

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE MACIÇOS
ROCHOSOS INTEMPERIZADOS

GABRIEL JAIME ZAPATA GUERRA

ORIENTADOR: ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD.

DISSERTAÇÃO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-191/11

BRASÍLIA/DF: MARÇO /2011

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE MACIÇOS
ROCHOSOS INTEMPERIZADOS

GABRIEL JAIME ZAPATA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:

Prof. André Pacheco de Assis, PhD, UnB
(ORIENTADOR)

Prof. Hernán Eduardo Martínez Carvajal, DSc, UnB
(EXAMINADOR INTERNO)

Prof. Noris Costa Diniz, DSc, IG/UnB
(EXAMINADOR EXTERNO)

BRASÍLIA/DF, 23 de março de 2011.

FICHA CATALOGRÁFICA

GUERRA, GABRIEL JAIME ZAPATA

Caracterização Geomecânica de Maciços Rochosos Intemperizados [Distrito Federal] 2011
xxiv, 186 p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2007)

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia,
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Mecânica das Rochas

2. Intemperismo

3. Caracterização Geomecânica

4. Maciço Rochoso

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GUERRA, G.J.Z. (2011). Caracterização Geomecânica de Maciços Rochosos Intemperizados. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-191/11, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 186 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Gabriel Jaime Zapata Guerra.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Caracterização Geomecânica de Maciços Rochosos Intemperizados.

GRAU / ANO: Mestre / 2011

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor se reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Gabriel Jaime Zapata Guerra

SQN 409 Bloco C Apto. 301, Brasília, DF, Brasil.

E-mail: zapata804@hotmail.com

“Não sabendo que era impossível, foi lá e fez”.
-Jean Cocteau-

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter-me acompanhado o tempo todo nesta viagem.

Agradecimientos especiales a mi familia, principalmente a mi Papá, Jaime Alberto Zapata, el cual considero que el conocimiento es el camino más seguro al éxito y sin importar las dificultades, siempre me dio su soporte incondicional para salir adelante. A mi mamá y a mi hermanita por sus constantes ánimos.

Ao meu orientador André Pacheco Assis, aos meus colegas, ao Programa de Pós-Graduação de Geotecnia da UnB e ao CNPq pelo apoio financeiro.

À aliança entre o PPG em geotecnia da UnB e Furnas que permitiram o acesso às bases de dados dos ensaios realizados em rocha em maciços rochosos intemperizados. Ao pessoal de Furnas pelo excelente recebimento e atendimento os dias que fiquei por lá, especialmente a João Luiz Armelin e a Heloisa Helena Azevedo.

A minha namorada Sylvinha pelo auxílio na correção do português e pelo grande apoio que ela tem se tornado.

A Katherine Marín por el gran apoyo brindado en mi etapa como universitario, una grande influencia en mi vida.

Em fim, a todos que de uma ou outra forma são responsáveis pela culminação do meu mestrado.

CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE MACIÇOS ROCHOSOS INTEMPERIZADOS

RESUMO

Maciços rochosos intemperizados estão presentes em muitos sítios de obras geotécnicas, tais como barragens, taludes e túneis. As obras geotécnicas escavadas ou apoiadas neste tipo de material apresentam problemas na definição do projeto e, conseqüentemente, deficiências na previsão de seu comportamento. Isso se dá devido à dificuldade para determinar os parâmetros geomecânicos e também às dificuldades na modelagem do meio, muitas vezes descontínuo. A pesquisa apresenta o estudo das propriedades geomecânicas de um maciço rochoso intemperizado que se caracteriza por apresentar um quadro geológico complexo, devido à contínua alternância de camadas de filitos, filitos grafitosos e quartzitos, bem como o padrão irregular que segue o intemperismo em profundidade, à anisotropia conferida pela foliação e à dispersão da orientação das discontinuidades devido a intensos dobramentos. A metodologia consiste em estudar o comportamento de diversas propriedades da matriz rochosa, conforme a variação no grau de intemperismo. Assim, foi observado que o critério aplicado para classificar o intemperismo teve resultados aceitáveis para caracterizar a mudança média das propriedades segundo o grau intemperismo. Porém, foi encontrada uma significativa dispersão dos dados, particularmente nos filitos. Mesmo assim, considera-se que esta metodologia ajuda a diminuir as incertezas relacionadas com a variabilidade e a definição dos parâmetros geomecânicos. Também foram obtidos os parâmetros de resistência do maciço rochoso por meio da metodologia *GSI* de Hoek, sendo estes valores comparados a ensaios de cisalhamento realizados em grandes blocos (grandes o suficiente para serem considerados representativos do maciço rochoso). Foi achado, para o caso estudado, que as estimativas de resistência do maciço rochoso pela metodologia *GSI* de Hoek são conservadoras em relação aos resultados dos ensaios de cisalhamento em grandes blocos. Com base nesses resultados, foram ajustados os dados de entrada da metodologia *GSI* de Hoek para que a envoltória de resistência obtida por esta metodologia seja similar à obtida no ensaio de cisalhamento direto em grandes blocos. Finalmente são apresentadas diretrizes gerais para abordar o problema da caracterização em maciços rochosos intemperizados.

PALAVRAS CHAVES: Intemperismo, metodologia *GSI* de Hoek, caracterização geomecânica, maciços rochosos, matriz rochosa.

GEOMECHANICAL CHARACTERIZATION OF WEATHERED ROCK MASSES

ABSTRACT

Weathered rock masses are present in many sites of geotechnical structures such as dams, embankments and tunnels. Geotechnical structures excavated or supported in this type of material tend to present problems in defining the project and, consequently, deficiencies in predicting their behavior. This is due to the difficulty to determine geomechanical parameters and, also, due to difficulties in modeling the media, often discontinuous. This research presents a study of the geomechanical properties of intemperized rock masses, characterized by presenting a complex geological framework, due to the continuous alternating layers of phyllite, graphitic phyllite and quartzite, due to the irregular pattern that follows the weathering in depth, due to the anisotropy given by the foliation and due to the dispersion of the orientation of discontinuities given by intense folding in this region. The methodology consists in studying the behavior of various properties of the intact rock, considering the variation in the degree of weathering. Thus, it was observed that the criterion applied to classify the weathering had acceptable results to characterize the average change of the properties according to the degree of weathering. However, it was found a significant dispersion of data, particularly in the phyllites. Still, this approach helps to reduce uncertainties related to the variability and definition of the geomechanical parameters. Strength parameters of the rock mass were also obtained using the classification *GSI* of Hoek and these values were compared with shear tests results carried out in large blocks (large enough to be considered representative of the rock mass). For this case of study, it was found that the estimative of the rock mass strength by the classification *GSI* of Hoek is conservative compared to the results of the shear tests carried on large blocks. Based on these results, the input data of the classification *GSI* of Hoek was adjusted, in order to obtain a strength envelope similar to that obtained in the direct shear tests in large blocks. Finally, general guidelines are presented to address the problem of characterization in weathered rock masses.

KEYWORDS: Weathering, classification *GSI* of Hoek, geomechanical characterization, rock masses, intact rock.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	- 1 -
1.1 RELEVÂNCIA DA PESQUISA.....	- 4 -
1.2 OBJETIVOS	- 5 -
1.3 ESTRUTURA DA METODOLOGIA DA PESQUISA.....	- 5 -
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	- 6 -
2 CARACTERIZAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS	- 8 -
2.1 ROCHA INTACTA, DESCONTINUIDADES E MACIÇO ROCHOSO	- 8 -
2.2 CARACTERIZAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS	- 11 -
2.3 CONDIÇÕES GEOLÓGICAS REGIONAIS E LOCAIS.....	- 12 -
2.4 CARACTERIZAÇÃO DA MATRIZ ROCHOSA.....	- 13 -
2.4.1 IDENTIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO DA ROCHA	- 13 -
2.4.1.1 Descrição petrográfica	- 15 -
2.4.1.2 Difração de raios x	- 16 -
2.4.2 PROPRIEDADES ÍNDICE DA ROCHA.....	- 17 -
2.4.2.1 Teor de umidade	- 18 -
2.4.2.2 Absorção de água	- 18 -
2.4.2.3 Peso específico, densidade e densidade relativa	- 19 -
2.4.2.4 Porosidade e índice de vazios.....	- 21 -
2.4.2.5 Velocidade de propagação de ondas	- 22 -
2.4.2.6 Índice de durabilidade da rocha.....	- 25 -
2.4.2.7 Resistência à compressão uniaxial	- 26 -
2.4.2.8 Resistência à tração.....	- 31 -
2.5 CARACTERIZAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES	- 32 -
2.5.1 TIPOS DE DESCONTINUIDADES	- 32 -
2.5.2 FAMÍLIAS DE DESCONTINUIDADES E ORIENTAÇÃO ESPACIAL.....	- 33 -
2.5.3 ESPAÇAMENTO	- 34 -
2.5.4 PERSISTÊNCIA.....	- 34 -
2.5.5 ABERTURA	- 35 -
2.5.6 PREENCHIMENTO	- 35 -

2.5.7	<i>RESISTÊNCIA DAS PAREDES</i>	- 36 -
2.5.8	<i>RUGOSIDADE</i>	- 36 -
2.5.9	<i>PERCOLAÇÃO</i>	- 38 -
2.6	<i>INTEMPERISMO</i>	- 38 -
2.6.1	<i>ALTERAÇÃO</i>	- 40 -
2.6.2	<i>COERÊNCIA</i>	- 40 -
2.6.3	<i>FRATURAMENTO</i>	- 41 -
2.7	<i>ANISOTROPIA E HOMOGENEIDADE</i>	- 42 -
3	<i>RESISTÊNCIA E DEFORMABILIDADE DE MACIÇOS ROCHOSOS</i>	- 43 -
3.1	<i>CRITÉRIO DE MOHR-COULOMB</i>	- 44 -
3.2	<i>CRITÉRIO DE BARTON E CHOUBEY</i>	- 46 -
3.3	<i>CRITÉRIO DE HOEK & BROWN</i>	- 46 -
3.3.1	<i>ÍNDICE DE RESISTÊNCIA GEOLÓGICA</i>	- 48 -
3.3.2	<i>LIMITAÇÕES DO CRITÉRIO DE HOEK & BROWN</i>	- 51 -
3.3.3	<i>PARÂMETROS EQUIVALENTES DO CRITÉRIO DE MOHR-COULOMB</i>	- 51 -
3.4	<i>DEFORMABILIDADE EM MACIÇOS ROCHOSOS</i>	- 53 -
3.5	<i>RESISTÊNCIA DE ROCHAS E MACIÇOS INTEMPERIZADOS</i>	- 56 -
4	<i>CASO DE ESTUDO</i>	- 57 -
4.1	<i>GEOLOGIA LOCAL E REGIONAL</i>	- 58 -
4.2	<i>MORFOLOGIA</i>	- 60 -
4.3	<i>DESCONTINUIDADES</i>	- 60 -
5	<i>APLICAÇÃO DA METODOLOGIA AO CASO DE ESTUDO</i>	- 64 -
5.1	<i>INVESTIGAÇÃO E AMOSTRAGEM</i>	- 64 -
5.2	<i>CARACTERIZAÇÃO DA MATRIZ ROCHOSA</i>	- 67 -
5.2.1	<i>DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA</i>	- 67 -
5.2.1.1	<i>Filito</i>	- 68 -
5.2.1.2	<i>Filito grafitoso</i>	- 69 -
5.2.1.3	<i>Quartzito</i>	- 69 -
5.2.2	<i>DIFRAÇÃO DE RAIOS-X</i>	- 70 -
5.2.2.1	<i>Filito</i>	- 72 -

5.2.2.2	<i>Filito grafitoso</i>	- 75 -
5.2.2.3	<i>Quartzito</i>	- 80 -
5.2.3	<i>POROSIDADE APARENTE</i>	- 81 -
5.2.3.1	<i>Filito</i>	- 81 -
5.2.3.2	<i>Filito grafitoso</i>	- 83 -
5.2.3.3	<i>Quartzito</i>	- 83 -
5.2.4	<i>ABSORÇÃO APARENTE D'ÁGUA</i>	- 84 -
5.2.4.1	<i>Filito</i>	- 84 -
5.2.4.2	<i>Filito grafitoso</i>	- 85 -
5.2.4.3	<i>Quartzito</i>	- 86 -
5.2.5	<i>MASSA ESPECÍFICA SECA</i>	- 87 -
5.2.5.1	<i>Filito</i>	- 87 -
5.2.5.2	<i>Filito grafitoso</i>	- 88 -
5.2.5.3	<i>Quartzito</i>	- 89 -
5.2.6	<i>MASSA ESPECÍFICA SATURADA</i>	- 90 -
5.2.6.1	<i>Filito</i>	- 90 -
5.2.6.2	<i>Filito grafitoso</i>	- 91 -
5.2.6.3	<i>Quartzito</i>	- 92 -
5.2.7	<i>ÍNDICE DE VAZIOS</i>	- 92 -
5.2.7.1	<i>Filito</i>	- 93 -
5.2.7.2	<i>Filito grafitoso</i>	- 93 -
5.2.7.3	<i>Quartzito</i>	- 94 -
5.2.8	<i>VELOCIDADE SÔNICA</i>	- 95 -
5.2.8.1	<i>Filito</i>	- 96 -
5.2.8.2	<i>Filito grafitoso</i>	- 97 -
5.2.8.3	<i>Quartzito</i>	- 99 -
5.2.9	<i>ÍNDICE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PUNTIFORME</i>	- 100 -
5.2.9.1	<i>Filito</i>	- 101 -
5.2.9.2	<i>Filito grafitoso</i>	- 103 -
5.2.9.3	<i>Quartzito</i>	- 105 -
5.2.10	<i>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL, MÓDULO DE ELASTICIDADE E COEFICIENTE DE POISSON</i>	- 108 -
5.2.10.1	<i>Filito</i>	- 109 -
5.2.10.2	<i>Filito grafitoso</i>	- 111 -

5.2.10.3	<i>Quartzito</i>	- 113 -
5.2.11	ÍNDICE DO ESCLERÔMETRO SCHMIDT	- 115 -
5.2.12	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA-ENSAIO BRASILEIRO	- 116 -
5.2.12.1	<i>Filito</i>	- 117 -
5.2.12.2	<i>Filito grafitoso</i>	- 118 -
5.2.12.3	<i>Quartzito</i>	- 119 -
5.2.13	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO	- 120 -
5.2.14	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO TRIAXIAL	- 121 -
5.2.15	CORRELAÇÕES ENTRE PROPRIEDADES DA ROCHA INTACTA	- 123 -
5.2.15.1	<i>Filito</i>	- 124 -
5.2.15.2	<i>Filito grafitoso</i>	- 126 -
5.2.15.3	<i>Quartzito</i>	- 128 -
5.3	CALIBRAÇÃO DA METODOLOGIA GSI PARA MACIÇOS ROCHOSOS INTEMPERIZADOS	- 130 -
5.3.1	ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA PELA METODOLOGIA GSI DE HOEK	- 131 -
5.3.1.1	<i>Estimativa das propriedades para aplicações gerais</i>	- 132 -
5.3.1.2	<i>Estimativa das propriedades para aplicações em taludes</i>	- 134 -
5.3.2	ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA POR MEIO DE ENSAIOS EM GRANDES BLOCOS	- 135 -
5.3.3	CALIBRAÇÃO DA METODOLOGIA GSI - APLICAÇÃO GERAL	- 139 -
5.3.4	CALIBRAÇÃO DA METODOLOGIA GSI - APLICAÇÃO EM TALUDES	- 141 -
6	DIRETRIZES PARA A CARACTERIZAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS INTEMPERIZADOS	- 143 -
7	CONCLUSÕES	- 146 -
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	- 150 -
A.	PERFIS DE SONDAGEM	- 154 -
B.	REGISTRO DE ENSAIOS	- 168 -

