocasião da formação do halo de alteração e colmatagem das fissuras.

Um outro exemplo confirmatório de tal conclusão deve ainda ser mencionado. A celadonita, filossilicato pertencente ao grupo das micas, mineral invulgar nos basaltos da Formação Serra Geral, ocorre tanto no halo de alteração como nas microzonas de preenchimento fissural. Sua presença, também verificada em determinado derrame na região de Foz do Iguaçu (Paraná), foi interpretada como o produto da interação água meteórica-basalto, em reação de caráter exclusivamente hidrotermal, antes do completo resfriamento da rocha (HAYASE & MANERA, 1972).

Assim, ao tempo da formação do entablamento, as águas de superfície, que aceleraram o movimento descendente da frente de consolidação do derrame (submerso), permaneceram ou infiltraram-se nas juntas tipo I, recém produzidas, promovendo a referida alteração hidrotermal.

3. Conclusões

Um ambiente desértico com chuvas esporádicas e efêmeras acumulações de água, certamente, não constitui o ambiente propício ao transbordamento de água sobre extensos derrames de lava. Entretanto, o “clima árido”, se conjugado a condições topográficas adequadas, teria favorecido a inundação, pelo menos parcial, de um determinado derrame. Teriam sido então originados entablamentos com expressiva continuidade lateral, bem como aqueles esparsos alternados a basaltos de textura mais grosseira e menos fraturados.

Assim, esta situação paleoambiental específica, prevalecente ao tempo do evento Serra Geral, é o que determinou a menor abundância de entablamentos, relativamente ao verificado nos derrames do Grupo Rio Columbia, onde as condições paleogeográficas e paleoclimáticas foram bem mais favoráveis à inundação de derrames.

Processo de resfriamento, semelhante ao verificado na formação do entablamento, é apresentado por LISTER (1977). O fenômeno, neste caso, teria lugar nas proximidades dos centros de separação de placas tectônicas oceânicas, onde gigantescas extrusões de lava basáltica (supervulcões lineares com milhares de quilômetros de extensão) se desenvolveram no ambiente submarino. A água do mar teria penetrado rápida e descendentemente, através de fraturas crustais recém-formadas, em direção ao horizonte de solidificação da lava basáltica que, por sua vez, se deslocaria no mesmo sentido, acelerando assim o processo de consolidação dos derrames.

CAPÍTULO IV

O ENTABLAMENTO NA FORMAÇÃO SERRA GERAL:
CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

Ensaiois laboratoriais e “in situ”, para a determinação de índices físicos e propriedades mecânicas de materiais rochosos e maciços basálticos, foram sistematicamente executados durante o desenvolvimento das etapas de numerosos projetos de grandes barragens no sul e sudeste do país. Neste sentido, o entablamento constitui uma exceção; provavelmente, por não representar situação geotécnica preocupante, as raras ocorrências em determinadas obras, posteriormente identificadas, não foram objeto de estudos geológico-geotécnicos específicos.

No entanto, quando abordadas sob determinados pontos de vista, as feições texturais e estruturais do entablamento suscitam, de imediato, algumas interrogações. O intenso fraturamento afetaria o comportamento geotécnico, à nível de maciço rochoso? quando fragmentado ou britado, apresentaria problemas como agregado (alterabilidade, adesividade etc.)?

Em obras de engenharia de maior porte, o entablamento constituirá, via de regra, apenas um compartimento lito-estrutural dentre outros no maciço rochoso local, cujo comportamento geotécnico global deverá ser, aproximadamente, definido. Sabe-se ainda, que o entablamento está geneticamente vinculado à colunata. Esta, menos frequente e irregularmente colunar, assemelha-se ao núcleo da grande maioria dos derrames basálticos da Formação Serra Geral. Assim, no estudo de determinado maciço basáltico bidiferenciado, as características geológico-geotécnicas já estabelecidas para os basaltos em geral (maciços ordinários), no capítulo I (itens 2 e 3), podem ser atribuídas, em termos aproximados, à colunata.

Sendo já definidos, no capítulo anterior, os principais conceitos abrangidos pelo modelo genético mais provável para o entablamento, bem como suas feições lito-estruturais mais importantes, pretende-se, neste capítulo, conforme o segundo objetivo da presente pesquisa, apresentar os resultados de um estudo de caracterização geotécnica do entablamento. A determinação dos parâmetros geotécnicos, por meio de ensaios laboratoriais, atividades de campo e sistemas classificatórios, fundamenta-se, principalmente, nas recomendações propostas pelo IPT (1980), ISRM (1981) e por BIENIAWSKI (1989).

1. Caracterização do Material Rochoso

É prática usual na Geologia de Engenharia e na Mecânica das Rochas a consideração, em separado, dos dois elementos componentes dos maciços rochosos em geral: material rochoso e descontinuidades. O material rochoso, ou a rocha intacta, que corresponde à porção do maciço delimitada por superfícies de compartimentação de maior porte (diáclases, falhas, contatos litológicos etc.), normalmente é caracterizado por meio de ensaios laboratoriais.

1.1. Propriedades Mecânicas

A resistência mecânica da rocha intacta, embora não represente, com raras exceções, a resistência do próprio maciço rochoso, sua determinação reveste-se de grande importância nas seguintes situações:

- Para efeitos de classificação e correlação com outros parâmetros geotécnicos;
- Sua utilização em sistemas de classificação de maciços rochosos (RMR, Q, etc.).
- Na determinação da resistência ao cisalhamento, em descontinuidades de pequena persistência ou com rugosidade acentuada, onde trechos de rocha intacta deverão ser rompidos.

Os ensaios desenvolveram-se, em amostras ou corpos de prova, nas condições de umidade natural ($w = 0,2\%$).

1.1.1. Ensaio de Compressão Uniaxial

Por ocasião da amostragem, com vistas a realização do ensaio de compressão uniaxial, o mais frequentemente utilizado para a determinação da resistência mecânica das rochas, deparou-se com algumas dificuldades descritas a seguir; evidentemente, todas elas vinculadas à natureza singular do fraturamento primário do entablamento:

- A difícil tarefa de selecionar blocos de rocha, em pedreiras, nas condições adequadas para a posterior retirada, em laboratório, de corpos de prova cilíndricos;
- A disposição subvertical do fraturamento, permitiu a retirada das amostras unicamente na direção, aproximadamente, paralela a estas fraturas;

- As juntas tipo II e III, geralmente com contatos rocha-rocha, foram frequentemente abertas, durante o referido processo de obtenção dos corpos de prova e também durante seu modelamento, inutilizando assim, prematuramente, um grande número de amostras.

Todos os corpos de prova então obtidos apresentaram-se fraturados, em maior ou menor grau (Figura. IV.1a). As juntas tipo I, subverticais, preenchidas e com nítidas bordas de alteração, são facilmente distinguidas das juntas tipo II e III, menos persistentes e mais irregularmente orientadas. Estas, quando inclinadas e mais contínuas, são facilmente deslocadas quando submetidas a pequenas cargas durante o ensaio (Figura. IV.1b).

Os ensaios foram executados em prensa rígida servo-controlada MTS-815, com capacidade de 270 toneladas, pertencente ao Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos (Figura. IV.2). O moderno equipamento permite: a realização de ensaios com controle de deformação; a obtenção simultânea de gráficos força-deslocamento e, em conexão com um sistema computador-impressora, a aquisição de gráficos tensão x deformação.

Na figura IV.3 encontram-se os parâmetros obtidos a partir das 32 amostras ensaiadas. Os ensaios foram efetuados, em sua grande maioria, com controle de deformação axial. Programou-se, à princípio, apenas a determinação da resistência e do módulo de elasticidade (Figura.IV.3a). Posteriormente, superados alguns problemas de ordem técnica, realizaram-se ensaios mais completos, determinando-se então adicionalmente, o coeficiente de Poisson e parâmetros dinâmicos (Fig. IV. 3.b-d).

Procedimentos específicos de ensaio, especialmente aqueles desenvolvidos para a determinação do coeficiente de Poisson; gráficos tensão x deformação; a distribuição dos valores de resistência, módulo de Young e velocidade sônica (V_p) em histogramas de frequência; e outros detalhes, podem ser apreciados no apêndice 1. A observação durante a execução dos ensaios, do modo de ruptura das amostras, permitiu a constatação de que as juntas tipo I, na maioria dos ensaios, permaneceram praticamente intactas, por estarem fortemente seladas.

(a)

(b)

Figura IV.1 - Amostras de entablamento para a determinação da Resistência a Compressão Uniaxial: (a) - os corpos de prova 1, 2, 3, 4 e 5, correspondem, respectivamente, as amostras 28, 29, 30, 31 e 20 (ver Fig.IV.3); (b) - deslocamento e deslizamento em junta tipo II, respectivamente, no preparo da amostra (à esquerda) e durante o ensaio ao atingir-se apenas 30 MPa (amostra 13 - à direita)

(a)

(b)

Figura IV.2 – Prensa rígida servo-controlada, utilizada para a determinação dos parâmetros do ensaio de compressão uniaxial: a – vista geral do equipamento; b – detalhe mostrando extensômetro circunferencial envolvendo o corpo de prova

AMOSTRA	COMPRESSÃO UNIAXIAL		
	Resistência - σ (MPa)	Módulo Young - E_t (GPa)	Módulo Relativo E_t/σ (*)
01	32	37	1155
02	44	43	977
03	43	36	837
04	48	33	688
05	33	31	939
06	54	39	722
07	76	73	961
08	106	32	302
09	33	46	1384
10	140	55	395
11	72	44	611
12	91	40	440
13	30	34	1143
14	55	39	715

* - Ver Figura IV.5

-a-

Figura IV.3 - Quadro com os principais parâmetros mecânicos do entablamento - 32 amostras (gráficos e procedimentos de ensaio: apêndice 1)

AMOSTRA	VELOCIDADE SÔNICA	COMPRESSÃO UNIAXIAL		
	V_p (m/s)	Resistência - σ - (MPa)	Módulo Young - E_t - (GPa)	Mód.Relativo - E_t / σ -
15	4800	38	36	947
16	4260	66	43	652
17	4395	95	52	547
18	5720	100	42	420
19	6370	163	48	294

-b-

AMOSTRA	VELOCIDADE SÔNICA	COMPRESSÃO UNIAXIAL			
	V_p (m/s)	Resistência - σ - (MPa)	Módulo Young - E_t - (GPa)	Coefficiente Poisson - ν -	Módulo Relativo - E_t / σ -
20	5510	88	55	0.22	628
21	6185	82	56	0.19	683
22	5370	120	57	0.18	478
23	5550	78	37	-	474
24	5570	82	54	0.21	659
25	6140	213	58	-	274
26	6155	86	47	0.72	573
27	5300	65	48	0.46	738

-c-

Figura IV.3 - Continuação

AMOSTRA	VELOCIDADE SÔNICA				COMPRESSÃO UNIAXIAL			
	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Coefficiente Poisson $-\nu_{din}$	Módulo Young $-E_{din}$ (GPa)	Resistência $-\sigma$ (MPa)	Módulo Young $-E_t$ (GPa)	Coefficiente Poisson $-\nu$	Módulo Relativo $-E_t/\sigma$
28	4740	2160	0.37	37	83	46	0.60	548
29	5530	2600	0.36	52	67	50	0.14	749
30	5460	2510	0.36	51	148	67	0.19	453
31	5160	2320	0.37	43	49	47	0.16	959
32	5205	2500	0.35	48	81	55	-	679
Média (Desvio Padrão)	5410 (600)	2418 (176)	0.362 (0.0084)	46.2 (6.2)	80 (41.5)	46 (10)	0.184 (0.0276)	687 (267)
Ensaaios (n)	18	5	5	5	32	32	7 (*)	32

* - Desprezados os valores das amostras 26, 27 e 28 -d-

Figura IV.3 - Continuação

Examinando-se os resultados (Figura IV. 3) nota-se a expressiva variação nos valores de resistência. Provavelmente, os ensaios chegaram ao seu termo mais ou menos precocemente, em virtude da presença, em maior ou menor grau, de juntas primárias (selada ou não) nas 32 amostras. Os valores extremos de resistência foram atingidos nos ensaios das amostras 13 e 25, cujas curvas tensão x deformação estão representadas na Figura. IV.4.

A presença de juntas prismáticas ou colunares em derrames basálticos, a exemplo das colunatas, confere ao maciço um comportamento anisotrópico de simetria axial (ROCHA, 1973). O entablamento, se por um lado apresenta um colunamento subvertical apenas incipiente, suas juntas estreitamente espaçadas ou fissuras microscópicas, estão sempre representadas em amostras com as dimensões requeridas para o ensaio de compressão uniaxial.

Para a verificação da referida anisotropia ou ainda, para a determinação do coeficiente de anisotropia nestas amostras, os ensaios deveriam ser efetuados variando-se a inclinação das juntas, em relação à direção de aplicação dos esforços. Entretanto, para a execução deste plano de ensaios, deparou-se com as seguintes dificuldades:

- Todas as tentativas de retirada de corpos de prova, a partir de blocos devidamente orientados (30° , 45° , 60° e 90°), foram infrutíferas; a solicitação provocada pelo movimento giratório do extrator de amostras cilíndricas, permitiu somente a obtenção de corpos de prova orientados paralelamente (0°) às juntas.
- Amostras contendo quantidades variáveis de juntas com superfícies não planas, descontínuas, preenchidas ou não e incipientemente orientadas, desenvolvem, evidentemente, um comportamento mecânico de difícil interpretação.

O estudo dos materiais anisotrópicos, incluindo as rochas, tem revelado que os maiores valores de resistência à compressão uniaxial são obtidos em amostras, cujos elementos estruturais orientados estão dispostos paralelamente ou perpendicularmente à direção de aplicação da carga compressiva (LAMA & VUTUKURI, 1978b; ROCHA, 1973; MENDES, 1968; e outros). Disposições outras, intermediárias, evidentemente, resultarão em valores menores.

Tendo em vista que a anisotropia geométrica do entablamento é condicionada, sobretudo, pelas juntas tipo I (firmemente seladas), ao nível de pequenas amostras, conclui-se que: as juntas tipo II, geralmente inclinadas, ainda que irregulares, seriam as principais responsáveis pelas rupturas prematuras das amostras ensaiadas. Assim, o valor médio de resistência, 80 MPa, corresponderia, virtualmente, a um menor valor, relativamente aos resultados nas direções normal e paralela.

WALKER (1971, apud LAMA & VUTUKURI; 1978b), efetuou ensaios em amostras de gesso objetivando verificar o efeito da presença, frequência e disposição de juntas, na resistência

a compressão uniaxial. Amostras, do mesmo tamanho, “fraturadas” (1 a 5 fraturas) e orientadas paralela ou perpendicularmente à direção de solicitação, revelaram decréscimo da resistência com o incremento de juntas, atingindo-se, aproximadamente, o equivalente a 50% da resistência do material intacto, em corpos de prova com cinco juntas.

Considerando o até então exposto, é possível estimar-se um valor médio de resistência superior ao dobro, daquele obtido (80 MPa), para o entablamento ao nível de rocha intacta. Estimativa esta, que corresponde a uma resistência igual ou mesmo superior à média dos basaltos da Formação Serra Geral (163 MPa - ver Fig. I.10). No entanto, como verificado, não é possível a determinação direta deste valor.

A utilização, no ensaio de compressão simples, de amostras de diferentes tamanhos, objetivando reproduzir o efeito escala, poderia ainda fornecer o valor de resistência da rocha intacta. No entanto, a tendência de decréscimo dos valores de resistência, com o aumento do tamanho das amostras, nem sempre está presente, incluindo as rochas basálticas (VUTUKURI et alii, 1974; KACZYNSKI, 1986). Nos ensaios realizados por BARISON (1992), em amostras de basaltos da pedreira Bandeirantes (município de São Carlos-SP), não se verificou o efeito escala, ainda que os corpos de prova ensaiados correspondessem à rocha intacta e homogênea.

Tem se constatado ainda, que, em rochas fraturadas, à semelhança do entablamento cujos corpos de prova apresentam, via de regra, duas ou três juntas maiores e algumas menores, não é aconselhável a realização de ensaios para a verificação do efeito escala (FRANKLIN & DUSSEULT, 1989).

Entretanto, a resistência a compressão uniaxial, correspondente ao ensaio em rocha intacta, pode ser estimada com razoável precisão, a partir de ensaios em pequenas amostras, de entablamento, desprovidas de juntas. Este procedimento e os resultados obtidos são considerados no item 1.1.4 do presente capítulo.

No que se refere ao módulo de Young, os valores obtidos parecem ter sido menos influenciados pela presença das juntas, comparativamente à resistência. No entanto, o valor médio encontrado, 46 GPa, certamente é inferior àquele esperado para uma rocha intacta. Verifica-se ainda, que a avaliação indireta deste parâmetro, a partir de ensaios em rocha intacta, é também possível (ver o item 1.1.5 deste capítulo).

Interessantes conclusões podem ainda ser obtidas, confrontando-se os valores de resistência e módulo de elasticidade (Figura.IV.5), conforme esquema estabelecido por DEERE (1968):

- 90% dos pontos estão contidos em uma faixa mais horizontalizada, relativamente à zona determinada para os basaltos e outras rochas afins.
- Esta disposição dos pontos, reflete variações mais acentuadas na resistência (baixa a muito alta), relativamente ao módulo de elasticidade (moderado a alto).
- (considerando os intervalos de valores no sistema classificatório adotado no presente trabalho - ver Figura. IV.9, a resistência a compressão simples apresentaria a mesma variação - baixa a muito alta)
- Os valores de módulo de Young, quando relacionados aos valores de resistência (E_t/σ_c), correspondem, na maioria dos pontos (72%), ao Módulo Relativo Alto.
- Na verdade, o Módulo Relativo Alto revela uma condição de baixa resistência, devido ao efeito de rupturas prematuras.

Analisando-se as amostras 26, 27 e 28, verificam-se valores anormalmente altos para o coeficiente de Poisson, comparativamente aos valores típicos (0,10 a 0,25), conforme FRANKLIN & DUSSEAU, 1989, e mesmo, em relação ao máximo valor teoricamente possível (0,5). A abertura de juntas subverticais durante o ensaio (fato este nitidamente observado em algumas amostras), constitui a explicação mais plausível para tal fenômeno.

Figura IV.5 - Diagrama para classificação de rochas íntactas, com base na resistência à compressão uniaxial e módulo de elasticidade tangente (50% da Resistência) (modif. DEERE, 1968 e ATTEWEL FARMER, 1976)

1.1.2. Ensaio Dinâmico

As constantes elásticas, módulo de Young e coeficiente de Poisson, podem também ser determinadas a partir da velocidade de ondas elásticas. Foram então efetuados ensaios dinâmicos (pulsos ultrassônicos de alta frequência), para a obtenção da velocidade de ondas primárias (V_p) e secundárias (V_s), utilizando-se equipamentos do Departamento de Geotecnia - EESC/USP (Figura.IV.6a) e do IPT-SP.

Para a determinação precisa de V_s , utilizou-se o sal “Salicilato de Fenil” nas duas superfícies de conexão corpo de prova-geofone. Os ensaios dinâmicos em apreço, embora requeiram alguns procedimentos específicos para obterem-se resultados confiáveis, são de simples execução e não destrutivos, permitindo assim a posterior utilização das mesmas amostras em ensaios de compressão uniaxial (ver Figuras. IV.1a e IV.3.b-d).

A definição de V_p e V_s , permite a determinação do coeficiente de Poisson dinâmico (U_{din}) e do módulo de Young – dinâmico (E_{din}) por meio das expressões, derivadas da teoria da elasticidade para corpos homogêneos e isotrópicos, apresentadas na Figura IV.6b.

A análise comparativa dos parâmetros elásticos, confrontando-se os resultados dos ensaios dinâmicos com os estáticos (ver Figura IV.3d), revela alguns aspectos coerentes com aqueles observados por outros pesquisadores, conforme apresentado em LAMA & VUTUKURI (1978 a):

- menor dispersão para os parâmetros dinâmicos, indicando que estes são menos influenciados pela presença de fissuras ou juntas.
- valores maiores para o coeficiente de Poisson dinâmico.

(a)

$$\nu_{\text{din}} = \frac{1 - 2 Q^2}{2 (1 - Q^2)}$$

$$Q = \frac{V_s}{V_p}$$

$$E_{\text{din}} = V_p^2 \cdot \rho \frac{(1 - 2 \nu_{\text{din}}) (1 + \nu_{\text{din}})}{(1 - \nu_{\text{din}})}$$

ρ = densidade da rocha

(b)

Figura IV.6 - Ensaio dinâmico: a - equipamento utilizado para a determinação de V_p ; b - equações, da teoria da elasticidade, para a determinação do coeficiente de Poisson dinâmico (ν_{din}) e módulo de Young dinâmico (E_{din})

1.1.3 Ensaio Brasileiro

Nos ensaios de compressão simples, verificou-se a tendência de as juntas tipo I (preenchidas) resistirem mais às solicitações, relativamente às juntas tipo II. As circunstâncias em que ocorreu o preenchimento e a sua natureza (ver cap. III, item 2.5), parecem ter conferido a estas descontinuidades uma alta resistência à tração. Para a obtenção deste parâmetro, realizou-se o ensaio brasileiro, também utilizado para a verificação da resistência à tração da rocha intacta.

A dificuldade de se desenvolver o ensaio de tração pelo método direto, conduziu naturalmente à elaboração dos métodos de determinação indireta da resistência à tração. Dentre estes, destacasse o ensaio brasileiro, pela sua simplicidade de execução e por fornecer os resultados mais próximos àqueles obtidos pelo método direto (LAMA & VUTUKURI, 1978a). O ensaio brasileiro consiste, essencialmente, em solicitar pequenos discos, diametralmente (Figura IV.7b), o que induz à uma tensão de tração horizontal e à separação do corpo de prova ao longo de superfície vertical.

Embora o ensaio brasileiro requeira amostras de pequenas dimensões, na amostragem deparou-se com alguns obstáculos, tanto para a aquisição de corpos de prova de rocha intacta, como daqueles contendo uma única junta disposta diametralmente (Figura. IV. 7a). As várias tentativas empreendidas, para a obtenção de amostras de rocha intacta, resultaram em apenas três corpos de prova.

O equipamento então utilizado consiste, basicamente, de uma prensa (a mesma utilizada para o ensaio de compressão uniaxial) e o dispositivo mostrado na Figura. IV. 7b. Os valores de resistência à tração obtidos (Figura. IV. 7c), revelam uma alta resistência para as juntas tipo I e resistência muito alta para rocha intacta, conforme classificação aqui estabelecida (ver Figura.IV.9). Procedimentos específicos de ensaio, modos de ruptura e gráficos força x deslocamentos, podem ser apreciados no apêndice 2.

1.1.4 Índice de Resistência à Compressão Puntiforme

O ensaio de compressão puntiforme, da mesma forma que o ensaio brasileiro, pertence à família dos métodos de determinação indireta da resistência à tração. Embora deva ser entendido, sobretudo, como apenas um índice na caracterização e classificação de rochas, é frequente seu emprego na determinação da resistência da rocha intacta, em substituição ao ensaio de compressão uniaxial, e o estabelecimento de fatores de correlação entre os dois métodos. BROCH & FRANKLIN (1972), enumeram as seguintes vantagens do ensaio de carga pontual:

- a - Tendo em vista as pequenas cargas envolvidas, executa-se o ensaio, perfeitamente, com um equipamento portátil.
- b - Podem ser utilizados fragmentos irregulares como amostras.
- c - A eventual necessidade de se aumentar o número de ensaios (materiais heterogêneos), não implica no aumento de custos.
- d - Os resultados mostram menor dispersão, relativamente aos ensaios de compressão simples.
- e - Determina-se, de maneira mais simplificada, a eventual anisotropia, quanto à resistência.

Admite-se assim, face as vantagens então expostas, ser este o ensaio mais conveniente quando se pretende avaliar a resistência, à nível de rocha intacta, de rochas intensamente fraturadas à semelhança do entablamento.

No ensaio de compressão puntiforme, as amostras são rompidas pela aplicação de uma carga concentrada a partir de um par de compressores cônicos de metal (Figura IV.8a). As

amostras de entablamento utilizadas correspondem a fragmentos, aparentemente desprovidos de fraturas, obtidos pelo processo normal de britagem utilizado nas grandes pedreiras da região de Ribeirão Preto (SP).

Fundamentando-se no procedimento mais recentemente desenvolvido para o ensaio (ISRM, 1985), construiu-se o gráfico da Figura IV.8b e determinou-se o valor de índice de resistência à compressão puntiforme (11 MPa). Um estudo das correlações ou aplicações, defendidas por diversos autores, possibilitou ainda a elaboração de um sistema classificatório (Figura IV.9), que contempla o índice em questão, em associação com os parâmetros resistência à compressão simples e resistência à tração.

De acordo com a referida classificação, o índice de resistência à compressão puntiforme e o equivalente à resistência à compressão simples (275 MPa), situam-se no campo das rochas de resistência muito alta. Sendo então este último valor, o correspondente à resistência de um basalto com as mesmas características texturais do entablamento, porém, menos fraturado ou com juntas mais largamente espaçadas.

Quando se analisa o comportamento mecânico de diferentes rochas, com base no índice de resistência a carga pontual, necessita-se ter em mente qual método de cálculo foi considerado. Diferenças significativas existem entre os dois últimos métodos (ISRM, 1972; ISRM, 1985), o que conduz a resultados igualmente distintos. Considerações a este respeito e outros dados complementares encontram-se no Apêndice 3.

(a)

$$I_{S(50)} = 1000 (Q_{50} / 50^2)$$

$$I_{S(50)} = 10,9 \text{ MPa}$$

(b)

Figura IV.8 – Índice de resistência à compressão puntiforme: a – equipamento utilizado; b – procedimento para a determinação gráfica de $I_{S(50)}$, conforme método ISRM (1985) – (20 amostras – apêndice 3).

RESISTÊNCIA (MPa)			TERMOS DESCRITIVOS
COMPRESSÃO PUNTIFORME - $I_s(50)$ -	TRAÇÃO (ENSAIO BRASILEIRO) (*1) - σ_t -	COMPRESSÃO UNIAXIAL (*2) - σ_c -	
> 8	> 10	> 200	MUITO ALTA
4 - 8	5 - 10	100 - 200	ALTA
2 - 4	2.5 - 5	50 - 100	MODERADA
1 - 2	1.25 - 2.5	25 - 50	BAIXA
< 1	< 1.25	< 25	MUITO BAIXA

*1 - $\sigma_t = 1.25 I_s(50)$; *2 - $\sigma_c = 25 I_s(50)$

Figura IV.9 - Classificação das rochas quanto à resistência, em ensaios uniaxiais (adap. BIENIAWSKI, 1976; FORMAINTRAUX, 1976; BROOK, 1985; ISRM, 1985)

1.1.5 Índice Esclerométrico

Objetivando ainda a avaliação da resistência à compressão uniaxial do material rochoso do entablamento, via indireta, procedeu-se à avaliação da resistência pelo emprego do esclerômetro Schmidt. Ainda que constitua uma alternativa menos confiável, relativamente ao ensaio de compressão puntiforme, sua utilização apresenta algumas vantagens (GUIDICINI & TOGNON, 1973):

- a - obtenção de valores relativamente precisos.
- b - extrema simplicidade operacional.
- c - ensaios de caráter não destrutivo.
- d - equipamento de baixo custo.
- e - rapidez das medidas.

O ensaio, repetido 45 vezes, “in situ” (pedreira Carrascoza - Ribeirão Preto), consiste na projeção e ricochete de um pequeno pistão, localizado na extremidade do esclerômetro (figura IV.10a), em superfície horizontal de rocha sã e intacta. A escala graduada do aparelho indica a altura de retorno, que corresponde ao próprio índice esclerométrico. O valor médio encontrado (54 – Figura IV.10b), associado à massa específica (2.87 g/cm^3), torna possível uma estimativa aproximada da resistência à compressão simples (221 MPa – Figura IV.10c) e do módulo de Young (76 MPa Manual do ensaio esclerométrico - Soiltest Inc.).

YOSHIDA (1972), conclui ainda, que a reprodutibilidade de leituras em um esclerômetro e entre esclerômetros (comparando-se com resultados de outros autores), é muito boa. A análise da Figura IV.11, onde o material rochoso do entablamento é comparado com outros basaltos compactos, verifica-se, com exceção do basalto “Olímpia” (com massa específica excepcionalmente alta), que os valores de resistência, obtidos via índice esclerométrico, são inferiores àqueles produzidos no ensaio direto.

PROPRIEDADES		BASALTOS DA FORMAÇÃO SERRA GERAL				
		ENTABLAMENTO	BASALTO "A" B.CAPIVARA	BASALTO OLÍMPIA	BASALTO S. DE BROTAS	BASALTO ILHA SOLTEIRA
ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO		54	39.5	48	47	42
MASSA ESPECÍFICA APAR. (g/cm ³)		2.87	2.90	3.27	2.83	2.94
Resistência à Compressão Simples (MPa)	MET. INDIRETO (Fig.IV.10c)	221	104	250	145	120
	MET. DIRETO	275*	151	178	198	190

* - Valor obtido a partir da relação $\sigma_c = 25 I_s(50)$

Figura.IV.11- Avaliação da resistência à compressão uniaxial, via índice esclerométrico, de alguns basaltos compactos da Formação Serra Geral (YOSHIDA, 1972) e da rocha intacta do entablamento.

OBS: Em todos os 5 tipos de basalto empregou-se o mesmo esclerômetro (modelo RM - 710)

1.1.6 Conclusões

Comparando-se os valores de resistência à compressão uniaxial (80 MPa) e módulo de Young (46 GPa), obtidos em amostras de entablamento (Formação Serra Geral), com aqueles do Grupo Rio Columbia (ver Figura II.9b), 292 MPa e 76 GP, respectivamente, verifica-se que estes apresentam menor dispersão e são significativamente superiores àqueles. Amostras desprovidas de juntas, retiradas de compartimentos estruturais menos fraturados (entablamento colunar ou colunata interna - ver Figura II.9a) constituem, provavelmente, a razão dos altos valores encontrados para a rocha intacta do entablamento no Grupo Rio Columbia.

A importância da utilização dos ensaios de compressão puntiforme e dureza esclerométrica, entre outros ensaios índices, para estimativa da resistência a compressão uniaxial de rochas muito fraturadas, é realçada por CARGILL & SHAKOOR (1990). Dos resultados então obtidos, por estes autores, destacam-se os seguintes:

- Existe uma forte correlação linear entre a resistência à compressão simples e os parâmetros índice de resistência à carga pontual e índice esclerométrico.
- Verifica-se que o índice esclerométrico apresenta valores subestimados, para o equivalente a resistências superiores a 150 MPa.
- O ensaio de compressão puntiforme aparenta ser o melhor método para estimativa da resistência à compressão simples.

A avaliação, indireta, da resistência à compressão e à tração da rocha intacta do entablamento, situaria esta, conforme sistema classificatório adotado nesta pesquisa (ver Figura IV.9), no campo das rochas de resistência muito alta. Verifica-se resultado semelhante para entablamentos do Grupo Rio Columbia (Figura IV.12).

PROPRIEDADES	ENTABLAMENTO		BASALTOS EM GERAL
	FORMAÇÃO SERRA GERAL	GRUPO RIO COLUMBIA (TAB. - Fig. II.9)	
DENSIDADE (g/cm ³)	2.87	-	1 2.8 - 2.9
POROSIDADE (%)	0.6	-	1 0.1 - 1.0
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL (MPa)	80(42)/275 *1	292 (9)	2 100 - 300
MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	46 (10)/76 (21) *2	75.5 (6)	-
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (E.BRAS.) (MPa)	17 (2)	14.5 (3)	-
VELOCIDADE SÔNICA - Vp (m/s)	5410 (600)	-	2 4500 - 6500

*1 - $\sigma_c = 25 I_s(50)$; *2 - via índice esclerométrico

Figura IV.12 - Quadro apresentando os valores médios e desvio padrão de parâmetros geotécnicos do material rochoso do entablamento, na Formação Serra Geral e Grupo Rio Columbia, comparativamente aos valores esperados para os basaltos em geral

1.2 Propriedades Tecnológicas

Procedeu-se à caracterização tecnológica de amostras ou britas de entablamento, fundamentando-se na metodologia empregada pelo IPT (1980). Os resultados, se comparados aos obtidos para os basaltos em geral da Bacia do Paraná (Capítulo I - item 3), revelam que ambos se enquadram na categoria das rochas de comportamento satisfatório, quanto a sua utilização como material de construção civil (Figura IV.13).

O índice ou coeficiente de alterabilidade, parâmetro extremamente importante na caracterização tecnológica de rochas, foi também determinado a partir de ensaios laboratoriais em agregados. Objetivando uma análise comparativa, envolvendo as rochas basálticas estudadas pormenorizadamente por FARJALLAT (1971) e YOSHIDA (1972), empregou-se o mesmo procedimento desenvolvido por estes autores. Os resultados (Figura IV.14 - comparar com Figuras I.12 e IV.11), colocam em evidência a maior sensibilidade do entablamento, à nível de rocha intacta, no que concerne às variações de temperatura e umidade (ensaios de saturação - secagem e, imersão em solução saturada de sulfato de sódio - secagem).

No que diz respeito aos ensaios de adesividade, para o uso do agregado em pavimentação asfáltica, verifica-se um comportamento não satisfatório, tanto para o método RRL - modificado como para o método Riedel Weber (PICCOLO & ADISSY, 1970). O resultado é, aparentemente, o esperado para rochas, como o entablamento, de textura quase vítrea e baixa porosidade. Obteve-se, em ensaios suplementares, um resultado satisfatório ao adicionar-se, ao ligante betuminoso, 0,5% em peso de dope (Kling Beta 200), substância esta normalmente empregada para melhorar a adesividade.

No ensaio de determinação da forma média dos fragmentos, (norma IPT M-49), das 50 amostras analisadas, 95% apresentaram a forma cúbica. Resultado considerado satisfatório, tendo em vista que agregados com graus mais elevados de cubicidade, apresentam maior resistência em concretos e promovem maior compacidade em lastros de vias férreas.

Embora utilizado, preferencialmente, na caracterização de rochas de comportamento argiloso, determinou-se ainda o índice de desgaste a úmido, como ensaio complementar. O valor encontrado, 99,8%, enquadra o entablamento na classe das rochas de resistência, ao desgaste a úmido, extremamente alta (FRANKLIN & CHANDRA, 1972).

PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS	ENTABLAMENTO (Material Rochoso)	BASALTOS-FORMAÇÃO SERRA GERAL (Ver Fig. I.10)	VALOR PADRÃO (IPT, 1980)
MASSA ESPECÍFICA APARENTE (g/cm ³)	2.87	2.89	> 2.5
ABSORÇÃO (%)	0.21	0.49	< 1.0
POROSIDADE APARENTE (%)	0.60	1.49	< 2.0
ABRASÃO LOS ANGELES (%)	12.2	15.8	< 40
ÍNDICE DE TENACIDADE TRETON (%)	10.1	7.4	< 20
ESMAGAMENTO (%)	15.2	14.4	< 20
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL (MPa)	275 *	162.7	> 140

* - Valor obtido a partir da resistência à carga puntiforme: $\sigma_c = 25 I_s(50)$

Figura IV.13 - Quadro comparativo das características tecnológicas do entablamento, basaltos (em geral) da Formação Serra Geral e os valores para utilização adequada em construção civil

ENSAIO DE ALTERAÇÃO	ÍNDICE DE ALTERABILIDADE - K (*1)				
	ENTABLAMENTO (Rocha Intacta)	BASALTO "A" BARRAGEM CAPIVARA	BASALTO OLÍMPIA	BASALTO SERRA DE BROTA	BASALTO ILHA SOLTEIRA
EXTRATOR SOXHLET (30 CICLOS)	0.018/0.005 *2	0.007/0.020 *2	0.013	0.008	0.001
SATURAÇÃO SECAGEM (30 CICLOS)	0.046	0.002	0.018	0.001	0.005
ETILENO GLICOL (15 DIAS)	0.005	0.088	0.002	0.014	0.023
SAT. SOL. Na ₂ SO ₄ SECAGEM (15 CICLOS)	0.043	0.105	0.001	0.012	0.008
VALOR MÉDIO	0.0280	0.0505	0.0085	0.0088	0.0093

*1 - $10^{-2} > K > 10^{-3}$ (Alterabilidade Baixa); $10^{-1} > K > 10^{-2}$ (Alterabilidade Moderada); $1 > K > 10^{-1}$ (Alterabilidade Alta)

*2 - Cálculo de K segundo Farjallat (1971)

Figura IV.14 - Quadro comparativo apresentando o índice de alterabilidade de basaltos compactos (YOSHIDA, 1972) e entablamento, para diferentes ensaios de alteração acelerada

2 - Comportamento como Maciço Rochoso

As discontinuidades geológicas geralmente exercem marcante influência no comportamento geotécnico de maciços rochosos, solicitados por obras civis de grande porte. Procede-se, rotineiramente, à minuciosa descrição geológica e à determinação de vários parâmetros geotécnicos, para a adequada caracterização desta feição estrutural. A abordagem, aqui desenvolvida, contempla exclusivamente o diaclasamento primário, ou seja, as juntas tipo I, II e III, que definem o típico fraturamento subvertical do entablamento e, as discontinuidades horizontais que eventualmente cortam este compartimento.

2.1 - Classificação Geomecânica

As principais feições estruturais do entablamento, em termos globais e específicos para cada tipo de junta e, aquelas verificadas nos blocos obtidos por processo de desmonte, tornam possível a elaboração do modelo estrutural ou geométrico da Figura IV.15. Fundamentando-se neste modelo, procedeu-se a determinação dos parâmetros geotécnicos, das referidas juntas, para sua posterior utilização nos dois principais sistemas de classificação geomecânica de maciços rochosos.

No estudo de caracterização geotécnica de discontinuidades e maciços rochosos, o emprego de determinados parâmetros (atitude, espaçamento, rugosidade etc.) está intimamente vinculado à própria definição de discontinuidade e família de juntas (ISRM, 1981):

- discontinuidade: é o termo geral para qualquer discontinuidade mecânica, de um maciço rochoso, que tenha resistência à tração baixa ou nula. O termo, de significado genérico, abrange as juntas, superfícies de estratificação e foliação metamórfica, zonas de fraqueza e falhas.
- família de juntas: define um grupo de juntas paralelas ou subparalelas.

As juntas tipo I, como já verificado apresentam alta resistência à tração (ver Figura IV.7/IV.9). As juntas tipo II, extremamente rugosas, podem estar preenchidas por delgada película. As juntas tipo III, incipientemente desenvolvidas, irregulares e descontínuas, são mais facilmente identificadas nos fragmentos ou blocos produzidos pelos desmontes, ou mesmo, em cortes onde o entablamento encontra-se em estado avançado de alteração (Figura IV.15c). Excetuando-se as descontinuidades horizontais, não se observa paralelismo de superfícies no sistema de juntas “colunares” do entablamento. A pequena persistência e irregularidade destas juntas dificulta ainda a determinação de suas atitudes (direção e mergulho).

Verifica-se assim, uma série de obstáculos ao se proceder à descrição quantitativa das juntas do entablamento, à nível de juntas individuais ou mesmo de família de juntas. Tendo em vista, entretanto, que a caracterização geotécnica de descontinuidades e maciços rochosos constitui, em certo grau, uma operação subjetiva, justifica-se, em determinadas situações, o emprego de algumas adaptações.