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 2.1 - Classificação da durabilidade da rocha (Gamble, 1971).</i>	- 25 -
<i>Tabela 2.2 - Tipos de descontinuidades frequentes na natureza (ABGE, 1998).</i>	- 33 -
<i>Tabela 2.3 - Graus de alteração (ABGE, 1998).</i>	- 40 -
<i>Tabela 2.4 - Graus de coerência (ABGE, 1998).</i>	- 41 -
<i>Tabela 2.5 - Graus de fraturamento (ABGE, 1998).</i>	- 41 -
<i>Tabela 3.1 - Critérios de resistência aceitos para cada tipo de material rochoso (Assis, 2003).</i>	- 44 -
<i>Tabela 3.2 - Equações de Mohr-Coulomb utilizadas nas descontinuidades (Assis, 2003).</i>	- 45 -
<i>Tabela 3.3 - Principais propostas para determinar o módulo de deformabilidade de maciços rochosos (Maia, 2007).</i>	- 54 -
<i>Tabela 5.1 - Amostras e resultados da difração em raios X para o filito.</i>	- 72 -
<i>Tabela 5.2 - Amostras e resultados da difração em raios X para o filito grafitoso.</i>	- 75 -
<i>Tabela 5.3 - Resultados da porosidade aparente do filito.</i>	- 82 -
<i>Tabela 5.4 - Resultados da porosidade aparente do filito grafitoso.</i>	- 83 -
<i>Tabela 5.5 - Resultados da porosidade aparente do quartzito.</i>	- 84 -
<i>Tabela 5.6 - Resultados da absorção aparente do filito.</i>	- 85 -
<i>Tabela 5.7 - Resultados da absorção aparente do filito grafitoso.</i>	- 86 -
<i>Tabela 5.8 - Resultados da absorção aparente do quartzito.</i>	- 86 -
<i>Tabela 5.9 - Resultados da massa específica seca do filito.</i>	- 87 -
<i>Tabela 5.10 - Resultados da massa específica seca do filito grafitoso.</i>	- 88 -
<i>Tabela 5.11 - Resultados da massa específica seca do quartzito.</i>	- 89 -
<i>Tabela 5.12 - Resultados da massa específica saturada do filito.</i>	- 90 -
<i>Tabela 5.13 - Resultados da massa específica saturada do filito grafitoso.</i>	- 91 -
<i>Tabela 5.14 - Resultados da massa específica saturada do quartzito.</i>	- 92 -
<i>Tabela 5.15 - Resultados do índice de vazios para o filito.</i>	- 93 -
<i>Tabela 5.16 - Resultados do índice de vazios para o filito grafitoso.</i>	- 93 -
<i>Tabela 5.17 - Resultados do índice de vazios para o quartzito.</i>	- 94 -
<i>Tabela 5.18 - Resultados da velocidade de propagação da onda P para o filito.</i>	- 96 -
<i>Tabela 5.19 - Resultados da velocidade de propagação da onda P para o filito grafitoso.</i> ...	- 98 -
<i>Tabela 5.20 - Resultados da velocidade de propagação da onda P para o quartzito.</i>	- 99 -
<i>Tabela 5.21 - Resultados do índice à compressão puntiforme do filito.</i>	- 101 -
<i>Tabela 5.22 - Resultados do índice à compressão puntiforme do filito grafitoso.</i>	- 103 -
<i>Tabela 5.23 - Resultados do índice à compressão puntiforme do quartzito.</i>	- 105 -
<i>Tabela 5.24 - Resultados da compressão uniaxial para o filito.</i>	- 110 -
<i>Tabela 5.25 - Resultados da compressão uniaxial para o filito grafitoso.</i>	- 111 -

<i>Tabela 5.26 - Resultados da compressão uniaxial para o quartzito.....</i>	<i>- 113 -</i>
<i>Tabela 5.27 - Resultados da resistência à tração para o filito.....</i>	<i>- 117 -</i>
<i>Tabela 5.28 - Resultados da resistência à tração para o filito grafitoso.....</i>	<i>- 118 -</i>
<i>Tabela 5.29 - Resultados da resistência à tração para o quartzito.....</i>	<i>- 119 -</i>
<i>Tabela 5.30 - Parâmetros de geomecânicos do maciço rochoso estimados pela metodologia GSI de Hoek (filito grafitoso C3/A3) -aplicação geral-.....</i>	<i>- 133 -</i>
<i>Tabela 5.31 - Parâmetros de geomecânicos do maciço rochoso estimados pela metodologia GSI de Hoek (filito grafitoso C3/A3) -aplicação em taludes-.....</i>	<i>- 135 -</i>
<i>Tabela 5.32 - Parâmetros de geomecânicos do maciço rochoso estimados depois de calibrar a metodologia GSI de Hoek (aplicações gerais).</i>	<i>- 140 -</i>
<i>Tabela 5.33 - Parâmetros de geomecânicos do maciço rochoso estimados depois de calibrar a metodologia GSI de Hoek (aplicações em taludes).</i>	<i>- 142 -</i>
<i>Tabela B.1 - Resultados de massa específica, porosidade, absorção e índice de vazios –filito-.....</i>	<i>- 168 -</i>
<i>Tabela B.2 - Resultados de massa específica, porosidade, absorção e índice de vazios –filito grafitoso-.....</i>	<i>- 169 -</i>
<i>Tabela B.3 - Resultados de massa específica, porosidade, absorção e índice de vazios –quartzito-.....</i>	<i>- 170 -</i>
<i>Tabela B.4 - Resultados da velocidade de onda P, densidade seca ao natural e módulo de Young dinâmico –filito-.....</i>	<i>- 171 -</i>
<i>Tabela B.5 - Resultados da velocidade de onda P, densidade seca ao natural e módulo de Young dinâmico –filito grafitoso-.....</i>	<i>- 171 -</i>
<i>Tabela B.6 - Resultados da velocidade de onda P, densidade seca ao natural e módulo de Young dinâmico –quartzito-.....</i>	<i>- 172 -</i>
<i>Tabela B.7 - Resultado do índice de resistência puntiforme (carga paralela à foliação) – filito-.....</i>	<i>- 172 -</i>
<i>Tabela B.8 - Resultado do índice de resistência puntiforme (carga perpendicular à foliação) – filito-.....</i>	<i>- 172 -</i>
<i>Tabela B.9 - Resultado do índice de resistência puntiforme (carga paralela à foliação) – filito grafitoso-.....</i>	<i>- 173 -</i>
<i>Tabela B.10- Resultado do índice de resistência puntiforme (carga perpendicular à foliação) – filito grafitoso-.....</i>	<i>- 173 -</i>
<i>Tabela B.11 - Resultado do índice de resistência puntiforme (carga paralela à foliação) – quartzito-.....</i>	<i>- 174 -</i>
<i>Tabela B.12 - Resultado do índice de resistência puntiforme (carga perpendicular à foliação) – quartzito-.....</i>	<i>- 174 -</i>
<i>Tabela B.13 - Resultado da resistência uniaxial, coeficiente de Poisson e módulo de Young – filito-.....</i>	<i>- 175 -</i>
<i>Tabela B.14 - Resultado da resistência uniaxial, coeficiente de Poisson e módulo de Young – filito grafitoso-.....</i>	<i>- 179 -</i>

Tabela B.15 - Resultado da resistência uniaxial, coeficiente de Poisson e módulo de Young – quartzito-..... - 183 -

Tabela B.16 - Resultados da resistência à tração pelo ensaio brasileiro -filito-. - 185 -

Tabela B.17 - Resultados da resistência à tração pelo ensaio brasileiro –filito grafitoso-.. - 185 -

Tabela B.18 - Resultados da resistência à tração pelo ensaio brasileiro –quartzito-..... - 186 -

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 - Etapas das atividades realizadas na pesquisa.....</i>	<i>- 6 -</i>
<i>Figura 2.1 - Transição do comportamento de rocha intacta a maciço rochoso, em função do tamanho do túnel e das descontinuidades (modificado - Hoek & Brown, 1997)....</i>	<i>- 10 -</i>
<i>Figura 2.2 - Transição do modo de ruptura de um talude quando suas propriedades são governadas por: a) rocha intacta, b) uma descontinuidade, c) duas descontinuidades, d) maciço rochoso (modificado - Hoek & Bray, 1981).....</i>	<i>- 11 -</i>
<i>Figura 2.3 - Direção da foliação de um filito.....</i>	<i>- 15 -</i>
<i>Figura 2.4 - Ábaco para qualificar o grau de fissuramento numa rocha (Fourmaintraux; 1976).</i>	<i>- 24 -</i>
<i>Figura 2.5 - Curvas de tensão- def. axial e tensão- def. diametral (modificado - ISRM, 2007).....</i>	<i>- 26 -</i>
<i>Figura 2.6 - Métodos para calcular o módulo de elasticidade, a) Módulo tangente, b) Módulo médio, c) Módulo secante (modificado - ISRM, 2007).....</i>	<i>- 27 -</i>
<i>Figura 2.7 - Ensaio de carga puntiforme em diferentes corpos de prova e requerimentos das dimensões da seção transversal. (modificado – ISRM, 2007).....</i>	<i>- 28 -</i>
<i>Figura 2.8 - Ábaco para determinar a resistência à compressão uniaxial por meio do esclerômetro (modificado - ISRM, 2007).....</i>	<i>- 31 -</i>
<i>Figura 2.9 - Esquema do ensaio de compressão diametral.....</i>	<i>- 32 -</i>
<i>Figura 2.10 - Orientação de uma descontinuidade (modificado- Maia, 2003).....</i>	<i>- 34 -</i>
<i>Figura 2.11 - Medida do espaçamento de descontinuidades em rocha exposta (modificado- Assis, 2003).....</i>	<i>- 34 -</i>
<i>Figura 2.12 - Esquema ilustrativo da persistência em descontinuidades (Assis, 2003).....</i>	<i>- 34 -</i>
<i>Figura 2.13 - descontinuidade: a) Fechada; b) Aberta; c) Preenchida com água (modificado- Maia, 2003).</i>	<i>- 35 -</i>
<i>Figura 2.14 - Perfis típicos de rugosidade e respectivos valores de JRC (modificado- Hoek, 2007).</i>	<i>- 37 -</i>
<i>Figura 3.1 – Descont. plana e lisa, parcialmente preenchida e preenchida (modificado- Assis, 2003).....</i>	<i>- 45 -</i>
<i>Figura 3.2 - Comparação entre um talude sem e com perturbação devido ao processo de escavação (Maia, 2007).</i>	<i>- 48 -</i>
<i>Figura 3.3 - Ábacos do GSI em maciços rochosos homogeneamente fraturados (Marinos & Hoek, 2000).</i>	<i>- 49 -</i>
<i>Figura 3.4 - Ábaco para estimar o valor do GSI em maciços rochosos heterogêneos (Marinos & Hoek, 2000).</i>	<i>- 50 -</i>
<i>Figura 3.5 - Esquema do ajuste da envoltória de Mohr & Coulomb ao critério de ruptura de Hoek & Brown generalizado (modificado - Hoek et al., 2004).....</i>	<i>- 52 -</i>
<i>Figura 3.6 - Comparação entre diversas propostas para estimar o módulo de deformabilidade em um maciço rochoso (Maia, 2007).....</i>	<i>- 55 -</i>

<i>Figura 3.7 - Resistência da rocha e de maciços intemperizados.....</i>	<i>- 56 -</i>
<i>Figura 4.1 - Localização do empreendimento (Foto: Furnas, 2010).</i>	<i>- 58 -</i>
<i>Figura 4.2 - Mapa geológico regional (Furnas, 2006).....</i>	<i>- 59 -</i>
<i>Figura 4.3 - Estereograma da orientação dos sistemas de foliação mais representativos da ombreira esquerda (projeções em vermelho). (Furnas, 2006).....</i>	<i>- 61 -</i>
<i>Figura 4.4 - Efeito da interpenetração das litologias e das dobras na orientação da foliação, na ombreira esquerda do maciço</i>	<i>- 62 -</i>
<i>Figura 5.1 - Localização das sondagens (Furnas, 2006)</i>	<i>- 66 -</i>
<i>Figura 5.2 - Microscópio de luz transmitida para a análise petrográfica.</i>	<i>- 68 -</i>
<i>Figura 5.3 - Fotomicrografia do filito, registro: 4.0029.2009. (Furnas, 2009).....</i>	<i>- 68 -</i>
<i>Figura 5.4 - Fotomicrografia do filito grafitoso, registro: 4.0021.2009. (Furnas, 2009).....</i>	<i>- 69 -</i>
<i>Figura 5.5 - Fotomicrografia do quartzito, registro: 1.1327.2006. (Furnas, 2009).</i>	<i>- 70 -</i>
<i>Figura 5.6 - Equipamento de difratometria de raios X, Laboratório de Furnas.....</i>	<i>- 71 -</i>
<i>Figura 5.7 - Difratoograma da amostra 4.0029.2009 – Análise Integral filito C2/A2. (Furnas, 2009).</i>	<i>- 73 -</i>
<i>Figura 5.8 - Difratoograma da amostra 4.0029.2009 – Análise Acumulada filito C2/A2. (Furnas, 2009).</i>	<i>- 73 -</i>
<i>Figura 5.9 - Difratoograma da amostra 4.0283.2006– Análise Integral filito C4/A4. (Furnas, 2007).</i>	<i>- 74 -</i>
<i>Figura 5.10 - Difratoograma da amostra 4.0283.2006– Análise Acumulada filito C4/A4. (Furnas, 2007).</i>	<i>- 74 -</i>
<i>Figura 5.11 - Filito inicialmente identificado em campo como grafitoso, e posteriormente em laboratório como carbonoso (Foto: Malafaia, 2007).....</i>	<i>- 76 -</i>
<i>Figura 5.12 - Difratoograma da amostra 4.0121.2008 – Análise Integral filito graf. C2/A2. (Furnas, 2009).</i>	<i>- 77 -</i>
<i>Figura 5.13 - Difratoograma da amostra 4.0121.2008 – Análise Acumulada filito graf. C2/A2. (Furnas, 2009).</i>	<i>- 77 -</i>
<i>Figura 5.14 - Difratoograma da amostra 4.0120.2008 – Análise Integral filito graf. C3/A3. (Furnas, 2009).</i>	<i>- 78 -</i>
<i>Figura 5.15 - Difratoograma da amostra 4.0120.2008 – Análise Acumulada filito graf. C3/A3. (Furnas, 2009).</i>	<i>- 78 -</i>
<i>Figura 5.16 - Difratoograma da amostra 4.0274.2006 – Análise Integral filito graf. C4/A4. (Furnas, 2007).</i>	<i>- 79 -</i>
<i>Figura 5.17 - Difratoograma da amostra 4.0274.2006 – Análise Acumulada filito graf. C4/A4. (Furnas, 2007).</i>	<i>- 79 -</i>
<i>Figura 5.18 - Difratoograma da amostra 4.0281.2006 – Análise Integral quartzito C4/A3. (Furnas, 2007).</i>	<i>- 80 -</i>
<i>Figura 5.19 - Difratoograma da amostra 4.0281.2006 – Análise Acumulada quartzito C4/A3. (Furnas, 2007).</i>	<i>- 81 -</i>