As juntas tipo I, fortemente seladas e as mais regulares no colunamento subvertical, ainda que delimitem, geometricamente, polígonos relativamente regulares (Figura IV.15b), evidentemente, não condizionarão o tamanho e forma dos blocos obtidos nos processos de desmonte à fogo. Estes blocos ou fragmentos, em verdade, são delimitados, com raras exceções, por juntas tipo II (Figura IV.15d) e apresentam dimensões centimétricas (fragmentação de “microcolunas”) a métricas (ver Figura III.9b).

Adotou-se então, em uma escolha conservativa, as “microcolunas”, como elemento básico na definição do número de famílias e espaçamento de juntas, no entablamento. Para o isolamento das “microcolunas” admite-se a existência de duas famílias de juntas, que são acrescidas à família de descontinuidades horizontais (esporádicas). A delimitação vertical das “microcolunas”, na ausência das descontinuidades horizontais, constitui tarefa extremamente complicada, pelo fato de as juntas tipo III estarem, geralmente, ocultas. Assim, não foi possível a determinação do espaçamento das juntas “colunares”, na direção vertical. Já o diâmetro médio das “microcolunas”, 7 centímetros, mensurável tanto em seção horizontal como vertical, corresponderia ao espaçamento na direção horizontal.

A Designação da Qualidade da Rocha (RQD), parâmetro que por si só constitui um índice de classificação de rochas, é também considerado nos principais sistemas classificatórios de maciços rochosos. O RQD, estabelecido por DEERE (1968), corresponde à recuperação modificada de testemunhos de sondagem. A análise criteriosa dos testemunhos da sondagem rotativa A-115, obra de Nova Ponte (ver Figura IV.24), onde foram atravessados 52 metros de entablamento praticamente são (derrame I), permitiu a determinação do RQD (90), conferindo então maciço a classificação “bom a excelente” (ver Fig. IV.16a).

2.1.1 Sistema RMR

O sistema de classificação geomecânica ponderada RMR (“Rock Mass Rating”), elaborado e aperfeiçoado em várias etapas por BIENIAWSKI (1974, 1976, 1979, 1984, 1988 e 1989), incorpora os seguintes parâmetros:

- Resistência à compressão simples.
- Designação da Qualidade da Rocha (RQD).
- Espaçamento das descontinuidades.
- Condição das descontinuidades.
- Ação da água subterrânea.
- Orientação das descontinuidades.

Atribuiu-se, para estes parâmetros, pesos diferenciados conforme sua importância e em função dos 5 intervalos de variação estabelecidos para cada parâmetro. O valor RMR, corresponderia ao somatório dos pesos que, por sua vez, pertencerá a uma das 5 classes de maciço rochoso (ver anexo 2). Ainda que considerada uma classificação não abrangente e insuficientemente sensível (KIRSTEN, 1988), o sistema RMR, face à sua simplicidade e maciça aplicação (351 casos históricos) em obras civis e mineiras, vem se confirmando no meio geotécnico como um dos mais importantes métodos.

Os procedimentos e atribuições de pesos para cada um dos parâmetros, no entablamento, estão detalhadamente apresentados no anexo 2. O valor de RMR então calculado, 78 ou 86, confere ao entablamento a condição de maciço de boa ou muito boa qualidade (ver Fig. IV.16b). Deve-se ressaltar, entretanto, que esta qualificação diz respeito a um maciço (entablamento)

cortado, exclusivamente, por fraturas de origem primária e não afetado por outros fatores externos (perturbações devido a esforços tectônicos, alteração intempérica etc.).

Utilizando-se o sistema RMR, seria ainda possível a verificação do provável comportamento anisotrópico do entablamento (simetria axial ou transversalmente isotrópica). Com este propósito, os 3 primeiros parâmetros (resistência, RQD e espaçamento) deveriam então ser determinados nas direções vertical e horizontal. Na verdade, constata-se não ser possível tal procedimento: a resistência só pôde ser determinada paralelamente ao colunamento subvertical (item 1.1.1); o RQD foi calculado a partir de um furo de sondagem vertical; o espaçamento só é mensurável na direção horizontal.

2.1.2 Sistema Q

Constitui, provavelmente, o melhor sistema classificatório de maciços rochosos (BARTON et alii, 1974; BARTON, 1976, 1988). Concebido, à princípio, para ser aplicado a túneis (212 casos históricos), pode ser correlacionado ao sistema RMR e assim, indiretamente, utilizado para outros fins. Semelhantemente à classificação RMR, o sistema Q compreende 6 parâmetros:

- Designação da Qualidade da Rocha (RQD).
- Número de famílias de descontinuidades (J_n).
- Grau de alteração das superfícies de descontinuidades (J_a).
- Ação da água subterrânea (J_w).
- Estado de tensões do maciço (SRF).

As detalhadas descrições das várias situações, definidas para cada parâmetro, e o método de avaliação adotado (ver anexo 3), evidenciam ser este um método classificatório bem mais sensível, face às possíveis e variadas condições apresentadas pelos maciços rochosos. A aplicação do sistema Q ao entablamento, resultou no valor 40, conferindo-lhe então a qualificação “maciço bom a muito bom” (ver Fig. IV.16c). Analisando-se esta figura, verifica-se ainda a mesma classificação (maciço bom a muito bom), nos três principais sistemas de classificação geomecânica de maciços rochosos.

ÍNDICE - RQD (%)	TERMOS DESCRITIVOS
0 - 25	MUITO RUIM
25 - 50	RUIM
50 - 75	SATISFATÓRIO
75 - (90)	BOM
(90) - 100	EXCELENTE

a- RQD: Rock Quality Designation (DEERE & DEERE, 1988)

SISTEMA - RMR	CONDIÇÃO GERAL DO MACIÇO
< 20	MUITO RUIM
21 - 40	RUIM
41 - 60	SATISFATÓRIO
61 ⁽⁷⁸⁾ - 80	BOM
81 ⁽⁸⁶⁾ - 100	MUITO BOM

b- RMR: Rock Mass Rating (BIENIAWSKI, 1989)

SISTEMA - Q	CLASSE DE MACIÇO
< 0.01	EXCEPCIONALMENTE RUIM
0.01 - 0.1	EXTREMAMENTE RUIM
0.1 - 1.0	MUITO RUIM
1 - 4	RUIM
4 - 10	SATISFATÓRIO
10 - (40)	BOM
(40) - 100	MUITO BOM
100 - 400	EXTREMAMENTE BOM
> 400	EXCEPCIONALMENTE BOM

c - Q (RMQ): Rock Mass Quality (BARTON, 1988)

Figura IV.16 - Qualificação de maciços rochosos, conforme os principais sistemas de classificação geomecânica (destaque para as classes "maciço bom e muito bom", referentes ao entablamento)

2.1.3 Principais Aplicações

Ainda que os sistemas de classificação geomecânica não substituam os projetos de engenharia, são extremamente úteis, pois fornecem uma base para a interpretação das características de cada classe de maciço rochoso, possibilitam a obtenção de dados quantitativos e diretrizes para projetos, estabelecem uma base comum para comunicação entre engenheiros e geólogos etc. (BIENIAWSKI, 1989).

O sistema RMR, face à sua maior simplicidade e versatilidade, tem sido utilizado inclusive para a estimativa de deformabilidade e resistência de maciços rochosos. BIENIAWSKI (1978), correlacionou resultados de ensaios de deformabilidade (E_m) in situ com valores de RMR e obteve a equação 1. Os estudos desenvolvidos, posteriormente, por SERAFIM & PEREIRA (1983), incluindo rochas menos resistentes, resultaram na equação 2.

$$E_m = 2 \text{ RMR} - 100 \quad (\text{RMR} > 50) \quad (1)$$

$$E_m = 10 \text{ RMR} - 10/40 \quad (\text{RMR} < 50) \quad (2)$$

O critério empírico proposto por HOEK & BROW (1988), possibilita ainda a avaliação da resistência de maciços rochosos, empregando-se o fator RMR (equações 3, 4 e 5).

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m \cdot \sigma_c \cdot \sigma_3 + s \cdot \sigma_c^2} \quad (3)$$

$$m = m_i \exp\left(\frac{\text{RMR} - 100}{28}\right) \quad (4)$$

$$s = \frac{\exp.(\text{RMR} - 100)}{9} \quad (5)$$

onde: σ_1 = tensão de ruptura principal maior

σ_3 = tensão principal menor

σ_c = resistência à compressão uniaxial.

m e s = constantes empíricas (maciços não perturbados)

m_i = constante determinada a partir do ensaio triaxial em laboratório

Verifica-se ainda a possibilidade de se aplicar o sistema RMR, diretamente, não apenas, a projetos de túneis (BIENIAWSKI, 1984), mas também em projetos de barragens (BIENIAWSKI & ORR, 1976) e taludes (ROMANA, 1985). Em todas estas aplicações, o parâmetro "orientação das descontinuidades" desempenha um papel específico (Quadro B - Anexo 2) e extremamente importante. Em projetos de taludes, por exemplo, a disposição muito desfavorável de uma determinada descontinuidade, ou família de descontinuidades, implicaria em subtrair do fator RMR o valor 60.

A utilização, indireta, do sistema Q nas várias aplicações então apresentadas, é praticável, bastando para isso o emprego da correlação entre RMR e Q (equação 6), formulada por BIENIAWSKI (1976), com base em 111 casos históricos.

$$\text{RMR} = 9 \ln Q + 44 \quad (6)$$

Os valores de RMR e Q, respectivamente 78/86 e 40; se utilizados nas equações aqui apresentadas, certamente forneceriam altos valores para o módulo de deformabilidade e para a resistência, bem como confeririam ao entablamento excelentes condições como maciço rochoso em túneis, fundações e taludes. No entanto, estes valores refletem apenas a influência da densa rede de juntas primárias, sem a consideração de outros importantes fatores como, maciço alterado em maior ou menor grau e a presença de descontinuidades secundárias.

O exemplo, a seguir apresentado, fornece uma ideia do comportamento geotécnico do entablamento, sob várias condições. Verificam-se situações em que o maciço, ora encontra-se inalterado, ora afetado por processos intempéricos ou ainda deformado por solicitações tectônicas. O local corresponde às escavações de construção de uma grande barragem, onde enfrentou-se problemas relativos a obras subterrâneas e estabilidade de taludes.

2.2 - O Exemplo do Maciço Rochoso da UHE de Nova Ponte

A usina hidrelétrica de Nova Ponte, de propriedade da Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG, está sendo construída no Rio Araguari, à aproximadamente 1, 5 Km à jusante da cidade de Nova Ponte, na região do Triângulo Mineiro.

Os extensos cortes de escavação, na obra, expõem, preferencialmente, rochas basálticas da Formação Serra Geral. Os espessos derrames, então identificados, correspondem exatamente ao litótipo entablamento, com todas as suas características peculiares, definidas no presente trabalho, em termos texturais, estruturais e geotécnicos.

2.2.1 - Aspectos Gerais

Geologicamente, a região situa-se na borda norte-nordeste da Bacia do Paraná. Os principais tipos litológicos presentes no local da obra, correspondem a determinadas rochas pré-cambrianas do Grupo Araxá e os derrames basálticos da Formação Serra Geral.

Os litótipos metamórficos do Grupo Araxá estão representados na área em apreço, principalmente, por quartzo - sericita - xistos que afloram na calha do rio. O plano de xistosidade principal possui atitude N 10-30 E/20-40 SE. Verifica-se ainda, que esta litologia se encontra seccionada por três padrões de juntas tectônicas subverticais e verticais, orientadas segundo as direções NW, NS e NE (CEMIG, 1982; PATRÃO et alii, 1989).

Os derrames basálticos de Nova Ponte, diferentemente daqueles observados em várias dezenas de afloramentos no Estado de São Paulo, incluindo aqueles expostos nas escavações das obras de grandes barragens já concluídas, estão singularmente associados aos seguintes fatores:

- O derrame I está diretamente assentado sobre rochas metamórficas do Pré-Cambriano;
- No local da obra, o vale do Rio Araguari é estreito e profundo;
- Os derrames basálticos são constituídos, individualmente, praticamente em toda a sua espessura, pelo litótipo basáltico entablamento.

Para a construção da Casa de Força, Vertedouro e outras estruturas de barragens, foram necessárias escavações diversas envolvendo, aproximadamente, 4 milhões de metros cúbicos de rocha, o que possibilitou a exposição de extensos cortes de rochas inalteradas.

Em diferentes ocasiões, nos anos de 1988 a 1990, este autor teve a oportunidade de observar e documentar feições geológicas, coletar dados e obter informações, no local de implantação da usina hidrelétrica de Nova Ponte. O estudo das principais feições litoestruturais, amplamente expostas nos cortes de escavação (Figura IV.17), tornou possível a elaboração de um perfil geológico esquemático (Figura IV.18).

Figura IV.17 – Contato xisto/basalto em corte de escavação da Casa de Força – UHE de Nova Ponte – MG.

Notar: Alto estrutural do embasamento cristalino e, sobreposto a este, um espesso bolsão de brecha basáltica.

2.2.2 - A Zona de Contato Xisto-Basalto

O contato entre o basalto e o xisto constitui, indubitavelmente, a mais importante feição geológico-geotécnica do maciço local. A zona de influência do referido contato, com espessura em torno de 3 metros (compartimento c - Figura IV.18), compreende 4 horizontes distintos, descritos a seguir de baixo para cima:

a - O topo do embasamento, onde verifica-se com frequência a existência de faixas de material argiloso cisalhado; o xisto, entre estes horizontes de falhamento e seu contato com a brecha sedimentar, apresenta-se via de regra visivelmente deformado (xisto “arrepinado”); os altos estruturais do embasamento, estão associados a presença de rochas metamórficas mais resistentes (quartzo-xistos, quartzitos etc.) que, evidentemente, ofereceram maior resistência aos processos erosivos pré-derrames basálticos.

b - Arenito (Botucatu) e/ou brecha sedimentar altamente resistente; fragmentos de xisto encontram-se envolvidos por material arenoso avermelhado.

c - Brecha basáltica, composta por fragmentos de basalto compacto, amigdaloidal e geodos centimétricos preenchidos por calcita; localmente, associado simetricamente aos altos estruturais, ocorre um espessamento da referida brecha; estima-se para o bolsão alongado de brecha, apresentado na Figura IV.17, as seguintes dimensões: 4 metros de altura, 8 metros de largura e comprimento superior a 100 metros.

d - Basalto compacto e/ou amigdaloidal, intensamente fraturado, correspondente ao compartimento 11B21, ocorre praticamente ao longo de todo o contato; as fraturas estriadas e irregulares são substituídas, em vários trechos, por um fraturamento plano-paralelo.

Os horizontes de basalto e xisto, adjacentes ao contato propriamente dito, foram incluídos na denominada “zona de contato” pelo fato de terem sido afetados, juntamente com as brechas por deslocamentos cisalhantes. Soluções adequadas, visando evitar o contato, foram adotados nos projetos das obras subterrâneas (túnel de desvio e condutos forçados).

Com o objetivo de se realizar a perfeita caracterização geológico-geotécnica desta interface, procedeu-se, na fase de projeto básico, à abertura de 3 galerias de investigação, atravessando o maciço exatamente na região do contato xisto-basalto. Efetuou-se, na ocasião, um meticuloso mapeamento desta feição, na escala 1:50 (CEMIG, 1986). Algumas seções das paredes da galeria nº 1 (3 metros de diâmetro e 100 metros de extensão), estão reproduzidas na Figura IV.19 (dividida em três partes):

Figura IV.19b(cont.) - Seção geológica da parede direita da galeria nº 1, estacas 72-77/77-80. Ombreira esquerda - UHE de Nova Ponte.

Observar: falhamentos múltiplos (estacas 72-75) e conjugado (estaca 81); fraturamento sub-vertical inclinado simetricamente, no basalto compacto (estacas 82-84)

PARÂMETROS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS	LITOLOGIA	CONTATOS E ESTRUTURAS
<p><u>Grau de Decomposição</u></p> <p>D1 - Rocha sã</p> <p>D2 - Rocha pouco decomposta</p> <p>D3 - Rocha muito decomposta</p> <p>D4 - Rocha extremamente decomposta</p> <p>D5 - Solo transportado ou solo residual</p> <p><u>Grau de Fraturamento - (frat/m)</u></p> <p>F1 - (< 1) - pouco fraturado</p> <p>F2 - (1-5) - fraturado</p> <p>F3 - (5-10) - muito fraturado</p> <p>F4 - (10-20) - extremamente fraturado</p> <p>F5 - (> 20) - fragmentado</p> <p><u>Grau de Consistência da Rocha</u></p> <p>C1 - Muito consistente</p> <p>C2 - Consistente</p> <p>C3 - Pouco consistente</p> <p>C4 - Sem consistência</p>	<p>Basalto</p> <p>Brecha Basáltica</p> <p>Arenito</p> <p>Brecha Sedimentar</p> <p>Xisto</p> <p>Quartzo Xisto</p>	<p>CA - Contato aberto</p> <p>CF - Contato fechado - CF(5) Especificando, em centímetros a espessura de zona de-composta</p> <p>Contato geológico</p> <p>Falha fechada</p> <p>Falha aberta preenchida por material argiloso</p> <p>Fraturas</p> <p>Plano de fratura tipo "pneu" coincidente com a parede da galeria, com indicação aproximada de direção e mergulho</p> <p>Mina d'água</p> <p>Mina d'água com jorro</p> <p>⊗ N 80° W/10°SW - Atitude da xistosidade</p> <p>Estrias (inclinação, azimute)</p> <p>Preenchimento de calcita</p> <p>Dobras ocasionadas por falhamento</p>

Figura IV.19c (cont.) - Legenda das Figuras IV.19a e IV.19b: Seções geológicas das paredes da galeria nº 1, ombreira esquerda - UHE de Nova Ponte

A escolha dos referidos perfis, tem a finalidade de elucidar a natureza dos deslocamentos cisalhantes, realçando-se os seguintes aspectos:

- Os falhamentos sub-horizontais afetaram os 4 compartimentos da zona de contato (Fig.IV.19a);
- A presença de deslocamentos múltiplos e conjugados, são evidências do encurtamento horizontal do maciço local (Figura IV.19b).

Evidências de falhamentos transcorrentes, estendendo-se por centenas de metros, foram também encontradas no interior do derrame I. O estudo do material de preenchimento, extremamente alterado, destas falhas, revelou, conforme BRITO et alii (1990), a presença de argilo-minerais, veios carbonáticos, fragmentos de basalto e superfícies, individualizadas, nitidamente estriadas. As falhas orientam-se segundo as direções NE e NW; padrão semelhante, de falhas verticais, de acordo com os mesmos autores, verifica-se também no derrame II.

A inequívoca presença de falhamentos (normais, transcorrentes e/ou inversos) nos maciços basálticos da Bacia do Paraná, tem suscitado interpretações diversas quando a origem destas falhas. A observação de nítidas feições estruturais, indicativas de movimentos cisalhantes, no maciço de Nova Ponte, parece estar associada a fenômenos mais regionais. Assim, dedicar-se-á espaço na presente pesquisa para o detalhamento do assunto, tendo em vista a sua aplicabilidade a outras regiões da bacia e, sua importância no estudo de caracterização geotécnica de maciços rochosos.