<i>Figura 5.20 - Variação média da porosidade aparente do filito segundo o grau de intemperismo.</i>	- 82 -
<i>Figura 5.21 - Variação média da porosidade aparente do filito grafitoso segundo o grau de intemperismo.</i>	- 83 -
<i>Figura 5.22 - Variação média da porosidade aparente do quartzito segundo o grau de intemperismo.</i>	- 84 -
<i>Figura 5.23 - Variação média da absorção aparente do filito segundo o grau de intemperismo.</i>	- 85 -
<i>Figura 5.24 - Variação média da absorção aparente do filito grafitoso segundo o grau de intemperismo.</i>	- 86 -
<i>Figura 5.25 - Variação média da absorção aparente do quartzito segundo o grau de intemperismo.</i>	- 87 -
<i>Figura 5.26 - Variação média da massa específica seca do filito segundo o grau de intemperismo.</i>	- 88 -
<i>Figura 5.27 - Variação média da massa específica seca do filito grafitoso segundo o grau de intemperismo.</i>	- 89 -
<i>Figura 5.28 - Variação média da massa específica seca do quartzito segundo o grau de intemperismo.</i>	- 89 -
<i>Figura 5.29 - Variação média da massa específica saturada do filito segundo o grau de intemperismo.</i>	- 90 -
<i>Figura 5.30 - Variação média da massa específica saturada do filito grafitoso segundo o grau de intemperismo.</i>	- 91 -
<i>Figura 5.31 - Variação média da massa específica saturada do quartzito segundo o grau de intemperismo.</i>	- 92 -
<i>Figura 5.32 - Variação média do índice de vazios do filito segundo o grau de intemperismo.</i>	- 93 -
<i>Figura 5.33 - Variação média do índice de vazios do filito grafitoso segundo o grau de intemperismo.</i>	- 94 -
<i>Figura 5.34 - Variação média do índice de vazios do quartzito segundo o grau de intemperismo.</i>	- 95 -
<i>Figura 5.35 - Equipamento e ensaio de velocidade sônica.</i>	- 96 -
<i>Figura 5.36 - Variação média da velocidade de propagação da onda P do filito segundo o grau de intemperismo.</i>	- 97 -
<i>Figura 5.37 - Variação média do módulo de Young dinâmico do filito segundo o grau de intemperismo.</i>	- 97 -
<i>Figura 5.38 - Variação média da velocidade de propagação da onda P do filito grafitoso segundo o grau de intemperismo.</i>	- 98 -
<i>Figura 5.39 - Variação média do módulo de Young dinâmico do filito grafitoso segundo o grau de intemperismo.</i>	- 99 -
<i>Figura 5.40 - Variação média da velocidade de propagação da onda P do quartzito segundo o grau de intemperismo.</i>	- 100 -

<i>Figura 5.41 - Variação média do módulo de Young dinâmico do quartzito segundo o grau de intemperismo.</i>	<i>- 100 -</i>
<i>Figura 5.42 - Equipamento de carregamento puntiforme.</i>	<i>- 101 -</i>
<i>Figura 5.43 - Variação média do $I_s(50)_{//}$ do filito segundo o grau de intemperismo.</i>	<i>- 102 -</i>
<i>Figura 5.44 - Variação média do $I_s(50)_{\perp}$ do filito segundo o grau de intemperismo.</i>	<i>- 102 -</i>
<i>Figura 5.45 - Variação média do índice de anisotropia do filito segundo o grau de intemperismo.</i>	<i>- 102 -</i>
<i>Figura 5.46 - Variação média do $I_s(50)_{//}$ do filito grafitoso segundo o grau de intemperismo.</i>	<i>- 104 -</i>
<i>Figura 5.47 - Variação média do $I_s(50)_{\perp}$ do filito grafitoso segundo o grau de intemperismo.</i>	<i>- 104 -</i>
<i>Figura 5.48 - Variação média do índice de anisotropia do filito grafitoso segundo o grau de intemperismo.</i>	<i>- 104 -</i>
<i>Figura 5.49 - Variação média do $I_s(50)_{//}$ do quartzito segundo o grau de intemperismo. ..</i>	<i>- 106 -</i>
<i>Figura 5.50 - Variação média do $I_s(50)_{\perp}$ do quartzito segundo o grau de intemperismo. ..</i>	<i>- 106 -</i>
<i>Figura 5.51 - Variação média do índice de anisotropia do quartzito segundo o grau de intemperismo.</i>	<i>- 106 -</i>
<i>Figura 5.52 - Esquema da explicação do aumento do índice de anisotropia com o avanço de intemperismo no quartzito.</i>	<i>- 107 -</i>
<i>Figura 5.53 - Sistema servo-controlado para ensaios de compressão.</i>	<i>- 109 -</i>
<i>Figura 5.54 - Detalhe da montagem do corpo de prova. (Furnas, 2009).</i>	<i>- 109 -</i>
<i>Figura 5.55 - Processo para obtenção de amostras. (Furnas, 2009).</i>	<i>- 109 -</i>
<i>Figura 5.56 - Variação média da resistência à compressão uniaxial do filito segundo o grau de intemperismo.</i>	<i>- 110 -</i>
<i>Figura 5.57 - Variação média do módulo de elasticidade secante do filito segundo o grau de intemperismo.</i>	<i>- 110 -</i>
<i>Figura 5.58 - Variação média do coeficiente de Poisson do filito segundo o grau de intemperismo.</i>	<i>- 111 -</i>
<i>Figura 5.59 - Variação média da resistência à compressão uniaxial do filito grafitoso segundo o grau de intemperismo.</i>	<i>- 112 -</i>
<i>Figura 5.60 - Variação média do módulo de elasticidade secante do filito grafitoso segundo o grau de intemperismo.</i>	<i>- 112 -</i>
<i>Figura 5.61 - Variação média do coeficiente de Poisson do filito grafitoso segundo o grau de intemperismo.</i>	<i>- 112 -</i>
<i>Figura 5.62 - Variação média da resistência à compressão uniaxial do quartzito segundo o grau de intemperismo.</i>	<i>- 114 -</i>
<i>Figura 5.63 - Variação média do módulo de elasticidade secante do quartzito segundo o grau de intemperismo.</i>	<i>- 114 -</i>
<i>Figura 5.64 - Variação média do coeficiente de Poisson do quartzito segundo o grau de intemperismo.</i>	<i>- 114 -</i>

<i>Figura 5.65 - Esclerômetro de Schmidt empregado.</i>	- 115 -
<i>Figura 5.66 - Máquina para executar o ensaio brasileiro. (Suárez-Burgoa, 2008).</i>	- 117 -
<i>Figura 5.67 - Variação média da resistência à tração do filito grafitoso segundo o grau de intemperismo.</i>	- 118 -
<i>Figura 5.68 - Variação média da resistência à tração do quartzito segundo o grau de intemperismo.</i>	- 119 -
<i>Figura 5.69 - Equipamento de cisalhamento direto em núcleos de rocha. (Furnas, 2009).</i> .	- 120 -
<i>Figura 5.70 - Preparação de corpo de prova para ensaio de cisalhamento direto.</i>	- 121 -
<i>Figura 5.71 - Envoltória de resistência ao cisalhamento direto do filito grafitoso C2/A2.</i> ..	- 121 -
<i>Figura 5.72 - Envoltória de resistência ao à compressão triaxial do filito grafitoso C4/A4.</i> -	- 122 -
<i>Figura 5.73 - Obtenção dos parâmetros σ_{ci} e m_i para o filito grafitoso C4/A4 a partir do ensaio de compressão triaxial e empregando o RocLab.</i>	- 123 -
<i>Figura 5.74 - Massa específica seca versus porosidade -filito-.</i>	- 124 -
<i>Figura 5.75 - Massa específica seca versus absorção -filito-.</i>	- 125 -
<i>Figura 5.76 - Massa específica seca versus índice de vazios -filito-.</i>	- 125 -
<i>Figura 5.77 - Massa específica seca versus massa específica saturada -filito-.</i>	- 125 -
<i>Figura 5.78 - Velocidade de propagação da onda P versus densidade seca ao natural -filito-.</i>	- 126 -
<i>Figura 5.79 - Massa específica seca versus porosidade -filito grafitoso-.</i>	- 126 -
<i>Figura 5.80 - Massa específica seca versus absorção -filito grafitoso-.</i>	- 127 -
<i>Figura 5.81 - Massa específica seca versus índice de vazios -filito grafitoso-.</i>	- 127 -
<i>Figura 5.82 - Massa específica seca versus massa específica saturada -filito grafitoso-.</i>	- 127 -
<i>Figura 5.83 - Velocidade de propagação da onda P versus densidade seca ao natural -filito grafitoso-.</i>	- 128 -
<i>Figura 5.84 - Massa específica seca versus porosidade -quartzito-.</i>	- 128 -
<i>Figura 5.85 - Massa específica seca versus absorção -quartzito-.</i>	- 129 -
<i>Figura 5.86 - Massa específica seca versus índice de vazios -quartzito-.</i>	- 129 -
<i>Figura 5.87 - Massa específica seca versus massa específica saturada -quartzito-.</i>	- 129 -
<i>Figura 5.88 - Velocidade de propagação da onda P versus densidade seca ao natural -quartzito-.</i>	- 130 -
<i>Figura 5.89 - Variação da coesão para diferentes valores do GSI e do m_i. –aplicação geral-.</i>	- 132 -
<i>Figura 5.90 - Variação do ângulo de atrito para diferentes valores do GSI e do m_i. –aplicação geral-.</i>	- 132 -
<i>Figura 5.91 - Envoltória de resistência do maciço rochoso estimada pela metodologia GSI de Hoek -aplicação geral-.</i>	- 133 -
<i>Figura 5.92 - Variação da coesão para diferentes valores do GSI e do m_i. –aplicação em taludes-.</i>	- 134 -

<i>Figura 5.93 - Variação do ângulo de atrito para diferentes valores do GSI e do mi. –aplicação em taludes-.....</i>	<i>- 134 -</i>
<i>Figura 5.94 - Envoltória de resistência do maciço rochoso estimada pela metodologia GSI de Hoek -aplicação em taludes-.....</i>	<i>- 135 -</i>
<i>Figura 5.95 - Equipamento para ensaio de cisalhamento direto 30x30(cm). (Furnas, 2009).....</i>	<i>- 136 -</i>
<i>Figura 5.96 - Gráfico de deslocamento horizontal versus tensão cisalhante da amostra 4.0055.09 – Filito grafitosos C3/A3. (Furnas, 2009).....</i>	<i>- 137 -</i>
<i>Figura 5.97 - Envoltória de ruptura e residual ao cisalhamento da amostra 4.0055.09 – Filito grafitoso C3/A3. c – coeção, f – ângulo de atrito, sn – tensão normal. (Furnas, 2009).....</i>	<i>- 137 -</i>
<i>Figura 5.98 - Fotos dos ensaios de cisalhamento direto, com tensão normal de, respectivamente, (a) 204kPa, (b) 407kPa, (c) 804kPa e (d) 1607 kPa. (Furnas, 2009).....</i>	<i>- 138 -</i>
<i>Figura 5.99 - Comparação entre as envoltórias de resistência do maciço rochoso obtida pela metodologia GSI (resistência para aplicações gerais) e pelo ensaio de cisalhamento direto em grandes blocos.</i>	<i>- 139 -</i>
<i>Figura 5.100 - Envoltória de resistência do maciço rochoso estimada depois de calibrar a metodologia GSI de Hoek (resistência para aplicações gerais).....</i>	<i>- 140 -</i>
<i>Figura 5.101 - Comparação entre as envoltórias de resistência do maciço rochoso obtida pela metodologia GSI (resistência para aplicações em taludes) e pelo ensaio de cisalhamento direto em grandes blocos.....</i>	<i>- 141 -</i>
<i>Figura 5.102 - Envoltória de resistência do maciço rochoso estimada depois de calibrar a metodologia GSI de Hoek (resistência para aplicações em taludes).....</i>	<i>- 142 -</i>
<i>Figura 6.1 - Relação entre os mecanismos e criterios de ruptura para maciços rochosos (modificado- Wyllie & Mah, 2001).</i>	<i>- 144 -</i>
<i>Figura A.1 - Perfil de sondagem SM-309 (Furnas, 2006).....</i>	<i>- 154 -</i>
<i>Figura A.2 - Perfil de sondagem SM-105 (Furnas, 2006).....</i>	<i>- 155 -</i>
<i>Figura A.3 - Perfil de sondagem SR-10 (Furnas, 2006).....</i>	<i>- 156 -</i>
<i>Figura A.4 - Perfil de sondagem SM-108 (Furnas, 2006).....</i>	<i>- 157 -</i>
<i>Figura A.5 - Perfil de sondagem SM-109 (Furnas, 2006).....</i>	<i>- 158 -</i>
<i>Figura A.6 - Perfil de sondagem SM-113 (Furnas, 2006).....</i>	<i>- 159 -</i>
<i>Figura A.7 - Perfil de sondagem SM-115 (Furnas, 2006).....</i>	<i>- 160 -</i>
<i>Figura A.8 - Perfil de sondagem SM-116 (Furnas, 2006).....</i>	<i>- 161 -</i>
<i>Figura A.9 - Perfil de sondagem SM-203 (Furnas, 2006).....</i>	<i>- 162 -</i>
<i>Figura A.10 - Perfil de sondagem SM-204 (Furnas, 2006).....</i>	<i>- 163 -</i>
<i>Figura A.11 - Perfil de sondagem SM-301 (Furnas, 2006).....</i>	<i>- 164 -</i>
<i>Figura A.12 - Perfil de sondagem SM-302 (Furnas, 2006).....</i>	<i>- 165 -</i>
<i>Figura A.13 - Perfil de sondagem SM-306 (Furnas, 2006).....</i>	<i>- 166 -</i>

<i>Figura A.14 - Perfil de sondagem SM-307 (Furnas, 2006).</i>	- 167 -
<i>Figura B.1 - Registro fotográfico do ensaio de resistência puntiforme –filito- a) dir. paralela b) dir perpendicular. (Furnas, 2009).</i>	- 173 -
<i>Figura B.2 - Registro fotográfico do ensaio de resistência puntiforme –filito grafitoso-. a) dir. paralela b) dir perpendicular. (Furnas, 2009).</i>	- 174 -
<i>Figura B.3 - Registro fotográfico do ensaio de resistência puntiforme - quartzito-. a) dir. paralela b) dir perpendicular. (Furnas, 2009).</i>	- 175 -
<i>Figura B.4 - Compressão uniaxial, registro 4.0001.2007 – filito-. (Furnas, 2009).</i>	- 175 -
<i>Figura B.5 - Compressão uniaxial, registro 4.0002.2007 – filito-. (Furnas, 2009).</i>	- 176 -
<i>Figura B.6 - Compressão uniaxial, registro 4.0244.06 – filito-. (Furnas, 2009).</i>	- 176 -
<i>Figura B.7 - Compressão uniaxial, registro 4.0246.06 – filito-. (Furnas, 2009).</i>	- 176 -
<i>Figura B.8 - Compressão uniaxial, registro 4.0112.2008 – filito-. (Furnas, 2009).</i>	- 177 -
<i>Figura B.9 - Compressão uniaxial, registro 4.0114.2008 – filito-. (Furnas, 2009).</i>	- 177 -
<i>Figura B.10 - Compressão uniaxial, registro 4.0115.2008 – filito-. (Furnas, 2009).</i>	- 177 -
<i>Figura B.11 - Compressão uniaxial, registro 4.0254.06 – filito-. (Furnas, 2009).</i>	- 178 -
<i>Figura B.12 - Compressão uniaxial, registro 4.0247.06 – filito-. (Furnas, 2009).</i>	- 178 -
<i>Figura B.13 - Compressão uniaxial, registro 4.0248.06 – filito-. (Furnas, 2009).</i>	- 178 -
<i>Figura B.14 - Compressão uniaxial, registro 4.0249.06 – filito grafitoso-. (Furnas, 2009).</i> -	179 -
<i>Figura B.15 - Compressão uniaxial, registro 4.0250.06 – filito grafitoso-. (Furnas, 2009).</i> -	179 -
<i>Figura B.16 - Compressão uniaxial, registro 4.0251.06 – filito grafitoso-. (Furnas, 2009).</i> -	180 -
<i>Figura B.17 - Compressão uniaxial, registro 4.0252.06 – filito grafitoso-. (Furnas, 2009).</i> -	180 -
<i>Figura B.18 - Compressão uniaxial, registro 4.0258.06 – filito grafitoso-. (Furnas, 2009).</i> -	180 -
<i>Figura B.19 - Compressão uniaxial, registro 4.0260.06 – filito grafitoso-. (Furnas, 2009).</i> -	181 -
<i>Figura B.20 - Compressão uniaxial, registro 4.0263.06 – filito grafitoso-. (Furnas, 2009).</i> -	181 -
<i>Figura B.21 - Compressão uniaxial, registro 4.0055.09-01 – filito grafitoso- (Furnas, 2009).</i>	- 181 -
<i>Figura B.22 - Compressão uniaxial, reg. 4.0055.09.02 – filito grafitoso-. (Furnas, 2009).</i> ..	- 182 -
<i>Figura B.23 - Compressão uniaxial, reg. 4.0055.09-03 – filito grafitoso-. (Furnas, 2009).</i> ..	- 182 -
<i>Figura B.24 - Compressão uniaxial, reg. 4.0055.09-04 – filito grafitoso-. (Furnas, 2009).</i> ..	- 182 -
<i>Figura B.25 - Compressão uniaxial – filito grafitoso-. a) Registro 4.0052.09-01; b) Registro 4.0052.09-02; c) Registro 4.0052.09-03. (Furnas, 2009).</i>	- 183 -
<i>Figura B.26 - Compressão uniaxial, registro 4.0245.06 – quartzito-. (Furnas, 2009).</i>	- 184 -
<i>Figura B.27 - Compressão uniaxial, registro 4.0261.06 – quartzito-. (Furnas, 2009).</i>	- 184 -
<i>Figura B.28 - Compressão uniaxial, registro 4.0262.06 – quartzito-. (Furnas, 2009).</i>	- 184 -
<i>Figura B.29 - Registros fotográficos dos corpos de prova ensaiados por compressão diametral - filito-.</i>	- 185 -