A descrição das evidências de falhamentos na zona de contato, apresentadas por BRITO et alii (1990 pg.456), são significativamente minuciosas e esclarecedoras, justificando-se assim a sua apresentação, literalmente, a seguir:

- Uma zona de falha sub-horizontal muitas vezes formada por um conjunto de superfícies conjugadas que cruzam frequentemente o contato, desenvolvendo-se ora no basalto ora no xisto, mas a uma distância nunca superior a 1, 5 metros do contato;

- A existência de três litologias tão contrastantes como o basalto, o arenito e o xisto, permitiu observar estas feições com muito detalhe, determinando-se com precisão os rejeitos ao longo das paredes que caracterizam indiscutivelmente a feição como sendo uma falha;
- O efeito da falha no xisto é um dobramento sistemático da xistosidade na direção do movimento (arrepiaamento). Ao cruzar determinada feição do xisto, como por exemplo as juntas preenchidas com areia, estas teriam sido deslocadas e os rejeitos medidos, atingindo até 1 m;
- Tanto o arenito/brecha, ao longo do contato, como o que preenche as juntas está silicificado, muito endurecido. A maneira como o mesmo rompeu nitidamente em regime rúptil, e as estrias e superfícies espelhadas observadas atestam claramente que a areia já estava silicificada quando do falhamento;
- No basalto, as falhas estão em geral preenchidas com calcita ou argila-mineral escuro localmente de cor bege, fortemente estriadas e com indicação que sua cristalização foi afetada pelo movimento. O sentido do movimento determinado com base nas estrias é W-E, quase paralelo ao leito do rio;
- Evidências dessas feições foram encontradas em sondagens até 300 m afastadas do rio. Porém as falhas não são contínuas e frequentemente desaparecem, restando o contato normal do basalto sobre o xisto, enquanto em outros locais a intensidade do fenômeno chegou ao ponto de fraturar intensamente a rocha circundante;
- Os rejeitos reais não puderam ser definidos, mas ficou claro que se trata de movimento da ordem de poucos metros.

Modelo I

Com base nas características já apresentadas, BRITO et alii (1990) consideram que todas as feições de falhamento, observadas em Nova Ponte, são geneticamente primárias. Posteriormente, durante a erosão do vale, foram parcialmente reativadas. O modelo então proposto – Modelo I – consiste na seguinte sequência de eventos:

- a - Desenvolvimento de juntas de alívio, subverticais e sub-horizontais, no embasamento, em uma época pré-derrame;
- b - Deposição de areia, envolvendo fragmentos de quartzo e xisto, sobre a superfície do embasamento;
- c - Extravasamento do derrame basáltico com rápido endurecimento da base e silicificação da areia;
- d - Originam-se então, as primeiras juntas de retração e de cisalhamento com atitudes variáveis;
- e - O prosseguimento da movimentação do derrame, como que desenvolve uma tendência ao arraste da base;
- f - O aumento progressivo da viscosidade, associado ao movimento do próprio derrame, resultaria em rompimento local da base e a geração das falhas horizontais descontínuas, bem como um refraturamento da zona endurecida;
- g - No núcleo ainda não consolidado desenvolvem-se simultaneamente, feições verticais de cisalhamento dúctil;
- h - Estas feições são alteradas pelos fluídos, na fase final de cristalização, e submetidas a cisalhamentos conjugados pelos deslocamentos finais.
- i - Subsequentemente juntas horizontais e colunares são formadas;

j - As falhas verticais são reativadas durante o rápido processo de evolução geomorfológica do vale fluvial.

Não se verifica uma zona de contato, semelhantemente cisalhada, entre os derrames I e II. Os processos dinâmicos de extravasamento e consolidação de lavas, embora ainda não bem compreendidos, permitem a adoção de algumas premissas básicas.

Nos derrames basálticos da Formação Serra Geral ocorre, frequentemente, uma feição geológica sub-horizontal muito peculiar, as “juntas-falhas”. Com o objetivo de se obter parâmetros geomecânicos confiáveis, em dezenas de projetos de grandes barragens, esta notável descontinuidade foi detalhadamente caracterizada, no que diz respeito às suas propriedades geológicas e geotécnicas. O conhecimento daí advindo, contribuiu significativamente para uma melhor compreensão dos possíveis fenômenos envolvidos, na fase final de resfriamento e solidificação de derrames de lava.

Os aspectos abordados, nos trabalhos mais recentes, a este respeito (SOUZA JR., 1989; SOUZA JR. & CAMPOS, 1987b e 1990b), deverão então ser confrontados com as propriedades apresentadas pelas correspondentes feições geológicas do maciço basáltico de Nova Ponte. Este estudo comparativo revela que determinadas etapas do modelo I, ora apresentado, são passíveis de questionamento.

A tendência de movimentação do derrame, estando este ainda em fase líquida com alta viscosidade, teria solicitado a porção mais deformável do derrame, seu núcleo, e não a base mais resistente. Assim, teriam sido formadas as juntas-falhas de origem primária (SOUZA JR. & CAMPOS, 1990b), conforme verificado no núcleo do derrame I (Figura. IV.20). A movimentação do material pastoso, sobreposto à zona de contato, não teria tido então competência para provocar deslocamentos cisalhantes, na porção basal do derrame e muito menos, nas brechas e xisto. Consequentemente, considera-se altamente improvável a ocorrência das etapas “e” e “f”.

Figura IV.20 - Extensas descontinuidades sub-horizontais em basalto compacto-micro-amigdaloidal, derrame I. Corte da Escavação da Sub-Estação - UHE de Nova Ponte.

Observação: Não foram verificados rejeitos horizontais.

Superfícies de diferentes graus de viscosidade, em um derrame que se movimenta e resfria simultaneamente, apresentariam uma disposição paralela ao topo ou base. Por conseguinte, no estágio final de consolidação do derrame, possíveis solicitações tangenciais teriam provocado deslocamentos cisalhantes entre estas superfícies, aproximadamente horizontais.

Assim, com base no raciocínio acima exposto, as extensas feições verticais planares, intensamente cisalhadas, no derrame I, corresponderiam unicamente a evento pós-solidificação. Esforços compressivos horizontais teriam facilmente mobilizado o diaclasamento vertical, ligeiramente colunar e estreitamente espaçado, de origem primária. Portanto, as etapas g e h são incompatíveis com os fenômenos ligados a dinâmica de resfriamento de espessos derrames de lava.

Situação semelhante, falhamentos verticais e horizontais (interderrame), foi verificada nos basaltos do local de implantação da UHE de Taquaruçu (SERRA JR. et alii, 1986). Considerou-se, para tal ocorrência, a atuação de esforços de natureza tectônica.

No local da obra de Nova Ponte, a evolução geomorfológica do vale do rio Araguari, e o consequente desconfinamento lateral, provocou a "relaxação" de apreciável porção do maciço basáltico adjacente ao vale (Figura.IV.21). Provavelmente, o desenvolvimento de uma "zona relaxada" tenha atenuado sensivelmente a tendência de movimentação do maciço, em direção ao vale, através de descontinuidades subverticais ou sub-horizontais pré-existentes.

A atitude e sentido de deslocamentos (paralelamente ao vale), indicados pelas estrias ao longo do contato xisto-basalto; a ausência de evidências de mobilização cisalhante do maciço basáltico, envolvendo as descontinuidades sub-horizontais e a brecha interderrame; são fatores que apontam para a não movimentação convergente do maciço rochoso local, perpendicularmente ao vale fluvial.

Assim, a reativação de falhamentos verticais pré-existentes, conforme o estabelecido pela etapa i do modelo em questão, parece não ter se concretizado, ao menos com intensidade suficiente para o fenômeno ser perceptível.

Figura IV.21 - Seção geológica esquemática ao longo do eixo da barragem - UHE de Nova Ponte (modif. de BRITTO, et alii, 1990)

Notar: O espessamento das descontinuidades sub-horizontais, a medida que se aproximam do vale

Modelo II

Velocidades diferenciais de fluxo, por ocasião do extravasamento do corpo de lava; deslocamentos convergentes do maciço rochoso, decorrentes de um processo natural de entalhe fluvial; constituem mecanismos inadequados para elucidar ou justificar movimentações cisalhantes, múltiplas e conjugadas, na zona de contato xisto-basalto (Figura IV.19b), capazes de provocar, segundo BRITO et alii (1990), um encurtamento horizontal de até 4 metros.

O local de Nova Ponte, extremo nordeste da Bacia do Paraná, situa-se exatamente entre duas grandes estruturas tectônicas: arco do Alto Paranaíba e flexura de Goiânia (Figura I.2a). No Cretáceo Superior, o soerguimento do Alto Paranaíba propiciou o aporte de sedimentos (facies Uberaba) para a região, compreendida entre os dois elementos tectônicos (HASUI et alii, 1975; ALMEIDA et alii, 1980). Esta mesma região, devido ao soerguimento do referido arco, pode ter sido então submetida a esforços compressivos.

Outro mecanismo pode ser ainda considerado: a reativação de antigas geossuturas do embasamento, certamente afetou o pacote vulcano-sedimentar da bacia, pelo menos a partir do Oligoceno. Em Nova Ponte, os basaltos estão exatamente sobre rochas xistosas do embasamento.

Para se definir o comportamento reológico das rochas, quando solicitadas por esforços deformantes, a geologia estrutural emprega os termos “competente” (rochas que reagem de maneira rígida perante os esforços) e “incompetente” (rochas que se comportam plasticamente na presença das solicitações).

A partir dos resultados obtidos na minuciosa caracterização geológico-geotécnica do maciço rochoso de Nova Ponte, verificou-se que o basalto apresenta melhor qualidade do que o

xisto (PATRÃO et alii, 1989). Este resultado, em verdade, confirma o comportamento geomecânico, via de regra, superior dos basaltos (LAMA & VUTUKURI, 1978a). Por consequência, é razoável admitir-se o basalto como sendo mais competente que o xisto, no local de Nova Ponte.

Por ocasião da reativação tectônica do embasamento e/ou soerguimento do Alto Paranaíba, a espessura do pacote rochoso sobreposto ao maciço Pré-Cambriano não deve ter sido expressiva. Tal afirmação se baseia, a princípio, no fato de a região em questão estar localizada na borda da bacia. A análise do modelo da tectônica local, estabelecido por HASUI et alii (1975), conduz à mesma conclusão.

Considera-se, portanto, que o volume rochoso compreendido atualmente pelo maciço de Nova Ponte, tenha sido anteriormente submetido à solicitação compressiva, em um horizonte crustal equivalente ao “nível estrutural superior” (porção mais superficial da crosta terrestre) de MATTAUER (1980). Nestas condições, computando-se ainda possíveis acréscimos de temperatura e tensão confinante, pode se afirmar que os basaltos e xisto deformaram-se diferentemente em resposta às tensões.

As feições de falhamento no maciço rochoso de Nova Ponte, teriam sido então desenvolvidas segundo outro modelo estrutural modelo II (Figura IV.22). A mesma tensão que provocou os falhamentos transcorrentes no derrame I, produzindo simultaneamente deslocamentos horizontais na zona de contato, deformou o embasamento, sem que este se rompesse à maneira do maciço basáltico subjacente.

Observações e algumas ponderações decorrentes da análise do modelo II são naturalmente esperadas; aquelas consideradas mais importantes são apresentadas a seguir:

a - Para melhor visualização da simultaneidade dos falhamentos verticais e horizontais, os respectivos deslocamentos foram exagerados;

b - Para efeitos de simplificação, o plano horizontal de cisalhamento localiza-se na porção intermediária da zona de contato; as superfícies sub-horizontais de cisalhamento, em realidade, atravessam indistintamente as litologias desta zona, como se verifica na Figura IV.19;

c - A maior deformabilidade do xisto, corresponde não apenas à deformação não elástica do material rochoso, mas também, aos deslocamentos segundo os planos de xistosidade; ensaios laboratoriais e “in situ” comprovam este comportamento (MENDES, 1960);

d - Os derrames I e II, com características geomecânicas praticamente idênticas, são cortados por falhamentos verticais; a menor competência ou maior deformabilidade da brecha interderrame, evidentemente, impediu que esta se rompesse semelhantemente aos derrames;

e - As diferenças lito-estruturais verificadas no maciço rochoso de Nova Ponte, mormente se confrontados o xisto e o derrame I, implicam em respostas igualmente diferenciadas frente às solicitações tangenciais; assim, não há necessidade de se considerar o desenvolvimento contínuo de falhas verticais através de todo o maciço então solicitado.

Trabalhos futuros, objetivando inicialmente um levantamento geoestatístico das atitudes das feições estruturais, nos principais domínios litológicos, do maciço rochoso de Nova Ponte,

são altamente desejáveis. A definição da geometria das falhas e respectivas estrias de atrito, torna então possível a análise deformacional do maciço, adotando-se procedimento análogo ao empreendido por MARQUES et alii (1987 a), no local da obra de Porto de Primavera.

Os resultados então obtidos, se conjugados aos demais fatores (aspectos a, b e d) abordados no item 1.3.2. - Capítulo I, possibilitariam ainda a definição da paleo-sismicidade local; assunto este, de grande relevância no âmbito da geotecnia, sobretudo, em se tratando de projetos de grandes barragens.

2.2.3 - O Entablamento - Derrames I e II

Os basaltos, notavelmente expostos na área, formam as paredes laterais do “Canyon” do rio Araguari. Ainda que as sondagens tenham revelado a existência de 4 derrames, somente os dois primeiros, derrames I e II, com 75 e 40 metros de espessura, respectivamente, são realmente importantes para o projeto (ver Fig.IV.18).

Caracterização Geológica

Ambos os derrames apresentam as mesmas características estruturais e texturais. A rocha, de coloração cinza-escuro, se encontra intensamente fraturada. As juntas, perfeitamente seladas, conferem ao maciço um aspecto monolítico. Superfícies incipientemente colunares eventualmente se manifestam (Figura. IV. 23a). A análise petrográfica revela as seguintes feições texturais (CEMIG, 1988):

- Fenocristais ou microfenocristais de feldspatos (labradorita) e piroxênios (augita); opacos; granulação submilimétrica e matriz vítrea;
- Grande quantidade de matéria vítrea (35 a 50%).

(a)

(b)

PROPRIEDADE	SÍMBOLO	TERMOS DESCRITIVOS
Grau de Consistência	C1	MUITO CONSISTENTE
Grau de Decomposição	D1	ROCHA SÃ
Grau de Fraturamento	F1	MUITO POUCA FRATURADA (< JUNTA/m)
Permeabilidade	H1/H2	ESTANQUE A POUCA PERMEÁVEL

(c)

Figura IV.23 - Características geológico-geotécnicas do entablamento (derrame I) - obra de Nova Ponte: a - feições estruturais; b - os 3 compartimentos (sonda gem A-115); c - propriedades do compartimento central (RQD = 90), conforme PATRÃO et alii, (1989) e CEMIG, 1986.

As características macro e microscópicas dos basaltos de Nova Ponte, notavelmente semelhantes às verificadas nos basaltos hialofíticos (item 2.1 Capítulo III), associadas às feições estruturais, apontam, seguramente, para o litótipo basáltico entablamento. Consequentemente, estudos geológicos mais detalhados, na região, deverão confirmar a presença de aspectos páleo-ambientais que propiciaram a inundação dos derrames I e II, imediatamente após seu extravasamento, conforme modelo estabelecido tanto para os derrames do Grupo Rio Columbia (Capítulo II), como para aqueles da Formação Serra Geral (Capítulo III).

Comportamento Geotécnico

Ao se estudar o espesso derrame I, o mais importante para o projeto, verifica-se que este encontra-se compartimentado, quanto as suas propriedades geológico-geotécnicas, em três horizontes distintos. A mesma compartimentação, está notavelmente representada no furo de sondagem A-115, cujos testemunhos foram analisados (pelo autor), objetivando a determinação do RQD para os três compartimentos (1, 2 e 3 – Figura IV. 23b):

- O mais superficial (1), cortado por extensas descontinuidades horizontais (ver Figura IV.20), apresenta-se anormalmente fraturado ou desagregado, provavelmente, como decorrência do rápido processo erosivo e de desconfinamento, verificados na região; encontra-se para o RQD, o valor 73;
- O compartimento central (2), de características geotécnicas excelentes (RQD = 90), corresponde a um entablamento típico cujas principais propriedades geológico-geotécnicas encontram-se representadas na Figura.IV.23c;
- O terceiro horizonte (3), em contato com o embasamento, apresenta-se em alguns trechos, excepcionalmente perturbado por deslocamentos cisalhantes (ver Fig.IV.19a), resultando em um valor relativamente baixo, 51, para o RQD.

O eficiente selamento das juntas, ainda que o entablamento esteja cortado por uma densa rede de juntas primárias, confere ao núcleo do derrame I (compartimento central), sob o ponto de vista geotécnico, a condição de maciço muito pouco fraturado. Nota-se, entretanto, que se por um lado o intenso fraturamento não chega a interferir no comportamento de um entablamento não perturbado, a abertura das juntas I, II ou III, por solicitações externas, pode modificar

significativamente sua situação de maciço estável, como verificado nos valores de RQD dos dois compartimentos periféricos.

Assim é que, para o terceiro horizonte, de qualidade geotécnica inferior (RQD=51), verifica-se: um, efetivamente, alto grau de fraturamento (F4), permeabilidade variando de estanque a francamente permeável (H1 a H5) e um grau de decomposição equivalente a uma rocha medianamente a extremamente decomposta (D3 a D5). Consequentemente, esta zona caracteriza-se como ruim, em termos geológico-geotécnicos, portanto problemática para escavações, a céu aberto e, principalmente, subterrâneas (PATRÃO et alii, 1989).

A presença das falhas verticais (transcorrentes) nos derrames, não acarretou problemas de maior magnitude, entretanto, verificou-se alguns efeitos indesejáveis, se bem que localizadamente. As falhas com direção subparalela aos cortes verticais de escavação, propiciaram a queda parcial de delgados prismas verticais, durante a detonação, e as partes restantes exigiram ancoragens. A atuação intensa do intemperismo nestas feições condicionou, em alguns locais, acréscimos no fluxo de água e maior deformabilidade (BRITO et alii, 1990).

2.3 Comentários e Conclusões

As características estruturais do entablamento são deveras interessantes. As juntas, ainda que estreitamente espaçadas, apresentam alta resistência à tração (juntas tipo I), ou mesmo associam-se mutuamente em um perfeito imbricamento (“interlocking”) (juntas II e III).

Excetuando-se os casos em que o aspecto pseudocolunar do entablamento encontra-se oculto, ou ainda subdividido em unidades estruturais (leques, rosetas etc.), a anisotropia geométrica geralmente acentua-se pela disposição subvertical das superfícies ou traços de juntas tipo I, as quais, por sua vez, delimitam as pequenas bandas ou segmentos sub-horizontais das juntas tipo II.

Ao se proceder à verificação da anisotropia mecânica, utilizando-se o fator RMR, deparou-se com dificuldades aparentemente intransponíveis. Entretanto, poder-se-ia ainda averiguar a referida anisotropia, avaliando-se o parâmetro RQD, via indireta, na direção vertical e horizontal.

No procedimento elaborado por PALMSTRON (1982), o RQD é calculado a partir de J_v (índice de frequência volumétrica de juntas), o que inviabiliza a avaliação do RQD, linearmente ou, em separado, nas direções vertical e horizontal.

Outro interessante método, para a estimativa do fator RQD, foi proposto por PRIEST & HUDSON (1976). Como requisito básico para sua aplicação, a distribuição da frequência de espaçamento de juntas, deverá, necessariamente, corresponder a uma função exponencial negativa. No entanto, verifica-se no entablamento uma distribuição de frequência, aproximadamente, normal. Por outro lado, na direção vertical, constatou-se não ser possível definir o parâmetro espaçamento. Assim, para a averiguação da anisotropia mecânica do entablamento, deverá recorrer-se aos ensaios de caracterização mecânica “in situ”.

Os valores dos parâmetros geotécnicos do entablamento, na Formação Serra Geral e no Grupo Rio Columbia, quando confrontados entre si, revelam diferenças significativas (Figura IV.24). Verifica-se, no entanto, que a diferença básica se situa nos valores de RQD, parâmetro este tanto utilizado no sistema RMR como no sistema Q. O valor menor, 46, representa a média dos resultados obtidos direta e indiretamente, na direção vertical e horizontal. Provavelmente, espera-se um menor RQD, tanto na direção horizontal como no método indireto.

O intenso e característico diaclasamento primário do entablamento, em um maciço não perturbado, representado pelos núcleos dos derrames I e II da obra de Nova Ponte, parece não acarretar qualquer problema de instabilidade, apresentando, segundo PATRÃO et alii (1989), características geológico-geotécnicas excelentes, tanto para fundações como para escavações a céu aberto ou subterrâneas.

Situação semelhante verifica-se, ao examinar-se cuidadosamente as descrições gerais e fotografias dos derrames basálticos, identificados na obra da UHE de Água Vermelha. O derrame “L” ou “B”, minuciosamente caracterizado, apresenta nítida compartimentação entablamento/colunata. O entablamento, ainda que não identificado como tal, foi caracterizado geologicamente (PROMON & THEMAG, 1979a; ARAÚJO, 1982) e quanto ao seu comportamento geotécnico (PROMON & THEMAG, 1979b; BJORNBERG et alii, 1980, 1983; SILVEIRA et alii, 1981). Constata-se condições de perfeita estabilidade quanto à resistência, deformabilidade e permeabilidade.

PROPRIEDADES	ENTABLAMENTO	
	F.SERRA GERAL (MACIÇO NÃO PERTURBADO)	G. RIO COLUMBIA (OBRA SUBTER.)
GRAU DE FRATURAMENTO (JUNTAS/m)	14	15
RQD	90	46
RMR	78/86 (*1)	65
Q	40	15
E (*2) (GPa)	56/72	30

*1 - Utilização de valores alternativos para a resistência a compressão uniaxial (80/275 MPa)

*2 - Módulo de Deformabilidade obtido pela relação $E = 2RMR - 100$

Figura IV.24 - Características geotécnicas do entablamento, como maciço rochoso. Os resultados para o Grupo Rio Columbia foram extraídos de HOCKING et alii (1990)

- CONSIDERAÇÕES FINAIS -

O núcleo de derrames basálticos deveria, normalmente, corresponder a rocha de textura mais grosseira e com diáclases mais espaçadas, relativamente as partes periféricas. No entanto, onde ocorre a compartimentação entablamento-colunata, verifica-se exatamente o inverso: o entablamento, interposto às colunatas, apresenta evidências de um resfriamento mais rápido da lava.

No modelo de gênese, concebido à princípio para esclarecer o fenômeno nos derrames do Grupo Rio Columbia, considera-se determinados fatores paleo-ambientais, que implicam na existência de etapa (s) de aceleração do processo de resfriamento, em derrames cobertos por águas de superfície imediatamente após seu extravasamento. Tal hipótese constitui forte argumento, que tem resistido e se confirmado, quando submetido a novas verificações. Inclusive, como se constatou no presente trabalho, o mesmo modelo genético aplica-se consistentemente a determinados derrames basálticos, em alguns locais da Bacia do Paraná.

* * *

Na avaliação geotécnica do entablamento, como maciço rochoso não perturbado, verifica-se um comportamento perfeitamente adequado, quanto à resistência, deformabilidade e permeabilidade. Isto indica, que a estabilidade do maciço não é afetada pelo intenso diaclasamento desta feição estrutural, como se constatou nas obras de construção das barragens de Nova Ponte e Água Vermelha.

Nota-se, entretanto, que o entablamento apresenta comportamento bastante diverso em determinadas situações. Em maciço alterado intempericamente, ou submetidos a rápido desconfinamento, ou ainda deformado por esforços tectônicos, verifica-se uma desarticulação ou dissipação do intertravamento das fraturas. Tal maciço poderá então apresentar problemas de instabilidade de taludes (queda de blocos), tornando-se ainda impróprio como fundação (elevada permeabilidade e deformabilidade).

No que diz respeito às propriedades apresentadas pelo entablamento, à nível de amostras destinadas aos ensaios laboratoriais, verificou-se a necessidade de recorrer-se ao ensaio de carga pontual, para estimar-se a resistência à compressão simples da rocha intacta. Os resultados conferem ao material rochoso do entablamento, uma resistência muito alta, valor este confirmado no ensaio esclerométrico.

* * *

Efetuando-se ainda uma análise comparativa, no contexto dos basaltos da Formação Serra Geral, entre o entablamento e o tipo estrutural correspondente ao núcleo dos demais derrames, obtém-se os seguintes resultados:

- Comportamento geotécnico semelhante, considerando-se um maciço não perturbado por fenômenos tectônicos e intempéricos;
- A densa rede de fraturas do entablamento constitui, provavelmente, fator que situa esta feição estrutural em uma condição vantajosa, no que diz respeito à relativa facilidade com que se processa à sua fragmentação, em desmontes com uso de explosivos; pesquisa, neste sentido, vem sendo desenvolvida pelo Departamento de Geotecnia - EESC/USP.
- Observam-se ainda resultados equivalentes, quando considerados os parâmetros tecnológicos de resistência mecânica, nos ensaios de compressão simples, abrasão Los Angeles, impacto Treton e esmagamento.
- No que se refere à resistência a alteração e à adesividade a ligante betuminoso, o material rochoso do entablamento revela uma qualidade inferior relativamente aos demais basaltos de estrutura compacta.

- BIBLIOGRAFIA -

- 1 - ABRAMSON, L.W; SCHMIDT, B. (1984) - Rock support for nuclear waste repositories. In. Proc. 25th Symp. Rock Mech., N. York, Chapter 114, p. 1103-1114.
- 2 - AGUIAR, R.L. (1989) - Mapeamento Geotécnico da Área de Expansão Urbana de São Carlos SP: contribuição ao planejamento. Dissertação de Mestrado, EESC-USP, S. Paulo.
- 3 - ALMEIDA, F.F.M. (1956) - O Planalto Basáltico da Bacia do Paraná. Bol. Paul. Geogr. Nº 24, p. 3-34.
- 4 - ALMEIDA, F.F.M. (1980) - Tectônica da Bacia do Paraná no Brasil. Relatório 14.091 - IPT, São Paulo.
- 5 - ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; DAVINO, A.; HARALYI, N.L.E. (1980) Informações Geofísicas sobre o Oeste Mineiro e seu significado Geotectônico. An. Acad. Bras. Ciências. vol, 52, nº 1, p. 4960.
- 6 - ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; NEVES, B.B.B.; FUCK, R.A. (1981) Brazilian Structural Provinces: An Introduction. Earth-Science Reviews, 17, p. 1-29.
- 7 - ALMEIDA, F.F.M. (1986) - Distribuição Regional e Relações Tectônicas do Magmatismo Pós-paleozoico no Brasil. Rev. Bras. Geoc., vol 16, nº 4.
- 8 - AMARAL, G.; CRÓSTA, A.P. (1983) - Comportamento Estrutural e Estratigráfico dos Diferenciados Ácidos da Formação Serra Geral na Porção Sul da Bacia do Paraná. An. 4º Simp. Reg. Geol. SBG, S.Paulo, p. 197-210.
- 9 - ANDREWS, A.J. (1977) - Low temperature fluid alteration of oceanic layer 2 basalts, DSOP leg 37. Can. J. Earth Sci. vol.14, p. 911-926.
- 10- ARAUJO, J. S. (1974) - Estruturas Circulares: Características e Provável Origem - Usina de Água Vermelha. Rel. G/01/74, CESP.

- 11- ARAUJO, J.S. (1982) - Estruturas, Circulares de Água Vermelha. Dissertação de Mestrado, IG-USP, S. Paulo, 79 p.

- 12- ARAUJO, J.S.; MARQUES, J.D.; OLIVEIRA, C.A.; MARANESI, D.A. (1987) - Derrames Secundários em Basaltos de Porto Primavera. An. 50 Congr. Bras. Geol. Eng., S. Paulo; vol. 1, Tema II, p. 373-377.

- 13- ASSUMPÇÃO, M.; SUAREZ, G.; VELOSO, J .A. (1985) Faut Plane Solutions of Intraplate Earthquakes in Brazil: Some Constraints on the Regional Stress Field. Tectonophysics, vol. 113, nº 3/4, p. 283-293.

- 14- ATTEWELL, P.B.; FARMER, I.W. (1976) - Principles of Engineering Geology. Chapman and Hall Ltd., Cambridge, 1045 pp.

- 15- AYDIN, A.; DeGRAFF, J.M. (1988) - Evolution of polygonal fracture patterns in lava flows. Science, vol. 239, p. 471-476.

- 16- BAGOLINI, B. (1964) - Notte Sulla Geologia del Basalto dell'Alto Bacini del Fiume Paraná, nel Brasile Meridionale. ReI. Themag Engenharia, S. Paulo, 35 pg.

- 17- BARISON, M.R. (1991) - Efeito Escala em Basaltos da Formação Serra Geral - Ensaio de Compressão Uniaxial. Sem. Pas-Grad., Depto. de Geotecnia, EESC-USP.

- 18- BARRASH, W.; BOND, J.; VENKATAKRISHNAN, R. (1983) – Structural evolution of the Columbia Plateau in Washington and Oregon. Am. Jour. Sci., vol. 283, n 0 9, p. 897-935.

- 19- BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. (1974) - Engineering Classification of Design of Tunnel Support. Rock Mech., vol. 6, nº 4, p. 189-236.

- 20- BARTON, N. (1976) - Recent Experiences with the Q-System of Tunnel Support Design. Proc. Symp. Rock Eng., Johannesburg, A.A. Balkema, vol. 1, p. 107-117.

- 21 - BARTON, N. (1988) - Rock Mass Classification and Tunnel Reinforcement Selection Using the Q-System. Rock Classif. Syst. for Eng. Purp. - ASTM (Kirkaldie), Philadelphia, p. 59-88.
- 22 - BELLINI, G.; BROZZU, P.; CHIARAMONTI, P.C.; ERNESTO, M.; MELFI, A.J.; PACCA, I.G.; PICCIRILLO, E.M. (1984a) - Flood Basalt to Rhyolite suites in the Southern Parana Plateau (Brazil): Palaeomagnetism, Petrogenesis and Geodynamic Implications. *J. Petrology*, 25(3): 579-618.
- 23 - BELLINI, G.; CHIARAMONTI, P. C.; MARQUES, L.S.; MELFI, A.J.; PICCIRILLO, E.M.; NARDY, A.J.R.; ROISEMBERG, A. (1984a) - High and Low tiO_2 Flood Basalts from the Parana Plateau (Brazil): Petrology and Geochemical Aspects Bearing on their Mantle Origin. *N. Jb. Miner. Abh.*, 150: 273-306.
- 24 - BELLINI, G.; CHIARAMONTI, P.C.; MARQUES, L.B.; MARTINEZ, L.A.; MELFI, A. J. ; NARDY, A. J .R. ; PICCIRILLO, E.M. ; STOLFA, D. (1986a) - Continental Flood Basalts from the Central-Western regions of the Parana Plateau (Paraguay and Argentina): petrology and Petrogenetic Aspects. *Neues Jahrbuch Miner. Abh.*, 154(2): 111-139.
- 25 - BELLINI, G.; CHIARAMONTI, P.C.; MARQUES, L.S.; MELFI, A.J.; NARDY, A.J.R.; PAPATRECHAS, C.; PICCIRILLO, E.M.; ROISEMBERG, A.; STOLFA, D. (1986a) - Petrogenetic Aspects of Acid and Basaltic Lavas from the Parana Plateau (Brazil): Geological, Mineralogical and Petrochemical Relationships. *J. Petrology*, 27(4): 915-944.
- 26 - BIENIAWSKI, Z.T. (1974) - Geomechanics Classification of Rock Masses and its Application in Tunneling. *Proc. Third Int. Congr. Rock Mec. - ISRM, Denver*, vol. II-A, p. 27-32.
- 27 - BIENIAWSKI, Z.T. (1976) Rock Mass Classifications in Rock Engineering. *Proc. Symp. Exploration for Rock Eng. Johannesburg*, A.A. Balkema, vol. I, p. 97-106.

28 - BIENIAWSKI, Z.T.; ORR, C.M. (1976) - Rapid site Appraisal for Dam Foundations by the Geomechanics Classification. Proc. 12 th Int. Congr. on Large Dams, ICOLD, Mexico, p. 483-501.

29 - BIENIAWSKI, Z.T. (1978) - Determining rock mass deformability: experience from case histories. Intern. Jour. Rock Mech. Min. SCI & Geomech. Abstr., vol. 15, p. 237-247.

30 - BIENIAWSKI, Z.T. (1979) - The Geomechanics Classification in Rock Engineering Applications. Proc. 4th. Int. Congr. Rock Mech. ISRM, Montreaux, vol.2, p. 41-48.

31 - BIENIAWSKI, Z.T. (1984) - Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling. Balkema, Rotterdam, Boston, chap. 6, p. 97-135.

32 - BIENIAWSKI, Z.T. (1988) - The Rock Mass Rating (RMR) System (Geomechanics Classification) in Engineering Practice. Rock classif. Syst. for Eng. Purp. - ASTM (Kirkaldie), Philadelphia, p. 17-31.

33 - BIENIAWSKI, Z.T. (1989) - Engineering Rock Mass Classification. A Wiley - Interscience Publication, EUA, 251 p.

34 - BJORNBERG, A.J.S.; SANTOS, C.A.F.F.; ZEFES, S. (1980) - Decisões Técnicas Relacionadas com a Barragem de Água Vermelha. An. XIII Sem. Nac. Gr. Barr. R. de Janeiro, Tema II, p.269-291.

35 - BJORNBERG, A. J.S.; KUTNER, A. S. (1983) - Resumo das Feições Geológicas de Interesse às Fundações em Rocha, em Barragens da Bacia do Alto Paraná. An. Simp. Geotec. Bacia do Alto PR., Vol. 1-A, Tema II-B, p. 263-297.

36 - BJORNSSON, H.; BJORNSSON, S. & Th. SIGURGEISSON (1982) - Penetration of water into hot boundaries of magma at Grimsvotn. Nature, vol. 295, nº 5850, p. 580-581.

37 - BRITO, S.N.A.; VASCONCELOS, M.L.; GERALDO, A. (1990) - Falhas Primárias no Basalto da UHE de Nova Ponte e sua influência no Projeto. 6º Congr. Bras. Geol. Eng., Salvador, Vol. I, Tema V, p 453-464.

38 - BROCH, E.; FRANKLIN, J.A. (1972) - The Point-Load strength Test. Int. J. Rock Mec., Min. SCI, Vol. 9, p. 669-697.

39 - BROOK, N. (1985) - The Equivalent Core Diameter Method of Size and Shape Correction in Point Load Testing. Int. J. Rock Mech. Min. Sci, Vol.22, nº 2, p.61-70.

40 - CAMARGO, F.P.; MIDEA, N.F.; NIEBLE, C.M.; RUIZ, M.D. (1971) - Características Geomecânicas do Maciço Rochoso de Fundação das Estruturas de Concreto da Barragem de Ilha Solteira. An. VII Sem. Nac. Gr. Barr. R. de Janeiro, Vol.1, p. 62-74.

41 - CAMARGO, F.P.; LEITE, C.A.G.; BERTIN NETO, S.; MALDONADO, F.; CRUZ, P. T. (1978) - Development of Conceptual Geomechanical Models for Foundations of Concrete Dam - Approach Applied to three Projects. Proc. Int. Symp. Rock. Mech., Related to Dam Foundations, Vol. 1, Theme II; R. de Janeiro (Brazil), p. 11.57 -11.78.

42 - CAMP, V.E.; HOOPER, P.R. (1981) - Geologic studies of the Columbia Plateau: Part I. Late Cenozoic evolution of the Southeast part of the Columbia River Basalt Province. Geol. Soc. Am. Bull., Part I, vol.92, p. 659-668.

43 - CAMP, V.E. (1981) -Geologic Studies of the Columbia Plateau: Part II. Upper Miocene basalt distribution, reflecting source locations, tectonism, and drainage history in the Clearwater embayment, Idaho. Geol. Soc. Am. Bull. Part II, vol. 92, p. 669-678.

44 - CAMPBELL, C.M. (1987) - Tunneling for storage - nuclear waste disposal in deep underground repositories. In. "Strata Control in Mineral Engineering "(Bieniawski, 1987) Balkema, Rotterdam, Chapter 10, p. 177-201.

45 - CANAHAN, C.L. et alii (1982) -Selected hydrologic and geochemical issues in site characterization for Nuclear Waste Disposal: flood basalts at the Hanford Reservation - ONMSS.USA.

- 46 - CARGILL, J. L.; SHAKOOR, A. (1990) - Evaluation of Empirical Methods for Measuring the Uniaxial Compressive strength of Rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 27, nº 6, p. 495-503.
- 47 - CEMIG (1982) - Relatório de Progresso das Investigações Geológico-Geotécnicas - Usina Hidrelétrica de Nova Ponte, Divisão de Geologia e Geotecnia, B. Horizonte (M.G.).
- 48 - CEMIG (1986) Concorrência para Obras civis Principais - Leme Eng. S/A - Usina Hidrelétrica de Nova Ponte, Vol. 4 (desenhos), 1ª parte, B. Horizonte (M.G.).
- 49 - CEMIG (1988) - Estudo Preliminar de Dosagem dos Concretos - Usina Hidrelétrica de Nova Ponte. Relatório: PG/EC₃ - LC-UDI-024.
- 50 - COX, K.G. (1980) - A Model for Flood Basalt Vulcanism. *J. Petrology*, 21(4): 629-650.
- 51 - COX, K.G.; BELL, J.D.; PANKHURST, R. J. (1984) - The interpretation of igneous rocks. George & Unwin Ltda, London, 4th impression, 450 p.
- 52 - DEERE, D.V. (1968) - Consideraciones Geologicas. In. *Rock Mechanics in Engineering Practice* (Stagg-Zienkiewicz), 1968 1º Ed. Española (1970), Cap. 1, Madrid.
- 53 - DEERE, D.U.; DEERE, D.W. (1988) - The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice. *Rock Classif. Syst. for Eng. Purp. ASTM* (Kirkaldie), Philadelphia, p. 91-101.
- 54 - DeGRAFF, J.M.; AYDIN, A. (1987) - Surface morphology of columnar joints and its significance to mechanics and direction of joint growth. *Geol. Soc. Am. Bull.*, vol. 99, p. 605-617.
- 55 - DeGRAFF, J.M.; LONG, P.E.; AYDIN, A. (1989) - Use of joint-growth directions and rock textures to infer thermal regimes during solidifications of basaltic lava flows. *Jour. Vole. Geoth. Resear.*, Vol.38, p. 309-324.

56 - DIAS NETO, C.M. (1986) - Contribuição à Análise sismotectônica da Região Sudeste do Brasil. Dissertação de Mestrado IG/USP.

57 - ERIKSSON, L. G. (1986) - Commentary on the program for final disposal of high-level radioactive in the United States of American. Int. 5th. Intern. IAEG Congress, Buenos Aires, Vol. 8, p. 2751-2772.

58 - FARJALLAT, J.E.S. (1970) - Observação sobre a Desagregabilidade do Basalto Compacto Usado no Enrocamento do Aterro da Ponte do Rio Sucuriú. Public. nº 902 - IPT.

59 - FARJALLAT, J.E.S. (1971) - Estudos Experimentais sobre a Degradação de Rochas Basálticas: Basaltos da Barragem de Capivara, Rio Paranapanema. Tese de Doutorado. IAG-USP, S. Paulo, 125 p.

60 - FARJALLAT, J.E.S.; MONTEZZO NETO, V.; RATTI, G. (1972) - Relação entre Teores Minerais Argilosos Expansivos e Desagregação de Rochas Basálticas. An. 4ª Sem. Paul. Geol. Aplic., p. 123-136.