Figura B.30- Registros fotográficos dos corpos de prova ensaiados por compressão diametral – filito grafitoso-..... - 186 -

Figura B.31 - Registros fotográficos dos corpos de prova ensaiados por compressão diametral - quartzito-..... - 186 -

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIações E NOMENCLATURA

\AA	-	Ångström, unidade de medida de comprimento, $1 \text{\AA} = 10^{-10} \text{ m}$
a	-	Constante do maciço rochoso (critério de ruptura de Hoek & Brown)
AHE	-	Aproveitamento Hidrelétrico
c'	-	Coesão efetiva
c_p'	-	Coesão efetiva do preenchimento da descontinuidade
c_r'	-	Coesão residual efetiva
D	-	Fator de perturbação do maciço rochoso
e	-	Índice de vazios
E_d	-	Módulo de Young dinâmico
E_i	-	Módulo de deformabilidade da rocha intacta
E_m	-	Módulo de deformabilidade do maciço rochoso.
E_s	-	Módulo de elasticidade secante
ϕ'	-	Ângulo de atrito efetivo
g	-	Aceleração devido à gravidade ($\approx 9,8 \text{ m/s}^2$)
G_s	-	Densidade relativa ou gravidade específica
G_s	-	Módulo de cisalhamento dinâmico
GSI	-	Índice de resistência geológica (“ <i>Geological Strength Index</i> ”)
$I_{(50) //}$	-	Índice de resistência à compressão puntiforme com carregamento de força orientado paralelamente à foliação
$I_{(50) \perp}$	-	Índice de resistência à compressão puntiforme com carregamento de força orientado perpendicularmente à foliação
$I_{(50)a}$	-	Índice de anisotropia para o ensaio de compressão puntiforme
I_d	-	Índice de durabilidade (“ <i>slake durability index</i> ”)
I_s	-	Índice de resistência ao carregamento puntiforme
$I_{s(50)}$	-	Índice de resistência ao carregamento puntiforme corrigido
Ja	-	Coefficiente de alteração da classificação de Barton
JCS	-	Resistência à compressão das paredes da descontinuidade
Jr	-	Coefficiente de rugosidade da classificação de Barton
JRC	-	Coefficiente de rugosidade da descontinuidade
mb	-	Constante do maciço rochoso (critério de ruptura de Hoek & Brown)
mi	-	Constante do material da rocha intacta (critério de Hoek & Brown)
M_d	-	Massa seca da amostra
M_{sat}	-	Massa saturada da amostra
M_{sub}	-	Massa submersa da amostra
M_w	-	Massa de água contida na amostra
M_s	-	Massa dos sólidos da amostra
n	-	Porosidade

Q	-	Classificação geomecânica de Barton (“ <i>Rock Tunnelling Quality Index</i> ”)
RMR	-	Classificação geomecânica de Bieniawski (“ <i>Rock Mass Rating</i> ”)
RQD	-	Índice de qualidade da rocha (“ <i>Rock quality designation</i> ”)
s	-	Constante do maciço rochoso (critério de ruptura de Hoek & Brown)
V	-	Volume total da amostra
V_p	-	Velocidade de onda longitudinal ou primária
V_s	-	Velocidade de onda transversal ou secundária e volume dos sólidos da amostra
V_v	-	Volume de vazios
W	-	Peso total da amostra
W_d	-	Peso seco da amostra
λ	-	Comprimento da onda de radiação do ensaio de difração em raios X
α	-	Direção do mergulho
β	-	Ângulo de mergulho
ϕ_p'	-	Ângulo de atrito efetivo do preenchimento da descontinuidade
ϕ_r'	-	Ângulo de atrito residual efetivo
ν	-	Coefficiente de Poisson
σ_1	-	Tensão principal maior
σ_3	-	Tensão principal menor
σ_{ci}	-	Resistência à compressão uniaxial do material da rocha intacta
σ_{cm}	-	Resistência à compressão uniaxial do maciço rochoso
σ_n	-	Tensão normal
σ_t	-	Resistência à tração
α_a	-	Absorção aparente de água da rocha
γ	-	Peso específico
γ_d	-	Peso específico aparente seco
ρ	-	Densidade
ρ_s	-	Densidade real dos grãos
ρ_d	-	Densidade seca aparente da amostra
ρ_w	-	Densidade da água ($\approx 1000 \text{ kg/m}^3$)
τ	-	Resistência ao cisalhamento
ν_d	-	Coefficiente de Poisson dinâmico

Introdução

Desde tempos históricos, o homem tem aproveitado os maciços rochosos para apoiar e escavar diversas obras geotécnicas tais como obras subterrâneas, barragens, canais de adução, minas a céu aberto, entre outros, visando implementar diferentes serviços e trazendo, com isto, grandes benefícios e desenvolvimento para a população.

Hoek (2007) cita alguns exemplos de obras geotécnicas históricas em maciços rochosos: as instalações e cavernas subterrâneas para as tumbas dos faraós egípcios (2.700 aC), o túnel da Babilônia sob o rio Eufrates, que ligava o palácio com o templo de Belos, o qual se encontrava na outra margem do rio (2.000 aC), e o túnel de 1.036 m de comprimento para condução de água na ilha grega Samos (700 aC.).

Devido ao aumento progressivo de obras escavadas e apoiadas em maciços rochosos e a um número considerável de catástrofes no mundo, por volta de 1960 a mecânica das rochas veio a ser reconhecida como uma disciplina especial dentro da área da engenharia, visando estudar o comportamento de rochas e maciços rochosos quando sujeitos a ações solicitantes.

O maciço rochoso é um conjunto constituído pela matriz rochosa e por todas as descontinuidades nela contida (Assis, 2003). Em relação ao estudo das propriedades do maciço rochoso para fins de engenharia, essas são função das propriedades da matriz rochosa e das descontinuidades. No entanto, alguns pesquisadores consideram também a condição hidráulica.

Considerando a natureza complexa do maciço rochoso, que envolve as incertezas em relação à distribuição das descontinuidades, à estimativa das propriedades mecânicas devido ao efeito da escala, à dificuldade para modelar o meio, entre outras, foram desenvolvidos métodos teórico-empíricos que permitem estimar o comportamento do maciço e, eventualmente, dar soluções de engenharia para estabilizar a obra em questão. Estes métodos são conhecidos como as classificações geomecânicas e a primeira proposta foi estabelecida por Terzaghi com aplicação em túneis (Ojima, 1981).

De forma generalizada, estas classificações resultam da seleção hierarquizada de características relevantes do maciço para conduzirem a certas classes de maciço onde, em cada classe, espera-se um determinado comportamento, e, com base neste resultado, podem-se estimar parâmetros e informações necessárias para projetar e construir a obra. Assim, as classificações geomecânicas surgem como alternativas simplificadas para estimar o comportamento e para dar soluções de projeto em obras executadas em maciços rochosos.

As classificações geomecânicas são baseadas e desenvolvidas a partir do acúmulo de experiências passadas, ou seja, são uma forma sistemática de catalogar experiências obtidas em obras de outros lugares e relacioná-las com a situação ora encontrada (Assis, 2003). Portanto, é importante conhecer a origem e as limitações dos diferentes sistemas de classificação para aplicar cada um deles de forma apropriada segundo as condições do maciço.

Alguns exemplos de classificações geomecânicas de uso comum na atualidade para maciços rochosos são o índice *RMR* (*Rock Mass Rating*) de Bieniawski (1989), o índice de qualidade *Q* (*Tunnelling Quality Index*) de Barton *et al.* (1974) e o índice *GSI* (*Geological Strength Index*) de Hoek (1994).

Os sistemas de classificação *RMR* e *Q* visam recomendar soluções de engenharia, tais como, tipos de suportes em escavações, comprimento do vão auto-sustentável, método de escavação, entre outros.

Já a metodologia *GSI* de Hoek (Hoek, 1994; Hoek *et al.* 2002; Hoek & Diederichs, 2006), fornece estimativas de parâmetros de resistência e deformabilidade para o maciço rochoso. Estes parâmetros são necessários para realizar análises de modelagem numérica, visando prever finalmente o comportamento do maciço e avaliar diferentes tipos de soluções de engenharia para que a obra seja estável.

Na presente pesquisa, dá-se ênfase à caracterização das propriedades dos maciços rochosos intemperizados, e também se verifica se os parâmetros de resistência estimados pela metodologia *GSI* geram resultados realistas para este tipo de maciços.

Em países de clima tropical, o processo de intemperismo é um fator importante, que tende a alterar as propriedades mecânicas do maciço rochoso ao longo do perfil de intemperismo. As obras geotécnicas escavadas ou apoiadas neste tipo de material apresentam problemas na

definição do projeto e, conseqüentemente, deficiências na previsão de seu comportamento. Isso se dá devido à dificuldade para determinar os parâmetros geomecânicos e também às dificuldades na modelagem do meio, muitas vezes descontínuo.

Portanto, no presente trabalho, pretende-se estabelecer uma metodologia que permita caracterizar as propriedades dos maciços rochosos intemperizados por meio do agrupamento dos resultados segundo os critérios estabelecidos pela ABGE (1998) para a identificação do grau de alteração da rocha.

Além disso, objetiva-se verificar se a metodologia *GSI* de Hoek oferece boas estimativas da resistência em maciços rochosos intemperizados (do ponto de vista de ordem de grandeza).

A idéia geral é obter os dados de entrada da metodologia, ou seja, os parâmetros da rocha intacta (m_i , σ_{ci}) por meio de ensaios feitos na matriz rochosa e obter o índice *GSI* e o fator de perturbação *D* por meio da avaliação visual do maciço rochoso. Com estes dados de entrada, estima-se as propriedades geomecânicas do maciço rochoso usando a metodologia *GSI* de Hoek.

Posteriormente, os valores de resistência obtidos da metodologia foram comparados aos resultados de ensaios de cisalhamento de grande porte, os quais são representativos do maciço rochoso.

Verificaram-se as diferenças entre a resistência estimada pela metodologia *GSI* e pelos ensaios de grande porte (considerando este como o valor de referência). Assim, os valores de entrada da metodologia *GSI* de Hoek (m_i , σ_{ci} , *GSI* e *D*) foram ajustados para que as propriedades estimadas do maciço ficassem mais próximas dos valores encontrados pelos ensaios de grande porte.

Finalmente são apresentadas diretrizes gerais para abordar o problema da caracterização em maciços rochosos intemperizados.

Os resultados da pesquisa se limitam às condições do maciço rochoso do caso de estudo. O maciço estudado se caracteriza por ser litologicamente heterogêneo, composto principalmente de filitos, quartzitos, e filitos grafitosos. Para o desenvolvimento da presente pesquisa, foi utilizada uma base de dados fornecida por Furnas, a qual contém informações sobre diversos ensaios, mapas, registros fotográficos, perfis de sondagens, entre outros.

1.1 RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Muitas obras brasileiras estão sendo apoiadas e escavadas em maciços rochosos onde o efeito do intemperismo é relevante, particularmente as obras hidrelétricas. Isto ocorre principalmente por duas razões. Primeiramente, pelo fato da obra ser apoiada comumente no leito do rio, o que indica que o maciço já deve estar afetado por processos de intemperismo gerados pela formação do curso d'água.

A outra razão é dada pela tendência atual dos projetos hidrelétricos em priorizar os aspectos hidrológicos, topográficos e ambientais para estabelecer a localização deste tipo de obras. Os aspectos geológicos e geotécnicos passaram a um segundo plano, o que provoca que estas obras estejam apoiadas sobre maciços pouco competentes, onde o efeito do intemperismo é marcante nas propriedades do maciço.

A expectativa é que a engenharia possa criar soluções para implantar este tipo de obras independentemente das condições geológicas e geotécnicas, e que, ao mesmo tempo, o projeto seja economicamente viável.

Portanto, as incertezas e as dificuldades associadas à definição das propriedades mecânicas e à modelagem do maciço rochoso intemperizado geram um impacto significativo nos projetos de escavação e de fundação em rocha. Tais impactos podem ser entendidos como problemas de previsão de comportamento, superdimensionamento das obras e, finalmente, prejuízos econômicos. Assim é importante aplicar metodologias para estimar as propriedades tendo em conta a variável intemperismo.

Apesar dos avanços nos modelos constitutivos dos materiais e nas técnicas computacionais na utilização dos métodos numéricos para a previsão de comportamento das obras, estas aplicações encontram-se ainda limitadas para maciços rochosos intemperizados se o projetista carece de parâmetros geomecânicos (resistência e deformabilidade) representativos.

Assim, é importante dizer que existem na literatura diversas propostas para definir parâmetros geomecânicos do maciço rochoso. Dentre as mais aceitas no meio técnico, encontra-se a metodologia *GSI* de Hoek. Porém, é necessário verificar se tais estimativas chegam perto da realidade quando este método é aplicado em maciços rochosos intemperizados.

Portanto, é importante estudar as mudanças das propriedades da rocha conforme o avanço do grau de intemperismo, verificar se a metodologia *GSI* de Hoek oferece boas estimativas da

resistência em maciços rochosos intemperizados e caso contrário, tentar calibrar os dados de entrada da metodologia para que esta gere estimativas mais realistas.

1.2 OBJETIVOS

Estabelecer e executar uma metodologia que permita caracterizar adequadamente as propriedades dos maciços rochosos intemperizados e verificar se a metodologia *GSI* de Hoek pode ser aplicada de forma convencional. Caso contrário, devem-se estabelecer critérios que permitam adequar este método para estimar de forma mais realista os parâmetros geomecânicos deste tipo de maciço. Para tanto, são abordados quatro assuntos principais:

- O efeito do intemperismo nas propriedades do maciço rochoso;
- A comparação entre os parâmetros do maciço estimados pela metodologia *GSI* de Hoek e os parâmetros do maciço obtidos de ensaios em blocos de grandes dimensões;
- A calibração das variáveis de entrada da metodologia *GSI* de Hoek para estimar as propriedades geomecânicas do maciço intemperizado;
- Definir diretrizes gerais para abordar o problema da caracterização em maciços rochosos intemperizados.

1.3 ESTRUTURA DA METODOLOGIA DA PESQUISA

A pesquisa foi desenvolvida por meio de uma sequência de atividades divididas em três etapas.

Durante a primeira etapa, foi realizada uma revisão bibliográfica geral, a qual incluiu a revisão dos projetos básico e executivo do caso de estudo e os relatórios feitos por comissões de consultores. Também foi feita uma revisão bibliográfica dos métodos para caracterizar e classificar maciços rochosos, da metodologia *GSI* para obter os parâmetros geomecânicos e ainda uma revisão sobre intemperismo e sua influência nas propriedades do maciço rochoso.

Depois foram aproveitados os ensaios feitos na rocha intacta para caracterizar as três litologias predominantes - filito, filito grafitoso e quartzito - visando observar as mudanças das propriedades segundo o grau de intemperismo. O grau de intemperismo na rocha intacta foi definido em função do grau de alteração e da coerência.

Na segunda etapa, foram estabelecidos os parâmetros de entrada da metodologia *GSI* de Hoek

(GSI , m_i , σ_{ci} , D e E_i), para, finalmente, obterem-se as estimativas das propriedades geomecânicas do maciço rochoso usando o programa RocLab.

Posteriormente foram comparados os parâmetros de resistência do maciço rochoso obtidos por meio de ensaios de resistência ao cisalhamento em grandes blocos (ensaio referência) com os parâmetros de resistência estimados pela metodologia GSI de Hoek.

Considerando as diferenças, ajustaram-se os valores de entrada da metodologia GSI , para que os parâmetros de resistência do maciço estimados por este critério sejam mais próximos dos valores encontrados pelos ensaios de grande porte.

A terceira etapa da pesquisa consiste em esboçar diretrizes gerais para abordar o problema da caracterização em maciços rochosos intemperizados e apresentar as conclusões da pesquisa. Na Figura 1.1, as três etapas citadas são apresentadas por meio de um organograma.

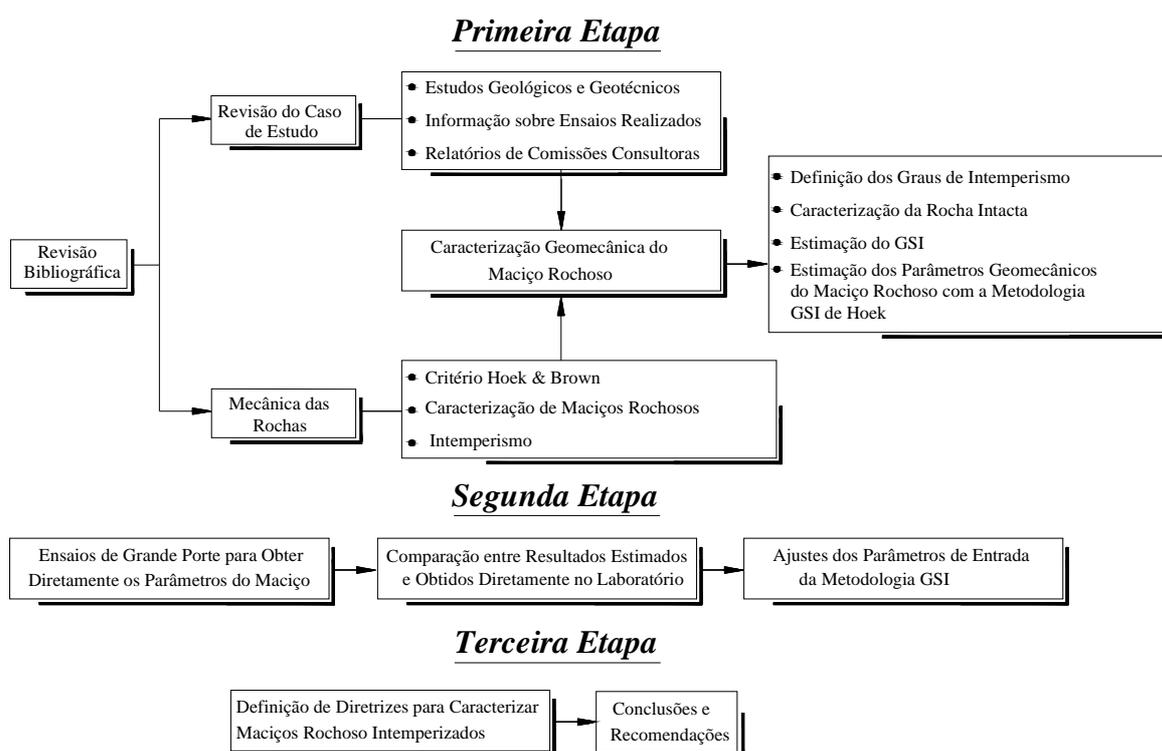


Figura 1.1 - Etapas das atividades realizadas na pesquisa.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está estruturada em sete capítulos, cujo conteúdo é descrito sucintamente a seguir:

O *Capítulo 1* apresenta de forma geral a dissertação, indicando os aspectos técnicos e

motivacionais que dão relevância à pesquisa. Além disso, apresentam-se os objetivos propostos e a metodologia de trabalho.

No *Capítulo 2*, são apresentados os aspectos relevantes para caracterizar a rocha intacta, as descontinuidades e o maciço rochoso.

No *Capítulo 3*, descrevem-se alguns métodos e critérios para estimar a resistência da rocha intacta, das descontinuidades e do maciço rochoso. Também são apresentados alguns métodos empíricos para estimar a deformabilidade do maciço rochoso.

No *Capítulo 4*, apresentam-se informações gerais do caso de estudo desta dissertação.

No *Capítulo 5*, descreve-se de forma detalhada a metodologia empregada e os resultados obtidos.

No *Capítulo 6*, são apresentadas diretrizes ou sugestões para caracterizar maciços rochosos intemperizados.

No *Capítulo 7*, são apresentadas as conclusões dos resultados da pesquisa e sugestões para futuras pesquisas neste tema.

Caracterização de Maciços Rochosos

A rocha, como o solo, se distingue dos demais materiais de engenharia por sua formação dada por distintos processos naturais, o que normalmente resulta em um material altamente variável em relação a suas diversas propriedades. Por isso, o processo de projetar neste material é realmente diferenciado (Assis, 2003).

Em virtude disso, os projetos apoiados ou escavados em rocha devem considerar diversas variáveis, tais como a geologia local, as propriedades da matriz rochosa e das descontinuidades, o estado de tensões *in situ* e induzidas pela obra, a escala relativa entre a obra e as descontinuidades e o grau de alteração do maciço devido ao intemperismo, condição hidráulica, entre outros.

Neste capítulo, são apresentados os conceitos e os procedimentos para caracterizar um maciço rochoso. Inicialmente, são explicados os conceitos de rocha intacta, descontinuidade e maciço rochoso e finalmente são descritos os parâmetros e metodologias que são usadas comumente para caracterizar os mesmos.

2.1 ROCHA INTACTA, DESCONTINUIDADES E MACIÇO ROCHOSO

No que concerne o estudo das propriedades do maciço rochoso, tem-se que a maioria deles é fraturada e o que determina o tipo de propriedade que controla o comportamento da estrutura é a escala relativa entre a obra e as descontinuidades.

De acordo com a relação existente entre as dimensões da obra, o espaçamento das descontinuidades e o tamanho dos blocos do maciço, serão predominantes, em alguns casos, as propriedades da rocha intacta, em outros, as propriedades das descontinuidades e, por fim, as propriedades do maciço rochoso como um todo.

Cada uma destas faixas de comportamento apresenta diferentes propriedades, critérios e

modos de ruptura. Por isso, é importante descrever cada uma delas de forma individual.

A rocha intacta é definida em engenharia como a rocha que não apresenta descontinuidades significativas, apesar de existirem pequenas fraturas e ter sofrido processos de intemperismo (sem chegar a ser degradada a solo). Cada tipo de rocha apresenta um tipo de textura e de estrutura. Isso se refere ao aspecto e ao arranjo microscópico dos minerais, respectivamente, e são definidas pelo tamanho e pela orientação dos grãos minerais e dos vazios.

Na mecânica das rochas, o comportamento da rocha intacta tem sido mais estudado que qualquer outra característica do maciço rochoso. Isto ocorre principalmente devido aos estudos teóricos antecedentes da mecânica dos sólidos e pelo fato de se realizar com relativa facilidade amostragem de boa qualidade (por meio de sondagens rotativas ou por extração de blocos). Assim, diversas características da rocha intacta podem ser obtidas por meio de ensaios em laboratório (Hudson & Harrison, 1997).

Já as descontinuidades definem qualquer feição geológica que determina planos ou superfícies de fraqueza que interrompem a continuidade mecânica padrão do maciço. O termo engloba juntas, superfícies de foliação, planos de acamamento, fraturas, falhas, entre outros. A ISRM (2007) define a descontinuidade como aquela superfície que possui pouca ou nula resistência à tração. O estudo das descontinuidades mostra-se de importância fundamental, pois estas estruturas condicionam de maneira muito forte o comportamento dos maciços rochosos, particularmente em relação à deformabilidade, à resistência e à permeabilidade, podendo controlar em um determinado contexto toda a estabilidade do maciço rochoso (ABGE, 1998).

Finalmente, o maciço rochoso, do ponto de vista do seu aproveitamento em engenharia civil, é um conjunto de blocos de rocha justapostos e articulados. O material que forma os blocos constitui a matriz do maciço rochoso, também denominada rocha intacta e as superfícies que os delimitam, as descontinuidades. O estudo da resistência do maciço rochoso é feito normalmente por meio de métodos empíricos e das classificações geomecânicas, obtendo os parâmetros de forma indireta. Isso acontece porque os ensaios representativos do maciço rochoso podem acarretar grandes dificuldades técnicas e econômicas, tanto para obter amostras representativas do maciço e para encontrar equipamentos para fazer os ensaios.

Um exemplo do citado anteriormente é: dado um conjunto de descontinuidades em um maciço rochoso, a perfuração de um furo poderá afetar somente a rocha intacta; já um túnel de pequeno diâmetro poderá ter seu comportamento dominado por uma ou duas

descontinuidades; por fim, uma caverna ou um túnel de grandes dimensões poderão ter seu comportamento afetado por um grande número de descontinuidades, ou seja, um maciço que pode ser considerado como isotrópico e cujas propriedades podem ser obtidas supondo que o maciço vai se comportar como um meio contínuo equivalente (Hoek & Brown, 1980b).

A Figura 2.1 ilustra o exemplo anterior, por meio de um diagrama que mostra a transição do comportamento de rocha intacta a maciço rochoso.

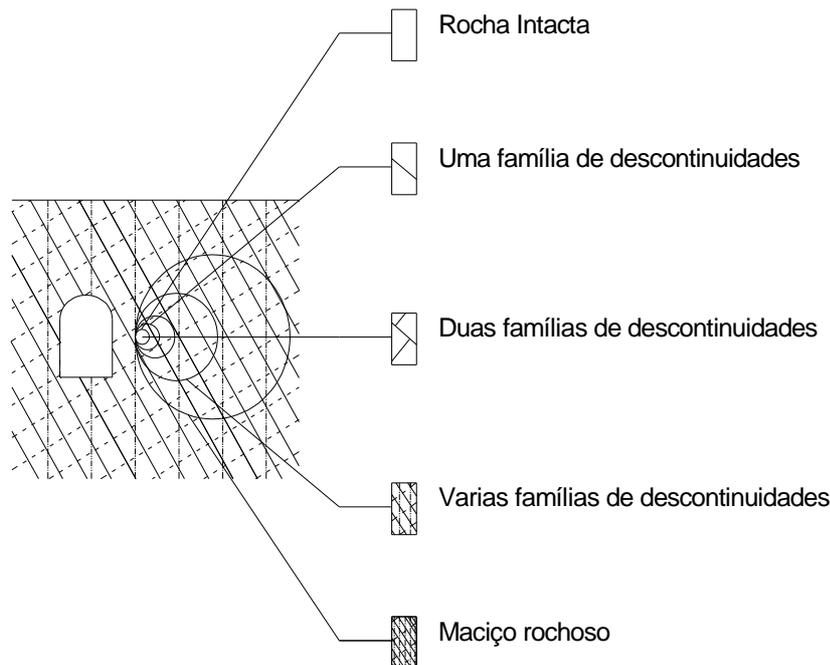


Figura 2.1 - Transição do comportamento de rocha intacta a maciço rochoso, em função do tamanho do túnel e das descontinuidades (modificado - Hoek & Brown, 1997).

Analogamente, na Figura 2.2 mostra-se que, um talude pode ter seu comportamento e seu modo de ruptura condicionados em função da sua geometria e da distribuição espacial das descontinuidades da seguinte forma:

- Se o talude não tiver descontinuidades significativas, o comportamento é controlado pelas propriedades da rocha intacta. Se o maciço for homogêneo e isotrópico, a superfície de ruptura aproximar-se-ia à geometria circular;
- Dada a existência de uma descontinuidade e considerando sua orientação espacial relativa em relação ao talude, a estabilidade do talude pode estar condicionada pelo mecanismo de ruptura planar ou por tombamento;
- Já se existem duas descontinuidades se interceptando e formando uma cunha, a estabilidade do talude vai estar condicionada pela cunha;

- Finalmente, se existe um grande número de descontinuidades orientadas aleatoriamente, a obra seria condicionada pelas propriedades do maciço rochoso fraturado considerado, então, isotrópico e a superfície de ruptura é considerada circular.

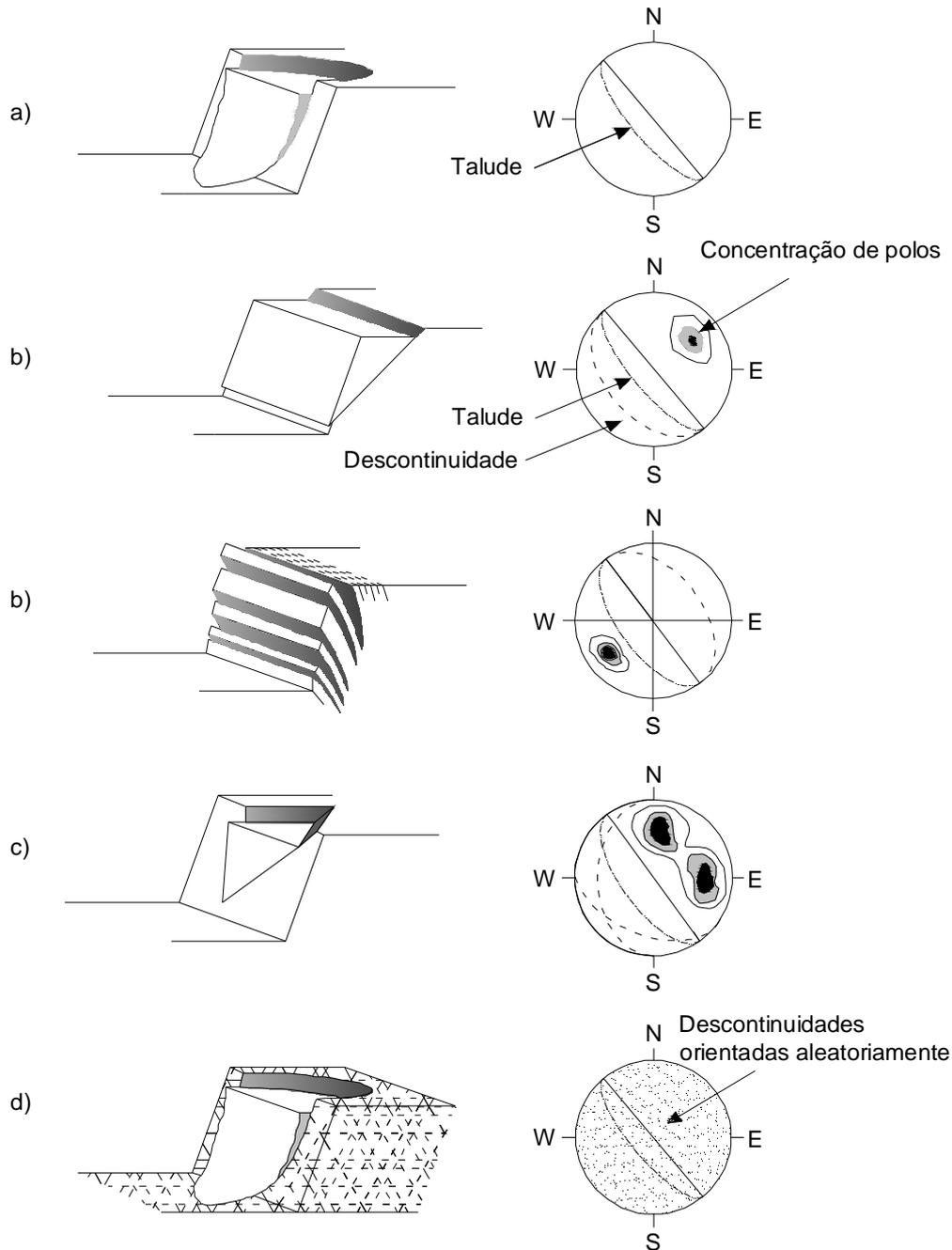


Figura 2.2 - Transição do modo de ruptura de um talude quando suas propriedades são governadas por: a) rocha intacta, b) uma descontinuidade, c) duas descontinuidades, d) maciço rochoso (modificado - Hoek & Bray, 1981).