61 - FARJALLAT, J.E.S. (1974) - Comportamento da Permeabilidade ao Ar de Alguns Basaltos do Sul do Brasil. An. XVIII Congr. Bras. Geol., P. Alegre, Vol.7, p. 113-121.

62 - FARJALLAT, J.E. S. (1975) - Algumas Implicações Tecnológicas de Medidas de Permeabilidade ao Ar: Amostras Confinadas e não Confinadas. X Sem. Nac. Gr. Barr., Curitiba, Tema I, p. 1-16.

63 - FARMER, I.W. (1983) - Engineering Behavior of Rocks. Chapman and Hall Ltd - 2nd ed., Cambridge, 208 pp.

64 - FERREIRA, C.M. (1985) - Ocorrência de "pillow-lava" em Vulcanitos da Formação Serra Geral em Araguari, M.G. An. 3º Simp. Geol. Minas Gerais, SBG, Bol. nº 5, p. 235-239.

65 - FOURMAINTRAUX, P. (1976) - La Mecanique des Roches Appliquee aux Ouvrages du Genie civil. L'Ecole Nat. des Ponts et Chaussees, 235 pp.

66 - FRANKLIN, J.A.; CHANDRA, R. (1972) - The Slake-Durability test. Int. J. Rock Mech. Min. SCI, Vol. 9, p. 325-341.

67 - FRANKLIN, J.A.; DUSSEAU, M.B. (1989) - Rock Engineering. Me Graw - Hill Publ. Comp., 600 pp.

68 - FRAZÃO, E.B.; CARUSO, L.G. (1983) - Síntese do Conhecimento sobre Alterabilidade de Rochas Basálticas como Material de Construção em Algumas Barragens da Bacia do Alto Paraná, São Paulo. An. Simp. Geotec. B. Alto Paraná, Vol.II-A, p. 21-33.

69 - GONÇALVES, N.M.M. (1987) - Transformações Mineralógicas e Estruturais Relacionadas à Alteração Hidrotermal e Intempérica de Rochas Vulcânicas Básicas da Bacia do Paraná Setentrional (região de Ribeirão Preto - SP, Brasil). Tese de Doutorado, IG-USP, 212 p.

70 - GUIDICINI, G.; CAMPOS, J.O. (1968) - Notas sobre a Morfogênese dos Derrames Basálticos. Bol. Soc. Bras. Geol., Vol. 17, nº 1, p. 15-28.

71 - GUIDICINI, G. (1970) - Derrames Secundários em Basaltos. Bol. Soc. Bras. Geol., S. Paulo, SBG; vol. 19, nº 1, p. 91-93.

72 - GUIDICINI, G.; OLIVEIRA, A.M.S.; CAMARGO, F.P.; KAJI, N. (1972) - Um Método de classificação Geotécnica Preliminar de Meios Rochosos. An. 40 Sem. paul. Geol. Aplic., Tema 3, p. 275-281.

73 - GUIDICINI, G.; TOGNON, A.A. (1973) - Análise do Método de Esclerometria de Impacto (Esclerômetro tipo Schmidt) na caracterização Geotécnica de Maciços Rochosos. An. IX Sem. Nac. Gr. Bar., R. de Janeiro, Tema I, 23 pp.

74 - GUIDICINI, G. (1979) - Juntas Horizontais de Grande continuidade em Derrames Basálticos da Bacia do Paraná. An. 2º Simp. Reg. Geol., R. Claro, vol. 2, p. 13-21.

75 - HASUI, Y.; SADOWSKI, G.R.; SUGUIO, K.; FUCK, G.F. (1975) - The Phanerozoic Tectonic Evolution of the Western Minas Gerais state. An. Acad. Brasil. Cienc., vol. 47, nº 3/4, p. 431-438.

76 - HASUI, Y.; HARALY, N.L.E.; MIOTO, J.A; SAAD, A.R.; CAMPANHA, V.A., HAMZA, V.M.; GALLI, V.A.; FRANGIPANI, A.; PULEGHINI FILHO, P. (1960) - Compartimentação Estrutural e Evolução Tectônica do Estado de São Paulo. Rel. IPT-DMGA, nº 27.394.

77 - HAYASE, K.; MANERA, T. (1972) - Presencia de Celadonita em Basalto em Foz do Iguaçu, Estado de Paraná, Brasil. Rev. Bras. Geoc., vol. 2, nº 1, p. 25-34.

78 - HEMPEL, L. G. (1981) - Filosofia da Ciência Natural. Ed. (3º) Bras., Zahar Editores - R. de Janeiro, 142 p.

79 - HIGGS, N.B. (1976) - Slaking basalts. Bul. Ass. Engin. Geol., Vol. XIII, nº 2, p.151-162.

80 - HOCKING, G.; WILLIAMS, J.R.; MUSTOE, G.G.W. (1990) - Post-test assesment of simulations for “in situ” heater tests in basalt Part I. Heater test description and rock mass properties. Intern. Jour. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr., vol. 27, nº 3, p. 143-159.

81 - HODGES, C.A. (1978) - Basaltic ring structures of the Columbia Plateau. Geol. Soc. Am. Bull., vol. 89, p. 1281-1289.

82 - HODGSON, R.A. (1961) - Classification of Structures on Joint Surf aces. Am. Jour. SC1, vol. 259, nº 7, p. 493-502.

83 - HOEK, E.; BRAY, J.N. (1977) - Rock Slope Engineering. Institution of Mining and Metallurgy, London, 2nd edition 402 pp.

84 - HOEK, E.; BROWN, E.T. (1988) - The Hoek-Brown Failure - a 1988 update. Proc. 15th Canadian Rock Mech, Symp. Toronto.

85 - HOOPER, P.R. (1982) - The Columbia River Basalt. Science, vol. 215, nº 4539, p. 1463-1468.

86 - IPT (1980) - Características tecnológicas das Rochas Utilizadas como Material Natural de Construção no Estado de São Paulo. Relatório nº: 14710.

87 - ISRM (1972) - Suggested Method for Determining Point Load Strength Index. Com. Lab. tests -Doc. nº 1.

88 - ISRM (1981) - Rock Characterization, Testing and Monitoring - ISRM Suggested Methods, Pergamon Press, London, 211 p.

89 - ISRM (1985) - Suggested Method for Determining Point Load Strength. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 22, nº 2, p. 51-60.

90 - JUSTUS, P.S. (1978) - Origin of curvi-columnar joints in basalt cooling units by fracture-controlled quenching. Am. Geophys. Union Trans., vol. 59, nº 4, p.379.

91 - KACZYNSKI, R.R. (1986) - Scale Effect During Compressive Strength Tests of Rocks. 5th Int. IAEG - Congress, Buenos Aires, p. 371-373.

92 - KAJI, N. (1969) - Geologia da Barragem de Promissão, Rio Tiete, Estado de São Paulo. An. 1º Sem. Paul. Geol. Aplic., S. Paulo, Vol. 3, p. III.1-III.11.

93 - KHALEEL, R. (1989) - Scale Dependence of continuum Models for Fractured Basalts. Water Resources Research. Vol. 25, nº 8, p. 1847-1855.

94 - KIM, K.; McCABE, W.M. (1984) - Geomechanics characterization of a proposed nuclear waste repository site in basalt. In. Proc. 25th Symp. Rock Mech., N. York, Chapter 116, p. 1126-1135.

95 - KIRSTEN, H.A.D. (1988) - The Rock Mass Rating (RMR) System Discussion Rock Clas. Syst. Eng. Purp. - ASTM (Kirkaldie), Philadelphia, p. 32-34.

96 - LAMA, R.D.; VUTUKURI, V.S. (1978a) - Hand book on Mechanical Properties of Rocks - testing Techniques and Results. Trans. Tech. Publ. Vol. II.

97 - LAMA, R.D.; VUTUKURI, V.S. (1978b) - Handbook on Mechanical Properties of Rocks - Testing Techniques and Results. Trans Tech. Publ. vol. IV.

98 - LANDON, R.D.; LONG, P.E. (1989) - Detailed stratigraphy of the N2 Grande Ronde Basalt, Columbia River Basalt Group, in the central Columbia Plateau. Geol. Soc. Am., Spec. Paper 239, p. 55-66.

99 - LISTER, C.R.B. (1977) - Qualitative models of spreading-center process, including hydrothermal penetration. Tectonophysics, vol.37, n° 1-3, p. 203-218.

100 - LONG, P.E.; WOOD, B.J. (1986) - Structures, textures, and cooling histories of Columbia River basalt flows. Geol. Soc. Am. Bull., vol 97, n° 9, p. 1144-1155.

101 - MANGAN, M.T.; WRIGHT, T.L.; SWANSON, D.A.; BYERLY, G.R. (1986) - Regional correlation of Grande Ronde Basalt flows, Columbia River Basalt Group, Washington, Oregon, and Idaho. Geol. Soc. Am. Bull., vol. 97, n° 11, p. 1300-1318.

102 - MANO, V.G.T. (1987) - Estudos Geológicos e Geotécnicos das Descontinuidades Rochosas, "pillow-Lavas" e Paleocanal nos Basaltos de Fundação da Barragem de Nova Avanhandava, Rio Tiete (SP). Dissertação de Mestrado, IG-USP 96 p.

103 - MARQUES, J.D.; MAGALHAES, F.S.; SERRA JR., E. (1987a) - Análise das Feições Estruturais do Maciço Rochoso nas Fundações da Barragem de Porto Primavera. 5° Congr. Bras. Geol. Eng., Tema II, Vol. 1, S. Paulo, p. 197-209.

104 - MARQUES, J.D.; ARAUJO, J.S.; OLIVEIRA, C.A.; MARANESI, D.A. (1987b) - Considerações Genéticas sobre o Basalto pouco Denso de Porto Primavera. An. 5° Congr. Bras. Geol. Eng., S. Paulo; Vol. 1, Tema II, p. 379-390.

- 105 - MARQUES FILHO, P.L.; CORREIA, P.C.; LEVIS, P.; ANDRADE, C.A.V. (1981) - Características Usuais e Aspectos Peculiares do Manto de Alteração e Transição Solo-Rocha em Basaltos. An. 3º Congr. Bras. Geol. Eng., Itapema, Vol. 2, Tema III, p. 53-72.
- 106 - MATTAUER, M. (1980) - Les Déformations des Matériaux de L'ecorce Terrestre. Deuxième édition corrigée, Hermam, Paris, 493 pg.
- 107 - McDOUGALL, I. (1976) - Geochemistry and Origin of Basalt of the Columbia River Group, Oregon, and Washington. Geol. Soc. Am. Bull, vol.87, p. 777-792.
- 108 - McKEE, B.; STRADLING, D. (1970) - The sag flowout: a newly described volcanic structure. Geol. Soc. Am. Bull., vol.81, p. 2035-2044.
- 109 - McMILLAN, K.; CROSS, R.W.; LONG, P.E. (1987) - Two-stage vesiculation in the Cohasset flow of the Grande Ronde Basalt, south-central Washington. geology, vol.15, p. 809-812.
- 110 - McMILLAN, K.; LONG, P. E.; CROSS, R. W. (1989) - Vesiculation in Columbia River basalts. Geol. Sol. Am., Spe. Paper 239, p. 157-167.
- 111 - MEHEGAN, J.M.; ROBINSON, P.T.; DELANEY, J.R. (1982) - Secondary mineralization an hydrothermal alteration in the Reydarfjordur drill core, Eastern Iceland. Jour. Geoph. Res., Vol. 87, nº B8, p 6511-6524.
- 112 - MELSON, W.G.; THOMPSON, G. (1973) - Glassy Abyssal Basalts, Atlantic Sea floor near St. Paul's Rocks: Petrography and Composition of Secondary Clay Minerals. Geol. Soc. Am. Bull., vol. 84, p. 703-716.
- 113 - MENDES, F.M. (1960) - Comportamento Mecânico de Rochas xistosas. Dissertação - Instituto Superior Técnico Lisboa, 243 pg.
- 114 - MENDES, F.M. (1968) - Mecânica das Rochas. AEIST, Lisboa, 541 pp.

- 115 - MENDES, J.C. (1984) - Elementos de Estratigrafia. EDUSP, S. Paulo, 566. pg.
- 116 - MILANI, E.J.; KINOSHITA, E.M.; ARAUJO, L.M.; CUNHA, P.R.C. (1990) - Bacia do Paraná: possibilidades Petrolíferas da Calha Central B. Geoc. Petrobras, R. de Janeiro, 4(1): 21-34.
- 117 - MOLLER, W.A.; CABRERA, J.G. (1976) - Características de Fundações sobre Rochas Basálticas. An. 1º Congr. Bras. Geol. Eng., R. de Janeiro, ABGE, Vol.2, p. 199-216.
- 118 - MONAHAN, C.J. (1969) - Reservoirs in volcanic terrain. Bull. Ass. Engin. Geol., Vol. VI, nº 1, p. 53-60.
- 119 - NARDY, A. J. R. (1988) - Petrologia e Paleomagnetismo das Rochas Vulcânicas da Região Centro-Sul do Estado do Paraná: Formação Serra Geral. Dissertação Mestrado, IAG-USP.
- 120 - OLIVEIRA, J.A.N. (1969) - Geologia da Barragem de Capivari, Rio Paranapanema, Estado de São Paulo e Paraná. An. 1º Sem. Paul. Geol. Aplic., S. Paulo, vol. 3, pg. IV.1 -IV.15.
- 121 - OLIVEIRA, A.M.S.; SILVA, R.F.; GUIDICINI, G. (1976) - Comportamento Hidrogeotécnico dos Basaltos em Fundações de Barragens. An. 1º Congr. Bras. Geol. Eng., R. de Janeiro, vol. 2, p. 414-429.
- 122 - PALMSTRON, A. (1982) - The Volumetric Joint Count - A Useful and simple Measure of the Degree of Rock Mass Jointing. Proc. 4th Congr. IAEG, New Delhi, vol. V, Theme 2, p. 221-228.
- 123 - PATRÃO, P.P.; MODENESI, H.A.; GERALDO, A.; VASCONCELOS, M. (1989) - Condicionantes Geológico Geotécnicas na Concepção dos Projetos do Desvio, dos Condutos Forçados e do sistema de Impermeabilização da Fundação da Barragem da Usina Hidrelétrica de Nova Ponte -MG. XVIII Sem. Nac. Barr., Foz do 19uagu, Tema IV, p. 1463-1486.

124 - PEACOCK, R.T.; ARNOLD, A.B. (1985) - Foundation treatment for control of seepage at Boardman Dam. In. Proc. Congr. Gran. Barr., 15, Lausanne, vol. III, Q 58-R 28, p. 553-571.

125 - PEATE, D.W.; MANTOVANI, M.S.M.; HAWKESWORTH, C.J. (1988) - Geochemical Stratigraphy of the Parana Continental Flood Basalts: Borehole Evidence. Rev. Bras. Geoc., 18(2): 212-221.

126 - PECK, D. D.; MINAKAMI, T. (1968) - The formation of columnar joints in the upper part of kilauean Lava Lakes, Hawaii. Geol. Soc. Am. Bull., vol. 79, p. 1151-1166.

127 - PETRI, S. (1983) - Brazilian cretaceous paleoclimates: evidence from clay - minerals, sedimentary structures and palynomorphs. Rev. Bras. Geol., vol. 13, nº 04, pg. 215-222.

128 - PETRI, S.; FULFARO, U. J. (1983) - Geologia do Brasil -EDUSP, S. Paulo, 631 pg.

129 - PICCIRILLO, E.M.; MELFI, A.J. (1988) - The Mesozoic Flood Volcanism of the Parana Basin: Petrogenetic and Geophysical Aspects. USP-IAG Publisher, 600 p.

130 - PICCOLO, J.R.; ADISSAY, M.A. (1970) - Adesividade de Agregado a Ligante Betuminoso. An. 2º Sem. Paul. Geol. Aplic., Vol. II, S. Paulo, p. 587-599.

131 - POLLARD, D.D.; AYDIN, A. (1988) - Progress in Understanding Jointing over the Past Century. Geol. Soc. Am. Bol., Vol. 100, nº 8, p. 1181-1204.

132 - PRESTVIK, T.; GOLES, G.G. (1985) - Comments on petrogenesis and the tectonic setting of Columbia River basalts. Earth Planetary Science Letters, vol. 72, nº 1, p. 65-73.

133 - PRIEST, S.D.; HUDSON, J.A. (1976) - Discontinuity Spacings in Rock. Int. J. Rock Mech. Min. Sci, vol. 13, p. 135-148.

134 - PROMON & THEMAG (1979a) - Investigações Geológicas realizadas para o Projeto da Usina Hidrelétrica de Água Vermelha. Relat. CS04F-GL8-022.

135 - PROMON & THEMAG (1979b) - Aproveitamento Hidrelétrico de Água Vermelha - Projeto Executivo - Relat. Final de Mec. Rochas (CS04F -GL8 -025).

136 - RE, G. (1971) - Considerações sobre a Presença de “Junta Falha” na Fundação da Barragem de Ilha Solteira e sua Influência na Estabilidade. Relat. THEMAG A4-0150/71.

137 - REIDEL, S.P. (1983) -Stratigraphy and petrogenesis of the Grande Ronde Basalt from the deep canyon country of Washington, Oregon, and Idaho. Geol. Soc. Am. Bull., vol. 59, p. 519-542.

138 - ROCHA, M. (1973) - Mecânica das Rochas -LNEC, Lisboa, Vol. I, II.

139 - ROISEMBERG, A.; GAMERMANN, N.; VIEIRA JR., N. (1984) - Argilominerais em Rochas Basálticas Inalteradas. An. XXXIII Congr. Bras. Geol., R. de Janeiro, p. 4241-4252.

140 - ROMANA, M. (1985) - New Adjustment Ratings for Application of Bieniawski Classification to Slopes. Proc. Int. Symp. on Rock Mech. in Excav. Min. civ. Works -ISRM, Mexico, p. 59-68.

141 - RUIZ, M.D. (1966) - Some Technological Characteristics of Twenty-six Brazilian Rock Types. proc. 1ª Congr. Int. Soc. Rock Mech., Lisboa, Vol. 1, Theme 2, p. 115-119.

142 - RUIZ, M.D.; RE, G.; CELESTINO, T.B.; BUOSI, M. (1976) - síntese das Características Geomecânicas de Maciços Basálticos como Fundação de Barragens. An. 1º Congr. Geol. Eng., R. de Janeiro, Vol. 3, Tema III, p. 191-214.

143 - RUSSEL, J.E.; CARTER, N.L.; HANDIN, J. (1984) - Laboratory testing for repository characterization. In. Proc. 25th Symp. Rock Mech., N. York, Chapter 121, p. 1188-1213.

144 - RYAN, M.P.; SAMMIS, C.G. (1978) - Cyclic fracture mechanisms in cooling basalt. Geol. Soc. Am. Bull., vol. 89, p. 1295-1308.

145 - SCHMINCKE, H. V. (1967) - Stratigraphic and Petrographic of Four Upper Yakima Basalt Flows in South-Central Washington. Geol. Soc. Am. Bull., vol. 78, nº 11, p. 1385-1422.

146 - SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D.A.; DERZE, G.R.; ASMUS, H.E. (1984) - Geologia do Brasil - Texto Explicativo do Mapa Geológico do Brasil e da Área Oceânica Adjacente incluindo Depósitos Minerais-Esc. 1:2.500.000. DNPM, Brasília, 501 p.

147 - SERAFIM, J.L.; PEREIRA, J.P. (1983) - Considerations on the Geomechanics Classification of Bieniawski. Proc. Int. Symp. on Eng. Geol. and Undergr. Constr., Lisboa, p. II.33-42.