2.2 CARACTERIZAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

Entende-se por caracterização a colocação em evidência dos atributos relevantes do meio

rochoso que, isolada ou conjuntamente, condicionam o seu comportamento ante as solicitações impostas por uma dada obra.

Portanto, a caracterização do maciço rochoso deve fornecer ferramentas e informações ao engenheiro para modelar e estimar o comportamento do maciço rochoso diante as solicitações de uma determinada obra de engenharia, para, finalmente, propor soluções de projeto para a obra.

Para caracterizar um maciço rochoso, alguns aspectos básicos devem ser abordados independentemente do tipo de obra. Estes aspectos são: o estudo das condições geológicas regionais e locais, a caracterização da rocha intacta e a caracterização das descontinuidades.

Cabe dizer que os aspectos tais como a resistência e deformabilidade de maciços rochosos são revisados no Capítulo 3.

2.3 CONDIÇÕES GEOLÓGICAS REGIONAIS E LOCAIS

A investigação da geologia regional permite entender e explicar as condições da geologia local. O estudo da geologia regional compreende a história geológica, a história tectônica e a orogênese.

A história geológica permite conhecer a origem das rochas, as unidades litológicas predominantes e a estratigrafia. A história tectônica serve para estabelecer as formações, estruturas principais e as tensões naturais. Já o conhecimento da orogênese permite entender os processos e os movimentos que deram lugar ao relevo terrestre da região (Durand, 1995). Estes estudos podem ser feitos apoiando-se em visitas de campo e em informações secundárias, tais como mapas topográficos e geológicos, estudos e projetos da região, fotografias aéreas, entre outros.

Assim, o entendimento dos processos geológicos regionais vai permitir a compreensão da geologia estrutural e sua variabilidade no maciço rochoso, o que é muito valioso para definir antecipadamente possíveis mecanismos de ruptura e eventuais abordagens para tratar o problema.

A investigação da geologia local inicia-se depois da interpretação e o entendimento da informação fornecida pela geologia regional.

Nesta etapa, detalham-se as informações das principais feições estruturais; verificam-se a ocorrência dos afloramentos rochosos, dos grupos litológicos e da estratigrafia; as áreas de alteração e a posição do lençol freático. Para o desenvolvimento deste trabalho, são realizadas visitas em campo e são definidos locais representativos para serem amostrados e sondados. Estas informações são registradas nos perfis das sondagens, nos planos e nas seções topográficas.

2.4 CARACTERIZAÇÃO DA MATRIZ ROCHOSA

O termo matriz rochosa pode ser mais apropriado que rocha intacta, uma vez que a rocha pode estar afetada por processos de intemperismo e, eventualmente, ter pequenas fissuras e vazios. Para fins práticos de engenharia, a rocha intacta ou matriz rochosa é considerada um meio contínuo.

A matriz rochosa apresenta um número de características, propriedades físicas e mecânicas que refletem a fábrica (estrutura e textura) e o comportamento mecânico do material. Estas características e propriedades podem ser determinadas por meio de diversos procedimentos em laboratório ou em campo.

É importante, então, conhecer os aspectos que influenciam o comportamento da rocha com a finalidade de subsidiar diversas decisões de engenharia que visam à definição do projeto localizado em um maciço rochoso. Neste sentido, são importantes três aspectos: a identificação, as propriedades índice e o grau de intemperismo da rocha.

2.4.1 IDENTIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO DA ROCHA

A rocha é um corpo sólido natural, resultante de um processo geológico determinado, formado por agregados de um ou mais minerais, arrançados segundo as condições de temperatura e pressão existentes durante sua formação (ABGE, 1998). Segundo o tipo de processo geológico formador da rocha, pode-se ter como resultado rochas de diferentes tipos e características. Assim, é fundamental identificar, classificar e descrever as rochas que predominam no maciço.

A classificação geológica baseada na genética ou litologia da rocha é de grande importância na engenharia, visto que, segundo o tipo de rocha, podem-se esperar determinadas características. Esta informação serve também para avaliar a representatividade das

propriedades físico-mecânicas do meio rochoso e, finalmente, extrapolar os resultados de ensaios pontuais para o maciço como um todo.

As rochas, de acordo com seu processo de formação, podem ser classificadas em três grandes grupos: ígneas, sedimentares e metamórficas, cada qual com características diferenciadas. A determinação da genética das rochas é feita por meio de análises observacionais em campo, do estudo da composição mineralógica, da textura, da estrutura, da cor e de outras propriedades.

As rochas ígneas, ou magmáticas, resultam da solidificação de material rochoso, parcial ou totalmente fundido, denominado magma, gerado no interior da crosta terrestre. As rochas ígneas são as que apresentam, em geral, melhor comportamento geomecânico e são mais utilizadas na construção civil no Brasil (ABGE, 1998). Dependendo do local de formação, distinguem-se dois tipos de rocha ígnea. Se a rocha for formada em profundidade, no interior da crosta terrestre, a rocha é chamada plutônica ou se for formada na superfície da terra, a rocha é chamada vulcânica.

As rochas sedimentares são resultantes da consolidação de sedimentos, ou seja, partículas minerais provenientes da desagregação e do transporte de rochas preexistentes, da precipitação química ou, ainda, da ação biogênica. Os folhelhos, os arenitos e os calcários constituem perto de 95% das rochas sedimentares. Estas rochas são conhecidas, em geologia de engenharia, como rochas brandas, pois, em geral, apresentam uma baixa resistência mecânica e, muitas vezes, são friáveis ou não coerentes (rocha que desagrega facilmente) devido à baixa coesão dos minerais constituintes. A estrutura primária mais típica é o acamamento (ou estratificação), que representa o arranjo destas rochas em diferentes camadas. Isso confere às rochas sedimentares uma condição de anisotropia em diversas propriedades ante as solicitações.

As rochas metamórficas são derivadas de outras preexistentes que, em resposta às alterações das condições físicas (pressão e temperatura) e químicas, sofrem mudanças mineralógicas, químicas e estruturais. Estas mudanças na rocha constituem o metamorfismo e as rochas produzidas como resultado dessas mudanças são chamadas de rochas metamórficas. Os processos metamórficos podem gerar diversos tipos de estruturas. Entre as mais comuns, encontram-se as estruturas maciças, foliações e lineações.

A estrutura maciça apresenta um aspecto compacto, homogêneo e com ausência de minerais

com orientação planar. As foliações representam estruturas planares resultantes do achatamento dos minerais constituintes, este termo engloba as xistosidades. A xistosidade é o arranjo planar de minerais micáceos em xistos, filitos e outras rochas. A Figura 2.3 mostra a foliação de um filito.



Figura 2.3 - Direção da foliação de um filito.

As lineações englobam qualquer estrutura linear na rocha, como minerais alongados segundo as direções de cisalhamento e outros. Este termo é quase sempre utilizado para se referir a estruturas lineares que não encaixam como foliações.

A determinação dos tipos de minerais que compõem a rocha, seu arranjo, seu tamanho e a proporção de cada mineral constituem a base para identificar e classificar geologicamente a rocha. Dois procedimentos são comumente utilizados para este propósito, a descrição petrográfica e a difração de raios X.

2.4.1.1 DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA

A descrição petrográfica da rocha, para fins de engenharia, inclui a determinação de informação que não pode ser obtida por meio de avaliações macroscópicas de uma amostra de rocha, tal como quantificação dos minerais constituintes, tamanho dos grãos e textura (ISRM, 2007).

Os minerais característicos e necessários para a classificação petrográfica são denominados essenciais e aqueles que são observados em menor quantidade, cuja presença não seja determinante para sua classificação, são chamados acessórios. Na rocha sã, estes minerais são considerados primários.

Outro ponto importante da descrição petrográfica se fundamenta na necessidade de conhecer os minerais de alteração, ou secundários, gerados a partir da modificação dos minerais primários, principalmente por processos de intemperismo. As mudanças mineralógicas são geradas por processos químicos nas rochas quando expostas às condições reinantes na superfície da terra.

As análises petrográficas são realizadas mediante o exame de seções delgadas de rochas em microscópios polarizadores, onde a determinação dos minerais presentes na lâmina delgada deve ser feita por um petrógrafo treinado. O procedimento para realizar o ensaio está registrado na ISRM (2007).

A informação fornecida pelas análises petrográficas servem para subsidiar diversas decisões em engenharia, tais como (ABGE, 1998):

- Classificação da rocha;
- Determinação da estabilidade química e física da rocha ante as condições de uso em que serão empregadas, por exemplo, as rochas de enrocamento, que serão submetidas a ciclos de saturação e secagem devido à variação do nível do reservatório;
- Detectar minerais deletérios, ou seja, minerais que podem provocar efeitos negativos quando aplicados no concreto, por exemplo, o mineral opala pode reagir com os álcalis do concreto.

2.4.1.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Esta é considerada a técnica mais rápida e precisa para a determinação da composição mineralógica de rochas e solos e é utilizada desde 1930 (Resende *et al.*, 2005).

A técnica de difratometria de raios X consiste em determinar as distâncias mantidas pelos planos atômicos formadores dos cristais (distâncias interplanares), por meio do conhecimento do ângulo formado pelo feixe de raios X incidente e o plano atômico que o difrata e do comprimento de onda desses raios. Estes ensaios são executados por meio de equipamentos especializados e os resultados destas análises são apresentados em forma de gráficos denominados difratogramas e, a partir desses, os minerais são identificados.

Um difratograma é uma resposta dos planos atômicos dos minerais à radiação de raios X. O gráfico de um difratograma representa a intensidade dos raios X refletidos nos planos atômicos dos minerais *versus* seu correspondente ângulo de incidência de radiação. Assim,

segundo Resende *et al.* (2005) os minerais são identificados pela distância interplanar (impressão digital dos minerais), a qual se pode calcular por meio da lei de Bragg, $n\lambda = 2d \cdot \text{sen}(\theta)$, onde n é um número inteiro, λ é o comprimento da onda de radiação (Å), d é o espaçamento interplanar (Å), e, θ é o ângulo de incidência de radiação (radianos).

Estas análises são feitas separando diferentes frações granulométricas. Normalmente, divide-se a análise entre a fração maior e menor à argilosa. A preparação da amostra de fração maior à argilosa é feita por meio de sua trituração e colocando o material não orientado sobre lâminas para sua posterior análise. Já a preparação da amostra de fração menor à argilosa é realizada por meio de um ensaio de sedimentação, onde é separada a fração argila decantada.

O ensaio de difratometria de raios X se realiza normalmente em três condições diferentes: uma análise natural (material seco ao ar), uma análise glicolada (saturação da amostra com etileno-glicol), para identificar argilominerais expansivos e uma análise calcinada, para indicar a presença de minerais que passam por retração de sua estrutura nestas condições (caulinita, gíbsita, goethita, entre outros).

2.4.2 PROPRIEDADES ÍNDICE DA ROCHA

Segundo Goodman (1989), as propriedades índice das rochas são propriedades básicas, que revelam informação sobre a fábrica, a composição e o comportamento da rocha. As propriedades índice se caracterizam por serem obtidas de ensaios relativamente simples, pelo significado físico das propriedades, que facilita a interpretação dos resultados e pela possibilidade de obter correlações com diferentes propriedades do material.

Algumas das propriedades índice mais relevantes são: conteúdo de umidade, peso específico, porosidade, velocidade de propagação de ondas, durabilidade, absorção d'água, resistência à compressão simples e à tração.

As propriedades índice de forma isolada podem ajudar a classificar a rocha para aplicações relacionadas ao comportamento da rocha intacta (matriz rochosa), mas não do maciço rochoso como um todo.

Assis (2003) cita alguns exemplos da utilização isolada destas propriedades em aplicações diretamente associadas à rocha intacta:

- Operação de perfuração e corte;
- Seleção de agregados para concreto;
- Avaliação de rip-rap (barragens).

Assim, as propriedades citadas anteriormente são descritas em seguida.

2.4.2.1 TEOR DE UMIDADE

O teor de umidade em uma amostra de rocha é expresso como uma porcentagem da massa seca da amostra. O processo de obtenção da umidade na rocha é similar à determinação da umidade no solo, e este é registrado na ISRM (2007).

O procedimento geral consiste em obter amostras de campo com uma massa mínima de 50 g, as quais devem ser guardadas em recipientes hermeticamente fechados (ex. saco de plástico) para não perder umidade. Já em laboratório, deve-se determinar a massa úmida das amostras, M_w , para depois serem levadas à estufa a temperatura constante de 105° C em um período mínimo de 24 h e determinar a massa seca das amostras, M_d . Alternativamente M_d pode ser obtido secando a rocha empregando sílica gel, este método é recomendado para evitar possíveis mudanças mineralógicas com a temperatura. Com isso, a umidade é calculada como:

$$w = \frac{M_w}{M_d} \times 100 \quad (2.1)$$

Onde: w é o teor de água na rocha em porcentagem (%); M_w é a massa de água contida na amostra (kg); M_d é a massa seca da amostra (kg).

2.4.2.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA

Esta propriedade mede a quantidade de água que pode armazenar uma amostra de rocha seca depois de um período de uma hora de imersão, e é expressa como a porcentagem da massa seca da amostra. O processo de obtenção da absorção está registrado na ISRM (2007) e é dado por:

$$\alpha_a = \frac{M_{sat} - M_d}{M_d} \times 100 \quad (2.2)$$

Onde: α_a é a absorção aparente de água da rocha (%); M_{sat} é a massa de água da amostra depois de saturar por uma hora (kg).

O procedimento geral consiste em saturar a amostra (de, no mínimo, 50 g) em água livre de gás e aplicar um vácuo por uma hora minimamente para obter sua massa saturada, M_{sat} . Dependendo do tipo de rocha nem sempre é possível obter na saturação neste período.

Posteriormente, a amostra é seca na estufa a 105°C por 24 h para estimar a massa seca, M_d . Recomenda-se aplicar este método em rochas que não desintegram significativamente durante a saturação.

2.4.2.3 PESO ESPECÍFICO, DENSIDADE E DENSIDADE RELATIVA

O peso específico ou volumétrico é dado pela relação entre o peso da amostra e seu volume e fornece uma idéia dos minerais constituintes da rocha. O peso específico é calculado como segue:

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (2.3)$$

Onde: γ é o peso específico da rocha (kN/m³); W é o peso total da amostra (kN); V é o volume total da amostra (m³).

O valor deste índice depende do grau de intemperismo da rocha, da profundidade da rocha e do grau de umidade da amostra, podendo-se associar com o estado saturado, úmido, natural e seco. Portanto, atendendo à variabilidade da quantidade de água dentro da rocha, considera-se o peso específico aparente seco um parâmetro mais representativo, que pode ser obtido como:

$$\gamma_d = \frac{W_d}{V} = \frac{M_d \cdot g}{V} \quad (2.4)$$

Onde: γ_d é o peso específico aparente seco da rocha (kN/m³); W_d é o peso seco da amostra (kN); V é o volume total da amostra (m³); g é o valor da aceleração da gravidade ($\approx 9,8 \text{ m/s}^2$).

A ISRM (2007) compila diferentes métodos para obter o peso específico aparente seco da rocha, onde cada método é aplicado segundo a geometria e as características da amostra. De forma geral, a massa seca, M_d , é obtida pesando as amostras depois de serem secas na estufa. O que varia em tais métodos é a forma de obter o volume total do corpo de prova, V , o qual vai depender se a amostra apresenta geometria regular ou irregular e das características da rocha. Portanto, o volume da amostra, V , pode ser calculado como segue:

- Usando instrumentos de medição, tais como o paquímetro. Este método é recomendado

para amostras com uma geometria regular (por exemplo, amostras cilíndricas ou cúbicas);

- Usando a técnica do deslocamento do volume de mercúrio ou de água. Este método é recomendado para amostras com uma geometria irregular ou regular;
- Usando o princípio de Arquimedes, estabelecendo a diferença entre a massa saturada e submersa da amostra, o volume pode ser obtido como:

$$V = \frac{M_{sat} - M_{sub}}{\rho_w} \quad (2.5)$$

Onde: M_{sat} é a massa saturada da amostra (kg); M_{sub} é a massa submersa da amostra (kg); ρ_w é a densidade da água ($\approx 1000 \text{ kg/m}^3$).

Este método pode ser aplicado em amostras com geometria regular e irregular, porém é recomendado em rochas que não desagregam em contato com a água e que não são expansíveis.

A densidade da rocha é dada pela relação entre a massa do corpo de prova e seu volume, sendo possível relacionar a densidade seca e o peso específico aparente seco da seguinte forma:

$$\rho_d = \frac{\gamma_d}{g} \quad (2.6)$$

Onde: ρ_d é a densidade seca da amostra (kg/m^3); g é a aceleração da gravidade (m/s^2); γ_d peso específico aparente seco da amostra (kN/m^3).

A densidade relativa da rocha é a relação entre a densidade dos sólidos da rocha e a densidade da água (Goodman, 1989).

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} = \frac{M_s}{V_s \rho_w} \quad (2.7)$$

Onde: G_s é a densidade relativa ou gravidade específica da rocha (adimensional); ρ_s é a densidade dos sólidos do material (kg/m^3); ρ_w é a densidade da água (kg/m^3); M_s é a massa dos sólidos; V_s é o volume dos sólidos.

A gravidade específica da rocha pode ser obtida pelos seguintes métodos (Assis, 2003; Goodman, 1989):

- Por meio do exame de lâmina delgada feito no microscópio polarizador ou petrográfico, identificando a constituição mineralógica da rocha e quantificando a proporção de volume que o mineral ocupa em relação ao volume total da amostra. Neste caso, a densidade relativa seca, G_s , é calculada assim:

$$G_s = \sum_{i=1}^n G_{si} V_i \quad (2.8)$$

- Onde: G_s é a densidade relativa seca da rocha (adimensional); G_{si} é a densidade relativa do mineral constituinte i (valores obtidos de tabelas); V_i é a porcentagem do volume do mineral i ocupado no volume total da lâmina delgada; n é o número de minerais.
- De modo semelhante ao ensaio de densidade relativa de grãos em solo, por meio da trituração da amostra de rocha e da determinação da densidade do material moído em picnômetro de volume constante.

2.4.2.4 POROSIDADE E ÍNDICE DE VAZIOS

A porosidade expressa a proporção relativa entre o volume de vazios no volume total da rocha. Os vazios são constituídos pelos poros e pelas fissuras presentes na rocha. Do ponto de vista mecânico, um pequeno aumento na fração de volume de vazios pode produzir efeitos mecânicos apreciáveis na rocha, tais como a redução da resistência e o aumento da deformabilidade (ISRM, 2007). A porosidade é expressa em porcentagem, como:

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 \quad (2.9)$$

Onde: n é a porosidade (%); V_v é o volume de vazios da amostra (m^3); V é o volume total da amostra (m^3).

Os valores da porosidade variam para cada tipo de rocha, mesmo que pertençam ao mesmo grupo genético. Normalmente, a maior parte das rochas ígneas apresenta uma porosidade menor que 2% (para rocha sã), porém, a rocha pome apresenta uma alta porosidade devido ao armazenamento de bolhas de gás vulcânico (Goodman, 1989). Assim, a porosidade pode variar para um mesmo tipo de rocha segundo sua profundidade, sua idade geológica e seu grau de intemperismo.

A ISRM (2007) compila diversos métodos e descreve os procedimentos para a determinação da porosidade, onde a aplicação de cada método vai depender das características da rocha e da geometria do corpo de prova. Dependendo dos métodos utilizados, a porosidade pode ser definida como total ou aparente, ou seja, a porosidade total considera o volume de vazios acessível à passagem de fluidos e o volume dos poros fechados, já a porosidade aparente não considera o volume dos poros interligados.

Entre os métodos mais comuns para obter a porosidade, encontram-se (ISRM, 2007):

- A partir da Equação 2.9, onde o volume V da amostra é determinado utilizando os métodos citados anteriormente e o volume de vazios V_v é calculado da seguinte forma:

$$V_v = \frac{M_{sat} - M_d}{\rho_w} \quad (2.10)$$

- Recomenda-se aplicar este método em rochas que não expandem ou desintegram durante a saturação e a secagem.
- Por meio do exame de lâmina delgada, fazendo uma contagem dos poros por meio do microscópio polarizador. Para a visualização dos poros, a lâmina é impregnada com corantes. Porém, Assis (2003) destaca alguns inconvenientes desta técnica, tais como: a espessura reduzida da lâmina ressalta o volume dos grãos em detrimento dos espaços dos poros, dificultando a interpretação e o obscurecimento dos microporos da lâmina, os quais podem ser facilmente confundidos com outros componentes minerais da amostra.

O índice de vazios é definido como a relação entre o volume de vazios e o volume dos componentes sólidos da rocha. Esta propriedade pode ser relacionada com a porosidade da seguinte forma:

$$e = \frac{n}{100 - n} \quad (2.11)$$

Onde: e é o índice de vazios (adimensional); n é a porosidade (%).

2.4.2.5 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS

Esta propriedade índice quantifica a velocidade de propagação das ondas P (primária) e S (secundária) em um corpo de prova de rocha, por meio de ensaios não destrutivos, fornecendo informação sobre as características elásticas e o fissuramento da rocha. Este índice também é

utilizado para avaliar a integridade das amostras antes de fazer algum ensaio e para agrupar amostras de comportamento similar para análises estatísticas.

A ISRM (2007) compila diversos métodos visando calcular as velocidades de onda longitudinal ou primária (V_P) e da onda transversal ou secundária (V_S). Uma técnica muito utilizada é a passagem de ondas ultra-sônicas por meio de amostras cilíndricas de rocha utilizando equipamentos eletrônicos especializados.

O procedimento geral consiste em gerar ondas ultrassônicas (longitudinais para estimar V_P ou transversais para estimar V_S), transmitidas na rocha por meio de um transdutor piezolétrico (que transforma a onda elétrica em uma onda mecânica) localizado no topo da amostra. A onda atravessa a rocha até chegar ao transdutor de saída (que transforma a onda mecânica em onda elétrica), localizado na base da amostra.

Finalmente, um dispositivo mede o tempo de viagem da onda entre os dois transdutores piezolétricos e, desta forma, as velocidades das ondas P e S são calculadas com os dados da distância e do tempo de viagem da onda entre os transdutores. A ISRM (2007) recomenda realizar o ensaio sobre corpos de prova que apresentem uma geometria que permita que a distância percorrida pela onda seja pelo menos 10 vezes o tamanho do grão meio da rocha.

Teoricamente, a velocidade de propagação de onda na rocha está relacionada com as propriedades elásticas dos minerais constituintes e da densidade. Desta forma, se o equipamento é apto para gerar ondas longitudinais V_P e também transversais V_S , é possível estimar algumas características elásticas dinâmicas da matriz rochosa, tais como o módulo dinâmico de Young e de cisalhamento. Porém, os valores dos módulos dinâmicos são levemente maiores (10-30%) do que os valores de módulos obtidos de ensaios estáticos convencionais. Uma vez determinadas as velocidades de onda V_P e V_S , as características elásticas dinâmicas podem ser obtidas com as seguintes expressões (Zhao, 2008):

$$E_d = \rho V_P^2 \quad (2.12)$$

Onde: E_d é o módulo de Young dinâmico (N/m^2); ρ é a densidade (kg/m^3); V_P é a velocidade de onda longitudinal ou primária (m/s).

$$G_d = \rho V_S^2 \quad (2.13)$$

Onde: G_d é o módulo de cisalhamento dinâmico (N/m^2); V_S é a velocidade de onda transversal

ou secundária (m/s).

$$v_d = \frac{1 - 2(V_S/V_P)^2}{2(1 - (V_S/V_P)^2)} \quad (2.14)$$

Onde: v_d é o coeficiente de Poisson dinâmico (adimensional).

Fourmaintraux (1976) propõe determinar um índice que quantifica o grau de fissuramento na rocha, por meio de um ábaco que relaciona o índice IQ e a porosidade (n) com o grau de fissuramento da rocha (Figura 2.4).

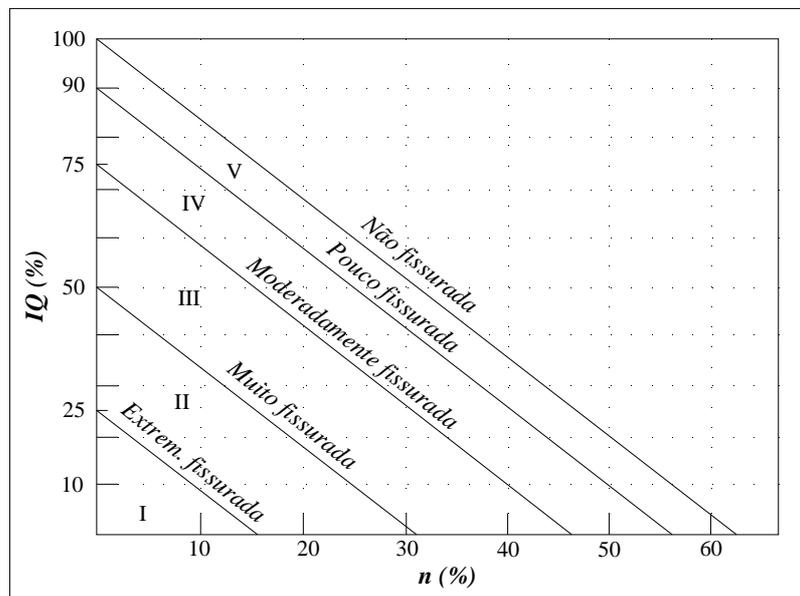


Figura 2.4 - Ábaco para qualificar o grau de fissuramento numa rocha (Fourmaintraux; 1976).

Sendo o índice IQ é determinado da seguinte maneira:

$$IQ = \frac{V_P}{V_P^*} \quad (2.15)$$

Onde: V_P é a velocidade de onda longitudinal medida numa amostra de rocha utilizando o aparelho ultrassônico; V_P^* é a velocidade longitudinal se a amostra de rocha não tivesse poros ou microfissuras.

Se a constituição mineralógica é conhecida, V_P^* é calculada considerando a ponderação da velocidade sônica de cada mineral constituinte da rocha.

$$\frac{1}{V_P^*} = \sum_i^n \frac{C_i}{V_{P_i}} \quad (2.16)$$

Onde: V_{P_i} é a velocidade longitudinal de cada mineral (obtido de tabelas); C_i é a proporção do mineral i .

2.4.2.6 ÍNDICE DE DURABILIDADE DA ROCHA

Mudanças nas propriedades e na integridade da rocha são dadas por diferentes mecanismos de alteração e de degradação, esses, associados a processos de intemperismo físico, químico e biológico. Apesar da complexidade dos diversos mecanismos da natureza para degradar rochas, podem-se estabelecer índices que dão uma idéia da durabilidade da rocha para algumas condições de serviço específicas.

O índice de durabilidade proposto por Franklin e Chandra (1972), conhecido também como *slake durability index* (I_d), atualmente é um índice bastante utilizado para determinar a durabilidade de rochas submetidas à ação mecânica e a ciclos de molhagem e secagem.

O procedimento geral para obter este índice consiste em colocar 10 fragmentos de rocha (com 50 g cada uma) dentro de redes metálicas cilíndricas com abertura de 2 mm, deixando os fragmentos parcialmente imersos. Depois, são aplicadas rotações a 20 revoluções por min. Depois de 10 min, o material retido é secado e pesado. Assim, o ciclo pode ser repetido de novo. Finalmente, o índice de durabilidade I_d corresponde à percentagem de rocha seca que fica retida nos tambores da rede metálica após 1 ou 2 ciclos completos, estimando I_{d1} e I_{d2} respectivamente.

$$I_d = \frac{\text{Peso seco depois de um ou dois ciclos}}{\text{Peso inicial da amostra}} \quad (2.17)$$

A Tabela 2.1 mostra a classificação da durabilidade da rocha baseada no índice I_d , proposta por Gamble (1971).

Tabela 2.1 - Classificação da durabilidade da rocha (Gamble, 1971).

Grupo	I_{d1}	I_{d2}
Durabilidade extrema	>99	>98
Durabilidade alta	98-99	95-98
Durabilidade médio-alta	95-98	85-95
Durabilidade média	85-95	60-85
Durabilidade baixa	60-85	30-60
Durabilidade muito baixa	<60	<30

2.4.2.7 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL

A resistência à compressão uniaxial (σ_c) é um parâmetro amplamente usado em diversas aplicações, tais como: na classificação geomecânica Q e RMR , no critério de ruptura de Hoek & Brown, na estimação da rugosidade das descontinuidades (Hoek & Bray, 1981) entre outros.

A resistência à compressão uniaxial é definida como a máxima tensão que suporta um corpo de prova cilíndrico cuja relação entre a altura e o diâmetro varie entre 2,5 e 3, quando submetido a um carregamento compressivo axial até sua ruptura. A resistência à compressão uniaxial é calculada dividindo a carga de ruptura pela área transversal inicial do corpo de prova.

$$\sigma_c = \frac{P}{A_0} \quad (2.18)$$

Onde: σ_c é a resistência à compressão uniaxial (kPa); P é a carga de ruptura (kN); A_0 é a área transversal inicial do corpo de prova (m²).

Quando o ensaio de compressão é feito com instrumentação das deformações transversais e axiais, pode-se obter informação sobre parâmetros elásticos como o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson. A Figura 2.5 mostra um gráfico típico que representa as curvas de deformação axial e diametral de um corpo de prova submetido a um carregamento uniaxial.

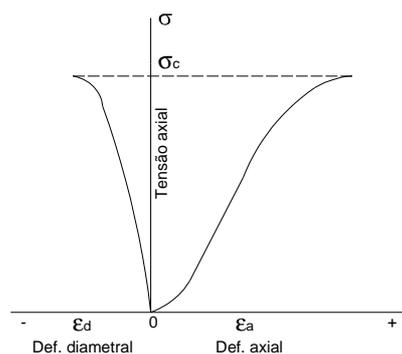


Figura 2.5 - Curvas de tensão- def. axial e tensão- def. diametral (modificado - ISRM, 2007).

Segundo a ISRM (2007) o módulo de elasticidade é definido como a declividade da curva Tensão *versus* Deformação axial e tem unidade de tensão. Este pode ser obtido por diferentes métodos aceitos na prática da engenharia:

- Módulo de elasticidade tangente, E_t , medido como a declividade de uma reta tangente a

um nível de tensão correspondente a uma percentagem da tensão última. Geralmente esta percentagem corresponde a 50%.

- Módulo de elasticidade médio, E_m , determinado a partir da declividade do trecho mais linear da curva tensão-deformação.
- Módulo de elasticidade secante, E_s , medido desde zero até um nível de tensão correspondente a uma percentagem da tensão última. Geralmente esta percentagem corresponde a 50%.

A Figura 2.6 exemplifica os três métodos para calcular o módulo de elasticidade.

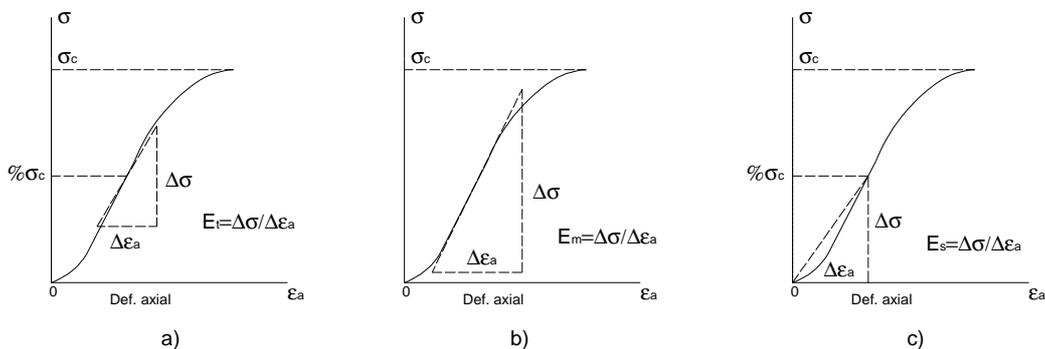


Figura 2.6 - Métodos para calcular o módulo de elasticidade, a) Módulo tangente, b) Módulo médio, c) Módulo secante (modificado - ISRM, 2007).