148 - SERRA JR., E.; MAGALHAES, F.S.; AZEVEDO, A.A. (1986) - Análise de Feições Estruturais para Estudo do Estado de Tensões Naturais no Maciço Basáltico da UHE de Taquaruçú. II Simp. SuI. Am. Mec. Rocha, P. Alegre, vol. II, Tema MR-4, p. 252-262.

149 - SHEIDEGGER, K.F.; STAKES, O.S. (1980) - X-Ray diffraction and chemical study for secondary minerals from deep sea drilling project leg 51, Holes 417 A and 417 D. Unit. Rep. DSDP, vol. L.I, LII, LIII, part 2, p. 1253-1263.

150 - SILVEIRA, J.F.A.; MIYA, S.; CARDIA, R.J.R. (1981) - Análise do Comportamento Hidrogeotécnico do Maciço Basáltico de Fundação das Estruturas de Concreto da Usina de Água Vermelha. An. XIV Sem. Nac. Gr. Bar., Tema II, p. 355-379.

151 - SINELLI, O. (1970) - Geologia e Água Subterrânea no Município de Ribeirão Preto e Adjacências Tese de Doutorado, F. F. C. L. Ribeirão Preto, SP, 115 pg.

152 - SOARES, P.C. (1973) - O Mesozoico Gonduânico no Estado de São Paulo. Tese de Doutorado. DGM-FFCL, Rio Claro, SP.

153 - SOARES, P.S.; LANDIM, P.M.B. (1973) - Aspectos Regionais da estratigrafia da Bacia do Paraná no seu flanco nordeste. An. XXVII Congr. Bras. Geol., Aracaju, vol.1, p. 243-256.

154 - SOARES, P.C.; SINELLI, O.; PENALVA, F.; WERNICK, E.; SOUZA, A.; CASTRO, P.R.M. (1973) – Geologia do Nordeste do Estado de São Paulo. An. XXVII Congr. Bras. Geol., Aracajú, Vol.1, p. 209-228.

155 - SOARES, P.C. (1980) - Bacias Intracratônicas: Geometria numa Superfície Esférica e Implicações na Análise Tectônica. An. XXXI Congr. Bras. Geol., Camboriú, Santa Catarina, vol.5, p.2732-2743.

156 - Soiltest, Inc. -Rock Classification Test Hammer - Model RM-710, technical data.

157 - SOUZA JR., N.N. (1985) - Feições Lito-Estruturais de Interesse Geológico-Geotécnico nos Derrames Basálticos da Formação Serra Geral: Estado da Arte. Seminário, Curso de Pós-graduação - Departamento de Geotecnia, EESC-USP, 82 pg.

158 - SOUZA JR., N.N. (1986) - Feições Lito-Estruturais de Interesse Geológico e Geotécnico em Maciços Basálticos. Dissertação de Mestrado, EESC-USP, 183 pg.

159 - SOUZA JR., N.N.; CAMPOS, J.O. (1986) - Juntas e Falhas em Maciços Basálticos. An. II Simp. SuI Am. Mec. Roch., P. Alegre, Vol. II, Tema MR-4, p. 263-274.

160 - SOUZA JR., N.N.; CAMPOS, J.O. (1987a) - Descontinuidades Secundárias em Maciços Basálticos: Mecanismos Geradores e Modelos Estruturais. Rev.Bras. Geotec. “Solos e Rochas”, vol. 10, nº 1, p. 9-17.

161 - SOUZA JR., N.N.; CAMPOS, J.O. (1987b) - Falhas Horizontais em Derrames Basálticos. 5º Congr. Bras. Geol. Eng., S. Paulo, vol. 1, Tema I, p. 61-69.

162 - SOUZA JR., N.N. (1988) - Alterabilidade de Rochas Basálticas. Sem. Pós-graduação - Análise Ambiental; IGCE-UNESP, Rio Claro (SP), 22 p.

- 163 - SOUZA JR., N.N. (1989) - Considerações sobre a Origem das “juntas-falhas”. Sem. pós-grad.; Discipl. “Tectônica”; IGCE -UNESP, Rio Claro, SP, 27 p.
- 164 - SOUZA JR., N.N.; CAMPOS, J.O. (1990a) - Secondary Discontinuities in Basaltic Rock Masses of the Parana Basin (Brazil): Generation Mechanisms and Structural Models. Proc. Intern. Confer. on Mech. Jointed and Faulted Rock Vienna - Austria, pg. 237-243.
- 165 - SOUZA JR., N.N.; CAMPOS, J.O. (1990b) – Sub-horizontal Discontinuities of large Extension in the Basaltic Lava-Flows Nucleus of the Parana Basin (Brazil) - Proc. Int. Symp. on Rock Mech. “Rock Joints”, Loen-Norway, pg. 97-100.
- 166 - SPRY, A. (1962) - The Origin of Columnar Jointing, Particularly in Basalt Flow. Jour. Geol. Soc. Australia, vol.8, nº: 2, p. 191-221.
- 167 - SUGUIO, K.; FULFARO, V.J. (1974) - Diques clásticos e outras feições de contato entre arenitos e basaltos da Formação Serra Geral. An. XXVII Congr. Bras. Geol., P. Alegre, p. 107-112.
- 168 - SUGUIO, K. (1980) - Rochas Sedimentares. Ed. Edgard Blücher Ltda, S. Paulo, 500 pg.
- 169 - SWANSON, D.A. (1967) - Yakima Basalt of the Tieton River Area, South-Central Washington. Geol. Soc. Am. Bull., vol.78, p. 1077-1110.
- 170 - SWANSON, D.A.; WRIGHT, T.L., HELZ, R.T. (1975) - Linear vent systems and estimated rates of magma production and eruption for the Yakima Basalt on the Columbia Plateau. Am. Jour. Sci., vol.275, p. 877-905.
- 171 - SWANSON, D.A.; WRIGHT, T.L.; HOOPER, P.R.; BENTLEY, R.D. (1979) - Revisions in Stratigraphic Nomenclature of the Columbia River Basalt Group. Geol. Surv. Bull. 1457-G, p. G1-G59.

172 - SWANSON, D.A.; WRIGHT, T.L. (1981) - The Regional approach to studying the Columbia River Basalt Group. Soc. India Mem. 3, p. 58-80.

173 - TOMKEIEFF, S.I. (1940) - The Basalt lavas of the Giant's Causeway - District of Northern Ireland. Bull. Volcan., vol. 6, nº: 2, p. 89-143.

174 - TRESSOLDI, M.; GUEDES, M.G.; VAZ, L.F. (1986) - Ocorrências de Basalto de Baixa Densidade na Usina de Porto Primavera e Aspectos de Interesse ao Projeto. An. II. Simp. SuI Am. Mec. Roch., P. Alegre, vol. II, Tema MR-4, p. 238-251.

175 - VUTUKURI, V.S.; LAMA, R.D.; SALUJA, S.S. (1974) - Handbook on Mechanical Properties of Rocks - Testing Techniques and Results Trans Tech. Publ., Vol. I, 280 pp.

176 - WASHBURNE, C.W. (1930) - Petroleum Geology of the State of Sao Paulo, Brazil. Com. Geogr. Geol. do Estado de S. Paulo, Bol. 22.

177 - WATERS, A.C. (1960) - Determining direction of flow in basalts. Am. Jour. Sci, vol. 258-A, p. 350-366.

178 - WATERS, A.C. (1961) - Stratigraphic and Lithologic Variations in the Columbia River Basalt. Am. Jour. Sci., Vol. 259, nº 8, p. 583-611.

179 - WRIGHT, T.L.; GROlier, M.J.; SWANSON, D.A. (1973) - Chemical variation Related to the Stratigraphy of the Columbia River Basalt. Geol. Soc. Am. Bull., vol. 84, nº: 02, p. 371-386.

180 - YOSHIDA, R. (1972) - Contribuição ao Conhecimento de Características Tecnológicas de Materiais Rochosos. Tese de Doutorado, IG-USP, S. Paulo, 2 volumes.

181 - YOSHIDA, R.; FARJALLAT, J.E.S.; CARUSO, L.G.; FRAZÃO, E.B. (1972) - Sugestão de Roteiro e Escolha de Ensaios Tecnológicos de Rochas. An. 4º Sem. Paul. Geol. Aplic., p. 199-236.

182 - ZALAN, P.V.; WOLF, S.; CONCEIÇÃO, J.C.J.; MARQUES, A.; ASTOLFI, M.A.M.; VIEIRA, I.S.; APPI, V.T.; ZANOTTO, O.A. (1990) - Bacia do Paraná. In: GABAGLIA, G.P.R.; MILANI, E.J. (coord) - Origem e Evolução de Bacias Sedimentares. Rio de Janeiro, SNE-PETROBRAS, pg. 135-168.

- APÊNDICE -

APÊNDICE – 1

ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL

(VER FIGURA IV.3)

- METODOLOGIA

ISRM (1981), pg. 111-116

- MÁQUINA DE ENSAIO

Prensa rígida servo-controlada MTS-815, com capacidade de 2700 kN (Departamento de Geotecnia, EESC-USP)

- PROCEDIMENTOS ESPECÍFICOS

a – Controle de tensão: 0,27 Mpa/s (amostras 1 a 6)

OBS: Verificou-se que, mesmo para esta taxa de tensão ($< 0,5$ Mpa/s), o ensaio desenvolveu-se muito rapidamente ($\sim 2,5$ min).

b – Controle de deslocamento axial: 0,0015 mm/s (amostras 7 a 19 e 22 a 32).

OBS: Para a definição desta taxa de deformação, foi considerado o comportamento de outros basaltos já ensaiados na mesma prensa e a duração média do ensaio, conforme norma da ISRM (1981).

c – Controle de deformação radial (amostras 20 e 21): 0,025mm/min.

OBS: método abandonado por prologar excessivamente o ensaio.

d – Etapas:

I – Determinação da resistência (Sigma c) e módulo de elasticidade (amostras 1 a 19 e 32).

II – Determinação da resistência, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson (amostras 20 a 31).

OBS: Tendo em vista o brusco e inesperado rompimento verificado nas dezenove primeiras amostras ensaiadas, e a necessidade de evitar possíveis danos ao equipamento destinado a medição dos deslocamentos circunferenciais, os ensaios da etapa II, com exceção das amostras 20 e 21, foram efetuados em duas fases:

Fase 1: ensaio com medidas de deslocamentos axiais e circunferenciais, até atingir-se uma tensão superior a 50% da tensão máxima (previamente estimada).

Fase 2: após descarregamento total, procede-se ao recarregamento, medindo-se apenas deformações axiais, até a ruptura ou tensão máxima.

e – Para melhor avaliação do comportamento das amostras submetidas ao ensaio, procedeu-se ao prévio mapeamento das suas fraturas (Figuras A.1). No entanto, verificou-se que as juntas tipo I, mais visíveis e facilmente identificadas, resistiam praticamente intactas, na maioria dos ensaios, a solicitação; por outro lado as juntas tipo II e III, mais descontínuas e irregulares, foram as responsáveis pela fragmentação da amostra da ruptura. Decidiu-se, então, pela observação da natureza das superfícies dos fragmentos ou partes da amostra rompida, geralmente preservadas pelo fato de o ensaio ser efetuado em prensa rígida.

f – O módulo de Young calculado (E_t), corresponde ao módulo tangente – 50% da tensão máxima, na curva tensão x deformação axial.

g – A inclinação da reta tangente – 50% da curva tensão x deformação radial (E_t'), é também determinada para o cálculo do coeficiente de Poisson (U), onde $U = E_t/E_t'$.

h – Pelo fato de serem efetuados, em sua maioria, com controle de deformação axial, os ensaios prosseguiram após ter sido atingida a carga máxima. No entanto, em curvas pós-pico (classe I), geralmente muito irregulares, foram obtidas estando o corpo de prova com suas seções parcialmente destruídas, ou com a área de aplicação dos esforços inferior a original, Assim, optou-se por omitir nos gráficos as curvas pós-pico.

- Gráficos – (página 206 a 225)

As considerações a seguir apresentadas referem-se aos ensaios mais problemáticos, ou seja, aqueles efetuados com medida da deformação circunferencial ou radial (amostras 20 a 31).

a – Nos ensaios 20 a 21, controlados em função da deformação circunferencial, verificou-se o desenvolvimento de algo semelhante a pequenos ciclos de carga e descarga. Optou-se então por

respeitar a tendência geral das curvas, eliminando-se ou “retificando-se” os trechos onde ocorreram tais ciclos.

b – Nos ensaios 22, 24, 29, 30 e 31, executados em 2 fases, os resultados obtidos estão de acordo com os previamente estimados. A inclinação ou trajetória das curvas, nas duas fases, são praticamente coincidentes. Esta situação ideal tornou possível a determinação dos reais valores do coeficiente de Poisson.

c – A paralisação prematura na 1ª fase, nos ensaios 23 e 25, não permitiu a determinação do coeficiente de Poisson.

d – A abertura de juntas subverticais, nos ensaios 26, 27 e 28, e os correspondentes valores altos para a deformação radial, resultou em coeficientes de Poisson anormalmente altos ($> 0,5$).

- Histogramas de Frequência – (página 226)

Considerou-se apenas os 3 parâmetros com dados em maior número: resistência; módulo de Young e velocidade sônica (V_p).

HISTOGRAMAS DE FREQUÊNCIA

APÊNDICE 2

ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL

(VER FIGURA IV.7)

Ensaio de Compressão Diametral (Ensaio Brasileiro)

- Metodologia

ISRM (1981b), pg. 117-121

- Máquina de Ensaio

Prensa rígida servo-controlada MTS-815, com capacidade de 2700 kN (departamento de Geotecnia, EESC-USP).

- Procedimentos Específicos

a – As seis primeiras amostras foram destinadas a determinação da resistência a tração de juntas tipo I. Em todos os ensaios verificou-se que as juntas tipo II, dispostas transversalmente, abriram-se durante o processo de ruptura da junta tipo I.

b – com finalidade de se obter corpos de prova de rocha intacta (amostras 7 a 9), efetuou-se a amostragem a partir de fragmentos de rocha, os quais, por sua vez, foram obtidos por processo normal de britagem (Pedreira Inderp – Ribeirão Preto).

c – procedeu-se ao cálculo da resistência utilizando-se a fórmula:

$$\sigma_t = 0,636 P/D.t \text{ (MPa)}$$

sendo: P = carga de ruptura (N); D = diâmetro do c.p. (mm); t = espessura do c.p. (mm).

APÊNDICE 3

ENSAIO DE COMPRESSÃO PUNTIFORME

(VER FIGURA IV.8)

Ensaio de Resistencia a Carga Pontual

- Metodologia

ISRM (1985)

- Equipamento

Equipamento de simples concepção (Figura.IV.8a), incorpora um sistema de carga, outro de medição da carga necessária para romper a amostra e, um terceiro de medição da distância entre os dois pontos de contato dos compressores cônicos.

- Procedimento

a – Determinação de dois parâmetros dos fragmentos ensaiados:

w = largura; D = altura (menor dimensão) ou distância entre os pontos de contato dos compressores cônicos.

b – Cálculo de carga de ruptura (Q), a partir do valor de pressão (P) fornecida pelo aparelho:

$$Q = 0,136 P$$

c – Determinação do diâmetro equivalente (De):

$$De = (4 WD/\pi)^{1/2}$$

d – Determinação do índice de resistência não corrigido (Is):

$$Is = Q/De^2$$

e – Cálculo do índice de resistência corrigido [$Is (50)$], por meio de dois métodos alternativos:

- Gráfico ($Q \times De^2$), apresentado na Figura IV.8b

- Utilização de um fator de correção (F) para cada ensaio, $F = (De/50)^{0,45}$

$$I_s (50) = F \times I_s$$

f – Tabela contendo todos os parâmetros (Quadro A)

OBS: Verificou-se que os dois métodos conduziram, exatamente, ao mesmo resultado (10,9 MPa).

- Análise Comparativa

Métodos: ISRM (1985) x ISRM (1972)

A diferença, basicamente, encontra-se no significado do diâmetro (D):

I – ISRM (1972): $D^2 = (D)^2$

II – ISRM (1985): $D_e^2 = (1,27w) D$; onde $0,3w < D < w$

Sendo $D^2 < D_e^2$, evidentemente, $I_s (I) > I_s (II)$

A mesma relação permanece após a correção:

I – $I_s (50) = 16 \text{ MPa}$

II – $I_s (50) = 11 \text{ MPa}$

OBS: Ver tabela (Quadro B) e ábaco, para o método ISRM (1972).

AMOSTRA	CORPO DE PROVA		DIÂMETRO EQUIVALENTE		PARÂMETROS MECÂNICOS		ÍNDICE DE RESISTÊNCIA		
	LARGURA - w - (mm)	ALTURA - D - (mm)	- De ² - (mm ²)	- De - (mm)	TENSÃO - P - (Kg/cm ²)	- Q - (kN)	- I _s - (KPa)	- F -	- I _d (50) (MPa)
1*	57.2	34.8	2528	50.3	180	24.5	9.7	1.00	9.7
2	74.0	37.6	3534	59.4	250	34.0	9.6	1.08	10.4
3	57.0	32.8	2374	48.7	200	27.2	11.5	0.99	11.4
4	64.5	42.7	3498	59.1	230	31.3	8.9	1.08	9.6
5	55.5	43.3	3052	55.2	235	32.0	10.5	1.05	11.0
6*	53.0	32.1	2161	46.5	220	29.9	13.8	0.97	13.4
7*	67.2	40.8	3482	59.0	210	28.6	8.2	1.08	8.9
8*	63.8	44.1	3573	59.8	220	29.9	8.4	1.08	9.1
9	53.0	30.0	2019	44.9	180	24.5	12.1	0.55	11.5
10	57.5	34.3	2505	50.0	200	27.2	10.9	1.00	10.9
11	59.0	34.3	2570	50.7	210	28.6	11.1	1.01	11.2
12	47.5	36.3	2190	46.8	180	24.5	11.2	0.97	10.9
13	52.8	45.5	3051	55.2	240	32.6	10.7	1.05	11.2
14	52.5	43.8	2920	54.0	230	31.3	10.7	1.04	11.1
15	61.5	40.3	3148	56.1	230	31.3	9.9	1.05	10.4
16	56.5	39.8	2856	53.4	230	31.3	11.0	1.03	11.3
17	65.0	40.1	3310	57.5	250	34.0	10.3	1.07	11.0
18*	68.5	27.7	2410	49.1	160	21.8	9.0	0.99	8.9
19	68.0	45.7	3947	62.8	270	36.7	9.3	1.11	10.3
20	57.0	34.8	2519	50.2	200	27.2	10.8	1.00	10.8

* - Pontos desconsiderados - obtêm-se coef. correl. = 0.96 para a reta (gráfico - Fig. IV.8b)

Quadro A: Parâmetros utilizados na determinação do índice de resistência a compressão puntiforme (ISRM, 1985)

AMOSTRA	ALTURA (C.P.) - D - (mm)	FORÇA - Q - (kn)	ÍNDICE DE RESISTÊNCIA	
			- I _s - (MPa) *1	- I _s (50) - (MPa) *2
1	34.8	24.5	20.2	15
2	37.6	34.0	24.0	20
3	32.8	27.2	25.3	19
4	42.7	31.3	17.2	15.5
5	43.3	32.0	17.1	15.5
6	32.1	29.9	29.0	21
7	40.8	28.6	17.2	14
8	44.1	29.9	15.4	14.5
9	30.0	24.5	27.2	18
10	34.3	27.2	23.1	18
11	34.3	28.6	24.3	18
12	36.3	24.5	18.6	15
13	45.5	32.6	15.7	15
14	43.8	31.3	16.3	15
15	40.3	31.3	19.3	16
16	39.8	31.3	19.8	17
17	40.1	34.0	21.1	18
18	27.7	21.8	28.4	18
19	45.7	36.7	17.6	16
20	34.8	27.2	22.5	18

*1 - $I_s = Q/D^2$, *2 - $I_s(50)$: Obtido por meio do ábaco em anexo

Quadro B - Parâmetros utilizados no cálculo do índice de Resistência à Compressão Puntiforme (ISRM, 1972)

- A N E X O S -

ANEXO 1

PARÂMETROS TECNOLÓGICOS DE ROCHAS BASÁLTICAS:

HISTOGRAMAS DE FREQUÊNCIA E CORRELAÇÕES

(VER FIGURA I.10)

Histogramas de Frequência dos índices físicos (30 amostras)

Histogramas de Frequência dos parâmetros de resistência mecânica de agregados (30 amostras)

Correlações entre parâmetros de resistência mecânica de agregados (30 amostras)

Histograma de Frequência do parâmetro resistência à compressão uniaxial (30 amostras)

ANEXO 2

ROCK MASS RATING – RMR

(Sistema de Classificação Geomecânica de Bieniawski, 1989)

SISTEMA RMR

Procedimento: (Ver Quadro A)

1. Rocha Intacta (Peso 7 ou 15)

Para a resistência da rocha intacta, dispõem-se de dois valores distintos: 80 MPa e 275 MPa, obtidos respectivamente no ensaio convencional e pelo método indireto (compressão puntiforme). O sistema RMR pode priorizar, tanto o valor de resistência da rocha intacta, como o resultado do ensaio, padronizado, de compressão uniaxial. Optou-se assim, por considerar as duas alternativas.

2. RQD (Peso 20)

Como se observa na Figura IV.23b, o entablamento encontra-se dividido em 3 compartimentos, quanto aos valores de RQD. O primeiro compartimento apresenta-se anormalmente fraturado ou desagregado, provavelmente, por corresponder a porção mais superficial do maciço, na região. O terceiro, em contato com o embasamento, encontra-se notavelmente perturbado por deslocamentos cisalhantes. O trecho central (RQD = 90), não perturbado, corresponde ao entablamento típico.

3. Espaçamento (Peso 8)

O diaclasamento subvertical do entablamento apenas é visivelmente compartimentado, na direção vertical, quando as descontinuidades horizontais estão presentes. Na ausência destas, o que via de regra ocorre, o espaçamento é mensurável exclusivamente na direção horizontal. O menor espaçamento nesta direção, 7 centímetros, determinado por meio de trabalhos de campo, em várias localidades, corresponde ao diâmetro médio das “microcolunas”.

4. Condição das Descontinuidades (Peso 28)

O entablamento, ainda que intensamente fraturado, comporta-se em função de determinadas propriedades, como um maciço monolítico, como decorrência das condições extremamente favoráveis de suas juntas.

5. Ação da Água Subterrânea. (Peso 15)

Face ao eficiente selamento e perfeito imbricamento das juntas “colunares” o entablamento é praticamente impermeável.

6. Atitude das Descontinuidades (Quadro B)

Este parâmetro bem como aqueles apresentados no quadro D, são considerados quando da aplicação do RMR a uma obra civil específica.

Cálculo de RMR

- Somatório dos pesos: $7/15 + 20 + 8 + (6 + 6 + 6 + 6 + 4) + 15 = 78/86$

- Conforme a classificação RMR (Quadro C), o entablamento equivale a um maciço de qualidade boa a muito boa.

OBS: O valor encontrado corresponde ao maciço (entablamento), cortado exclusivamente por descontinuidades de origem primária e, não perturbado tectônica ou intempericamente.

PARÂMETRO		INTERVALOS DE VALORES							
1	ROCHA INTACTA	Índice de Compressão Punforme (MPa)	> 10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	(< 1) Recomenda-se o Ensaio de Compres. Uniaxial		
Resistência à Compressão Uniaxial (MPa)		> 250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 a 25	1 a 5	< 1	
PESOS		(15)	12	(7)	4	2	1	0	
2	RQD (%)		90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25		
	PESOS		(20)	17	13	8	3		
3	ESPAÇAMENTO (cm)		> 200	60 - 200	20 - 60	6 - 20	< 6		
	PESOS		20	15	10	(8)	5		
4	CONDIÇÃO DAS DESCONTINUIDADES	Persistência (m)	< 1 (6)*1	1 - 3 (4)	3 - 10 (2)	10 - 20 (1)	> 20 (0)		
Rugosidade de		Muito Rugosa (6)	Rugosa (5)	Levemente Rugosa (3)	Superfície Lisa (1)	Superfície Estriada (0)			
Alteração		Inalterada (6)	Levemente Alterada (5)	Moderad. Alterada (3)	Muito Alterada (1)	Decomposta (0)			
Abertura (mm)		0 (6)	< 0.1 (5)	0.1- 1.0 (4)	1 - 5 (1)	> 5 (0)			
Preenchimento (mm)		0 (6)	MATERIAL RESISTENTE		MATERIAL ARGILOSO				
			< 5 (4)	> 5 (2)	< 5 (2)	> 5 (0)			
5	AÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA	Vazão de infiltração p/10m de túnel (ℓ/min)	0	> 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
μ / σ_1 (*2)		0	< 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5			
CONDIÇÕES GERAIS NO MACIÇO		Completamente seco	Úmido	Molhado	Gotejamento	Escoamento			
PESOS		(15)	10	7	4	0			

*1 - Pesos Individuais
*2 - Pressão de água na descontinuidade/tensão (natural) principal maior
A - Parâmetros de Classificação e seus respectivos pesos

6	DIREÇÃO E MERGULHO DAS DESCONTINUIDADES	MUITO FAVORÁVEL	FAVORÁVEL	MODERADO	DESFAVO RÁVEL	MUITO DESFAVO RÁVEL
PESOS	TÚNEIS	0	-2	-5	-10	-12
	FUNDAÇÕES	0	-2	-7	-15	-25
	TALUDES	0	-5	-25	-50	-60

B - Peso de ajuste para o fator RMR, em função da orientação das descontinuidades

SOMATÓRIO DOS PESOS (6 PARÂMETROS)	81 - 100	61 - 80	41 - 60	21 - 40	< 20
CLASSE DE MACIÇO	I	II	III	IV	V
DESCRIÇÃO	MUITO BOM	BOM	REGULAR	RUIM	MUITO RUIM

C - Determinação do fator RMR, a partir do somatório dos pesos dos 6 parâmetros

CLASSE DE MACIÇO	I	II	III	IV	V
TEMPO MÉDIO DE AUTOSUSTENTAÇÃO	20 ANOS	1 ANO	1 SEMANA	10 HORAS	30 MINUTOS
VÃO LIVRE	15 m	10 m	5 m	2,5 m	1,0 m
COESÃO (kPa)	> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100
ÂNGULO DE ATRITO	> 45°	35° - 45°	25° - 35°	15° - 25°	< 15°

D - Significado prático de cada classe de maciço rochoso

ANEXO 3

ROCK MASS QUALITY – Q

(Sistema de Classificação Geomecânica de Barton, 1988)

SISTEMA Q

Procedimento: (Ver Quadros 1 a 6)

1. Índice de qualidade do maciço (RQD)

O valor encontrado, 90, será utilizado diretamente na avaliação.

2. Índice para a Compartimentação Estrutural do Maciço (Jn)

Considera-se 3 famílias: 2 para a delimitação das “microcolunas” (estrutura elementar do entablamento) e outra que corresponde às descontinuidades horizontais. Peso 9.

3. Índice para a Rugosidade das Superfícies das Juntas (Jr)

Embora as juntas subverticais apresentem baixa persistência, suas superfícies também são rugosas e irregulares. Peso 3.

4. Índice para Alteração das Superfícies das Juntas (Ja)

No entablamento, quando não perturbado, as juntas correspondem exatamente à condição A. Peso 0,75.

5. Índice para a Ação da Água Subterrânea (Jw)

A própria condição estabelecida para o parâmetro anterior (Ja), define, neste, a melhor condição possível. Peso 1.

6. Índice para o Estado de Tensões do Maciço (SRF)

O entablamento, nas condições ideais, já definidas, devera comportar-se como um maciço competente (condição II). Para o cálculo das tensões naturais, adotando-se uma profundidade media (50 m) para obras de engenharia, em geral, e admitindo-se $\sigma_v = \sigma_h$, obtém-se $\sigma_1 = 3$ MPa. Os valores de σ_c e σ_t , respectivamente, 275 MPa e 17 MPa (ver Fig.IV.12), permitem então o cálculo das relações:

$$\sigma_c / \sigma_1 = 92 ; \sigma_t / \sigma_1 = 6.$$

O resultado enquadra-se na condição II.J (tensões moderadas). Peso 1,0.

Avaliação

Os 6 parâmetros, agrupados em 3 quocientes, definem o valor Q, como segue:

$$Q = (RQD) / (J_n) \times (J_r) / (J_a) \times (J_w) / (SRF)$$

Substituindo-se, nesta equação, os pesos atribuídos a cada parâmetro, obtêm-se $Q = 40$, que corresponde a um maciço de qualidade boa a muito boa (ver Fig.IV.16c); um resultado equivalente ao obtido pelo sistema RMR.

CONDIÇÃO	DESCRIÇÃO	VALORES (RQD,%)
A	MUITO RUIM	0 - 25
B	RUIM	25 - 50
C	REGULAR	50 - 75
D	BOM	75 - 90
E	EXCELENTE	90 - 100
<u>OBS:</u> a - Quando $RQD < 10$, adotar o valor 10 no cálculo de Q b - Intervalos de 5 para o RQD, ou seja, 100, 95, 90, etc., são suficientes		

1 - Índice de Qualidade do Maciço - RQD (DEERE & DEERE, 1988)

CONDIÇÃO	DESCRIÇÃO	VALORES (Jn)
A	MACIÇO COMPACTO; JUNTAS DISPERSAS OU AUSENTES	0.5 - 1
B	UMA FAMÍLIA DE JUNTAS	2
C	UMA FAMÍLIA MAIS JUNTAS DISPERSAS	3
D	DUAS FAMÍLIAS DE JUNTAS	4
E	DUAS FAMÍLIAS MAIS JUNTAS DISPERSAS	6
F	TRÊS FAMÍLIAS DE JUNTAS	9
G	TRÊS FAMÍLIAS MAIS JUNTAS DISPERSAS	12
H	QUATRO OU MAIS FAMÍLIAS DE JUNTAS, MACIÇO MUITO FRATURADO	15
J	MACIÇO COMPLETAMENTE FRAGMENTADO	20
<u>OBS:</u> a - Para intersecções, usar (3,0 Jn) b - Para emboques, usar (2,0 Jn)		

2 - Índice para a Compartimentação Estrutural do Maciço - Jn

CONDIÇÃO	DESCRIÇÃO	CONDIÇÃO
I	Juntas com contato rocha-rocha e deslocamentos diferenciais inferiores à 10 centímetros	
A	JUNTAS NÃO PERSISTENTES	4
B	SUPERFÍCIES RUGOSAS OU IRREGULARES, ONDULADAS	③
C	SUPERFÍCIES LISAS, ONDULADAS	2
D	SUPERFÍCIES ESTRIADAS, ONDULADAS	1.5
E	SUPERFÍCIES RUGOSAS OU IRREGULARES, PLANAS	1.5
F	SUPERFÍCIES LISAS, PLANAS	1.0
G	SUPERFÍCIES ESTRIADAS, PLANAS	0.5
II	Juntas preenchidas, com evidências de cisalhamento, sem contato rocha-rocha	
H	MATERIAL DE PREENCHIMENTO, DE NATUREZA ARGILOSA	1.0
J	MATERIAL DE PREENCHIMENTO GRANULAR OU ARENOSO	1.0
<p>OBS: a - Adicionar 1.0 ao valor de Jr, quando o espaçamento médio das juntas principais for maior que 3.0 metros.</p> <p>b - Jr = 0.5, pode ser adotado para juntas planas com superfícies estriadas, quando as lineações estiverem orientadas segundo a direção de menor resistência</p>		
3 - Índice para a rugosidade das superfícies das juntas - Jr		

CONDIÇÃO	DESCRIÇÃO	VALORES (Ja)	ϕ_r^* (Aprox.)
I	Juntas com contato rocha-rocha		
A	Juntas hermeticamente seladas por material resistente e impermeável (quartzo, epidoto, etc...)	0.75	-
B	Superfícies, inalteradas, apresentando apenas manchas	1	25-35°
C	Superfícies levemente alterados, separadas por películas de material arenoso e rocha desintegrada contendo argila esparsamente disseminada	2	25-30°
D	Películas de preenchimento, compostas por material silto arenoso e pequena fração argilosa	3	20-25°
E	Películas de material mole (micas, talco, clorita, grafita, etc) e pequena porção de argilo-minerais expansivos	4	8-16°
II	Juntas com preenchimentos delgados (< 5 mm) e deslocamentos diferenciais inferiores à 10 centímetros		
F	Superfícies separadas por partículas arenosas, material rochoso desintegrado com argila esparsamente disseminada, etc...	4	25-30°
G	Material de preenchimento contínuo, composto por argilo-minerais fortemente sobre adensados	6	16-24°
H	Preenchimento contínuo de material argiloso pouco ou medianamente sobreadensado	8	12-16°
J	Preenchimento contínuo de material com porcentagens variáveis de argilo-minerais expansivos e água intersticial	8-12	6-12°
III	Juntas com preenchimentos mais espessos, sem contato rocha-rocha, apresentando evidências de cisalhamento		
K	Preenchimento contendo zonas de rocha desintegrada;	6	6-24°
L	Fragmentada e material argiloso (ver condições, G,	8	
M	H, J para a caracterização das argilas)	8-12	
N	Preenchimento com zonas de material silto-arenoso e pequena fração de minerais argilosos	5	-
O	Zonas de preenchimento contínuo e espesso;	10	6-24°
P	Contendo material argiloso (ver condição G, H, J,	13	
R	para a caracterização das argilas)	13-20	

* - ângulo de atrito residual

4 - Índice para a alteração das superfícies das juntas - Ja

CONDI ÇÃO	DESCRIÇÃO	VALORES (Jw)	μ^* (Kg/cm ²)
A	Escavação a seco ou com pequena afluência de água (5 l /min)	①	< 1
B	Moderada afluência de água com eventual carreamento do preenchimento	0.66	1.0-2.5
C	Afluência de água em grande quantidade, em rocha competente com juntas não preenchidas	0.5	2.5-10
D	Elevada afluência de água com carreamento significativo do preenchimento	0.33	2.5-10
E	Afluência excepcionalmente elevada de água, por ocasião do desmonte a fogo, e posterior decaimento com o tempo	0.1-0.2	> 10
F	Afluência de água excepcionalmente elevada, não se observando do decaimento com o tempo	.05-0.1	> 10

* - Pressão de água na descontinuidade

OBS: a - Os valores das condições C a F, constituem estimativas aproximadas. Se forem efetuadas medidas da drenagem, Jw deverá ser aumentado

b - Problemas especiais, relacionados com a formação do gelo, não são consideradas

5 - Índice para a ação da água subterrânea - Jw

CONDIÇÃO	DESCRIÇÃO	VALORES (SRF)
I	Zonas de baixa resistência interceptando a escavação	
A	Ocorrências múltiplas, contendo material argiloso ou rocha decomposta; maciço circunjacente, muito desagregado (qualquer prof.)	10.0
B	Ocorrência única, contendo material argiloso ou rocha decomposta (profundidade da escavação < 50m)	5.0
C	Ocorrência única, contendo material argiloso ou rocha decomposta (profundidade da escavação > 50m)	2.5
D	Ocorrências múltiplas de zonas cisalhadas em rocha competente; maciço circunjacente, desagregado (qualquer profundidade)	7.5
E	Ocorrência específica de zona cisalhada em rocha competente (profundidade da escavação < 50m)	5.0
F	Ocorrência específica de zona cisalhada em rocha competente; (profundidade da escavação > 50m)	2.5
G	Maciço desagregado, intensamente fraturado, com juntas abertas, etc... (qualquer profundidade)	5.0
OBS: a - Recomenda-se a redução do parâmetro SRF de 25 a 50%, nas situações em que as principais zonas de fraqueza não interceptam a escavação		

6 - Índice para o estado de tensões do maciço - SRF ("Stress Reduction Factor")

CONDIÇÃO	DESCRIÇÃO	σ_c / σ_1 (*)	σ_t / σ_1 (*)	VALORES (SRF)
II	Rochas competentes; problemas relacionados às tensões naturais			
H	Tensões baixas; próximo à superfície	> 200	> 13	2.5
J	Tensões moderadas	10-200	0.66-13	(1.0)
K	Tensões elevadas; eventuais problemas de estabilidade	5-10	.33-.66	0.5-2.
L	"Rock Burst" moderado (maciço compacto)	2.5-5.	.16-.33	5.0-10
M	"Rock Burst" intenso (maciço compacto)	< 2.5	< .16	10.-20.
<p><u>OBS:</u> b - Para tensões naturais fortemente anisotrópicas, introduzir correções de σ_c e σ_t de acordo com os seguintes critérios</p> <p>1 - Quando $5 < \sigma_1 / \sigma_3 < 10$, reduzir σ_c para $0.8 \sigma_c$ e σ_t para $0.8 \sigma_t$</p> <p>2 - Quando $\sigma_1 / \sigma_3 > 10$, reduzir σ_c para $0.6 \sigma_c$ e σ_t para $0.6 \sigma_t$</p> <p>* - σ_c = Resistência à compressão uniaxial; σ_t = Resistência à tração σ_1 e σ_3 = Respectivamente, tensão (natural) principal maior e menor</p>				
III	Rochas incompetentes; comportamento plástico sob altas tensões			
N	"Squeezing" moderado			5.0-10.
O	"Squeezing" intenso			10.-20.
IV	Rochas expansivos; expansibilidade dependendo da presença de água			
P	Expansão moderada			5.0-10.
R	Expansão intensa			10.-15.

6 - SRF (continuação)

DOUTORADO

(Documentos)

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

O Reitor da Universidade de São Paulo confere ao Geólogo

NAHOR NEVES DE SOUZA JÚNIOR

o presente diploma de *Doutor em Engenharia*

Área de concentração: *Geotecnia*

tendo em vista que satisfaz todas as exigências pertinentes a este grau,

estabelecidas no Regulamento dos Cursos de Pós-Graduação da

Escola de Engenharia de São Carlos

para que possa gozar de todos os direitos e prerrogativas concedidas pela legislação vigente.

Reitoria da Universidade de São Paulo, aos 12 de agosto de 1992.

and a

Prof. Dr. Roberto Leal Lobo e Silva Filho
Reitor

Fl.

Prof. Dr. Franco Maria Lajolo
Pró-Reitor

Profª. Dra. Lor Cury
Secretária Geral

Candidato: NAHOR NEVES DE SOUZA JUNIOR

Código	Disciplina ou outra atividade programada	Período		Freq. %	Créditos	Nível
		sem.	ano			

Notas da Defesa da Dissertação/Tese: 10,0 - 10,0 - 10,0 - 10,0 - 10,0-----

Observações: */**

* Disciplina cursada na Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho" - Campus de Rio Claro. Atribuição de créditos aprovada pela Câmara de Pós-Graduação em Sessão de 07.11.1988.

** Disciplina cursada na Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho". Atribuição de créditos aprovada pela Câmara Curricular em Sessão de 04.10.1989.

Convenções: A = Excelente, B = Bom, C = Regular, D = Insuficiente, E = Reprovado, I = Incompleto
J = Abandono Justificado, T = Transferência.

NOTA - A, B e C, com direito a crédito.

São Paulo, 12 de agosto de 1992

Prof. Dr. FRANCO MARIA LAJOLO

Pró-Reitor de Pós-Graduação

Profa. Dra. LOR CURY

Secretária Geral da USP

mrc