Já o coeficiente de Poisson, ν , para condições de carregamento uniaxial, é definido como a relação entre a deformação transversal e axial, e pode ser calculado como:

$$\nu = - \frac{\text{declividade da curva tensão - def. axial}}{\text{declividade da curva tensão - def. transversal}} \quad (2.19)$$

A declividade da curva tensão-deformação transversal é calculada com os mesmos métodos citados para calcular o módulo de elasticidade.

O ensaio de compressão uniaxial é de execução simples, porém, a preparação do corpo de prova é um processo complicado e custoso, o que pode tornar dispendiosa a execução de um número grande de ensaios. Porém, existem certos casos em que o comportamento tensão-deformação não necessita de ser estudado em detalhe, bastando o conhecimento aproximado do valor da resistência.

É, portanto, que, atualmente, é objeto de pesquisa o desenvolvimento de métodos expeditos para determinar indiretamente, de forma mais rápida e menos custosa, a resistência à compressão uniaxial. Entre os métodos mais reconhecidos, encontram-se o índice de

resistência à carga puntiforme e o índice de dureza do esclerômetro de Schmidt:

- *Índice de resistência à carga puntiforme*

O ensaio desenvolvido por Broch & Franklin (1972) fornece o índice de resistência à carga puntiforme da rocha (I_s), o qual é utilizado como parâmetro de entrada para diversas aplicações, tais como em classificações geomecânicas e na estimativa da resistência à compressão uniaxial. O equipamento é portátil para seu uso em campo e os ensaios podem ser executados de forma rápida e sem custos adicionais sobre amostras regulares e irregulares de rocha (Hidalgo, 2002).

No ensaio de compressão puntiforme, a rocha é carregada pontualmente por meio de dois cones metálicos e a ruptura é provocada pelo desenvolvimento de fraturas paralelas ao eixo de carregamento. A ISRM (2007) sugere os métodos de execução e cálculo do ensaio, os métodos vão depender da geometria do corpo de prova, e se o carregamento é feito diametral ou axialmente (Figura 2.7).

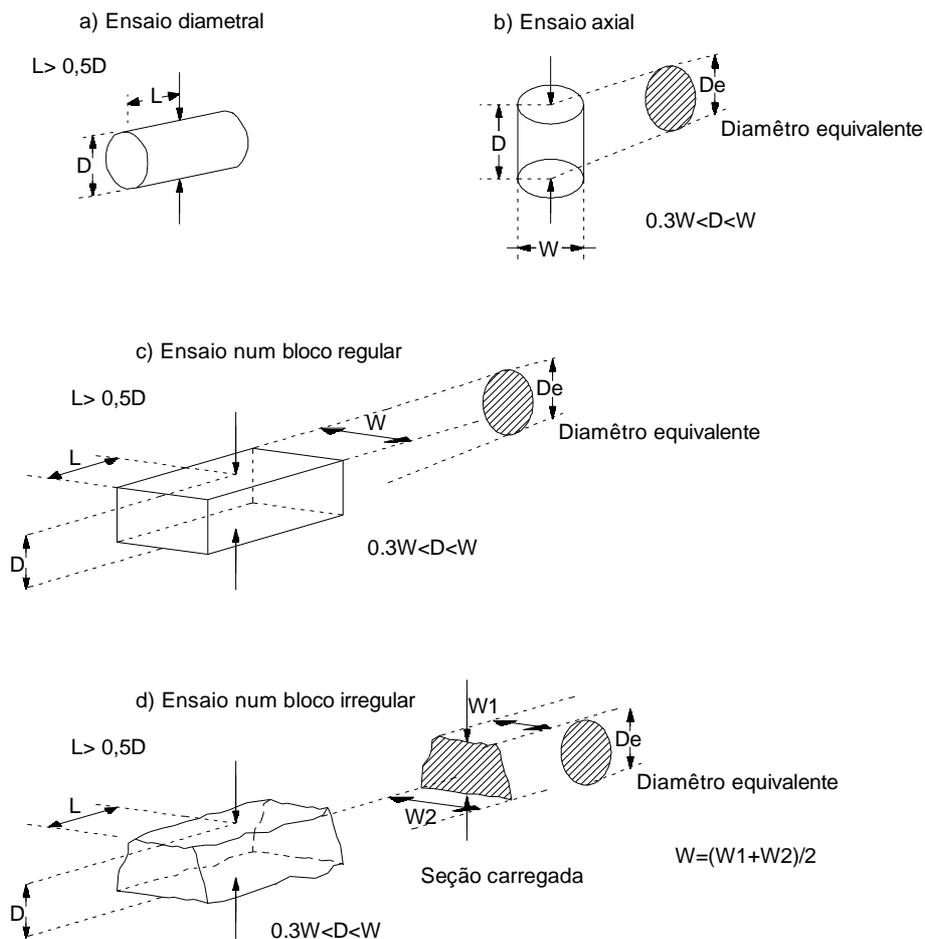


Figura 2.7 - Ensaio de carga puntiforme em diferentes corpos de prova e requerimentos das dimensões da seção transversal. (modificado – ISRM, 2007).

O índice de resistência ao carregamento puntiforme é dado por:

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (2.20)$$

Onde: I_s é o índice de resistência ao carregamento puntiforme (kPa); P é a carga de ruptura (kN); D_e é o diâmetro equivalente do corpo de prova (m).

A carga P é obtida como a relação entre a força aplicada pela prensa e a área do pistão de aplicação da carga.

Para corpos cilíndricos carregados diametralmente, D_e é calculado como:

$$D_e = D \quad (2.21)$$

Onde: D é o diâmetro do cilindro e também a distância entre os cones de carregamento (m).

Para corpos de prova regulares ou irregulares carregados axialmente, D_e é calculado como:

$$D_e = \sqrt{\frac{4WD}{\pi}} \quad (2.22)$$

Onde: W é a largura do corpo de prova (m); D é a distância entre os cones de carregamento (m).

Visando padronizar os resultados, foi proposta uma correção devido ao tamanho do corpo de prova no índice I_s , definindo o índice de resistência ao carregamento puntiforme corrigido $I_{s(50)}$. O índice $I_{s(50)}$ é definido como se o valor do índice I_s fosse medido em um carregamento diametral com diâmetro equivalente (D_e) igual a 50 mm.

Portanto, para ensaios executados em amostras com diâmetro equivalente diferente de 50 mm, deve ser introduzida uma correção no resultado do índice de resistência à carga puntiforme I_s da seguinte forma:

$$I_{s(50)} = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0,45} I_s \quad (2.23)$$

Onde: $I_{s(50)}$ é o índice de resistência à carga puntiforme padronizada (kPa).

O ensaio pode ser aceito quando a fratura ocorre paralela aos pontos de aplicação da carga externa. Caso a fratura ocorra segundo outro plano, como acontece, por exemplo, em amostras xistosas, ou ocorra esmagamento ou deformação excessiva, o ensaio deve ser rejeitado.

O índice de resistência à carga puntiforme padronizado $I_{S(50)}$ é correlacionado empiricamente com a resistência à compressão uniaxial por meio da seguinte expressão:

$$\sigma_c = CI_{S(50)} \quad (2.24)$$

Onde: C é uma constante adimensional de correlação empírica.

Tem-se encontrado que, em média, a constante C varia na faixa de 20 a 25. Diferentes ensaios realizados mostram que a faixa de C pode variar entre 15 e 50, particularmente para rochas anisotrópicas. Consequentemente, é recomendado calibrar esta constante com um número limitado de ensaios de resistência à compressão uniaxial.

- *Índice do esclerômetro de Schmidt*

A resistência à compressão uniaxial também pode ser estimada por meio do índice do esclerômetro de Schmidt. Este ensaio é usado comumente para estimar a resistência à compressão simples das paredes rochosas, porém também é aplicável em núcleos de rochas. Tem a vantagem de ser um ensaio rápido, onde pode ser executado um grande número de provas sem que isto acarrete maiores custos.

De forma geral, o ensaio consiste em aplicar o esclerômetro na superfície da rocha ensaiada para obter o índice de rebote de Schmidt. Este índice, junto com o valor do peso volumétrico da rocha ensaiada, é correlacionado à resistência à compressão uniaxial por meio de ábacos. Para rochas brandas, é recomendado utilizar um esclerômetro que seja sensível o suficiente para marcar as leituras. O procedimento do ensaio está registrado na ISRM (2007).

A Figura 2.8 mostra o ábaco empregado para estimar a resistência à compressão uniaxial. Este ábaco é aplicável para o esclerômetro de Schmidt tipo L e, dependendo da orientação do esclerômetro, devem ser feitas correções no índice de Schmidt seguindo as instruções indicadas na figura.

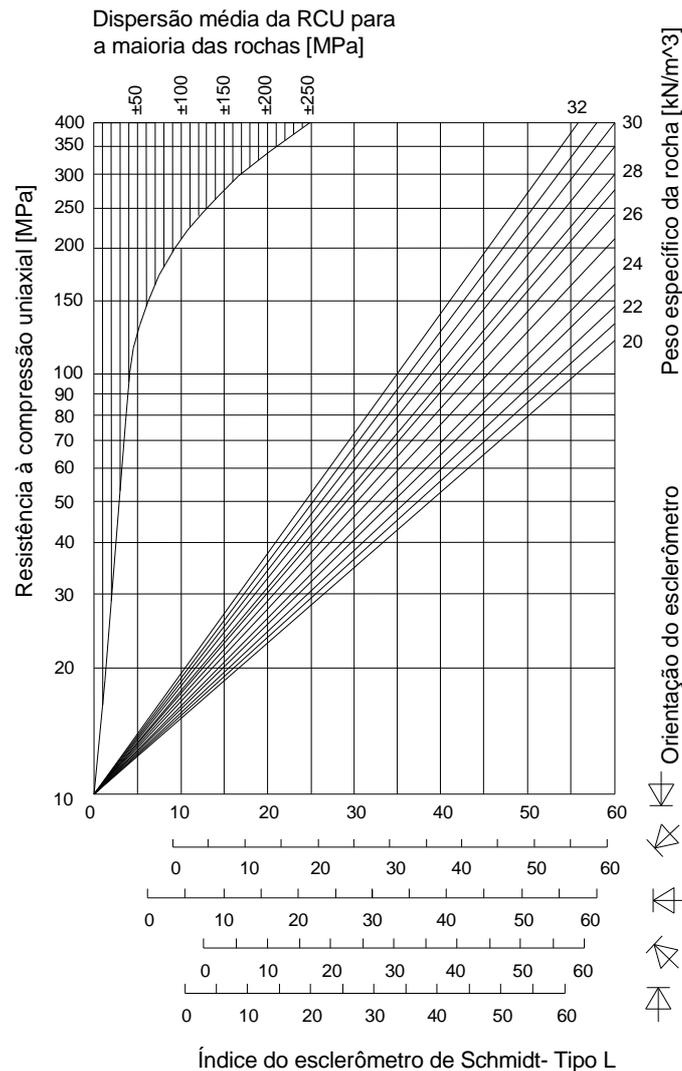


Figura 2.8 - Ábaco para determinar a resistência à compressão uniaxial por meio do esclerômetro (modificado - ISRM, 2007).

2.4.2.8 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

A resistência à tração é definida como a máxima tensão à tração que a rocha pode suportar. Os materiais rochosos geralmente apresentam uma baixa resistência à tração, devido principalmente à existência de microfissuras.

A resistência à tração de um material rochoso pode ser obtida pelo ensaio de tração direto ou estimada por meio de diferentes ensaios, entre eles, o ensaio brasileiro e o ensaio à flexão.

O ensaio direto não é usualmente empregado devido às dificuldades relacionadas à preparação do corpo de prova. O ensaio mais frequentemente utilizado para determinar a resistência à tração da rocha é o ensaio brasileiro, o qual é conhecido também como ensaio Lobo Carneiro.

- *Compressão diametral ou ensaio brasileiro*

O procedimento do ensaio está registrado na ISRM (2007). De forma geral, o ensaio de compressão diametral ou ensaio brasileiro consiste em aplicar uma carga em um núcleo de rocha cilíndrico por meio de sua geratriz até conseguir a ruptura (Figura 2.9). Recomenda-se a utilização de corpos de prova com relação L/D aproximadamente 0,5 e mordentes para conseguir uma adequada distribuição de tensões.

Finalmente, a resistência à tração do corpo de prova pode ser calculada como:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi Dt} \quad (2.25)$$

Onde: σ_t é a resistência à tração do corpo de prova (MPa); P é a carga de ruptura (N); D é o diâmetro da amostra (mm); t é o comprimento da amostra (mm).

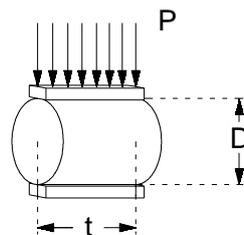


Figura 2.9 - Esquema do ensaio de compressão diametral.

2.5 CARACTERIZAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES

A importância das descontinuidades na análise de estabilidade de obras em rocha é inquestionável, visto que elas podem afetar significativamente a resistência, a deformabilidade e a permeabilidade do maciço. Assim, é fundamental realizar uma caracterização adequada das mesmas. O resultado da caracterização das descontinuidades permite, entre outras coisas, ter uma idéia dos potenciais modos de ruptura que podem ocorrer em uma determinada obra, o que permite abordar o problema de estabilidade e estabelecer eventuais soluções. Algumas das características mais relevantes das descontinuidades são descritas a seguir.

2.5.1 TIPOS DE DESCONTINUIDADES

Os tipos de descontinuidade podem ser identificados de acordo com sua formação. Apresentam-se na Tabela 2.2 uma breve descrição dos tipos mais frequentes de descontinuidades que se podem observar na natureza.

Tabela 2.2 - Tipos de descontinuidades frequentes na natureza (ABGE, 1998).

Tipo de descontinuidade	Descrição
Falha	As falhas ou zonas de cisalhamento rúptil são descontinuidades ao longo das quais os blocos separados sofrem deslocamentos, atritando-se um contra o outro e, às vezes, gerando fragmentação e cominuição das rochas (ABGE, 1998).
Planos de acamamento	Os planos de acamamento, ou estratificação, representam descontinuidades formadas pelo arranjo de rochas sedimentares em camadas distintas, com espessuras variando de centímetros até poucos metros.
Foliação	Foliação é o termo que se aplica a determinadas feições planares que são inerentes às rochas metamórficas. O termo agrupa vários tipos de estruturas, entre elas as xistosidades.
Dobras	As dobras são ondulações adquiridas por feições planares (camadas e foliações) mediante a deformação heterogênea de massas rochosas (ABGE, 1998).
Clivagem de fratura	Fraturas paralelas formadas em camadas rochosas de baixa resistência, ditas incompetentes, intercaladas em camadas com graus de resistência superior. Tais tipos podem, por exemplo, formar-se em um xisto argiloso intercalado entre duas camadas de arenito de resistência superior.
Juntas	As juntas ou diaclases são descontinuidades que ocorrem de forma sistemática, segundo orientações preferenciais, formando famílias de descontinuidades. Em geral, comparecem duas ou mais famílias que se entrecruzam, formando blocos poliédricos, cujas formas e dimensões dependem das orientações e dos espaçamentos das famílias de descontinuidades.

2.5.2 FAMÍLIAS DE DESCONTINUIDADES E ORIENTAÇÃO ESPACIAL

Família de descontinuidade é o termo empregado para designar as descontinuidades que se apresentam no maciço de forma sistemática, onde predomina uma orientação preferencial.

Segundo a ISRM (2007), a orientação espacial de uma descontinuidade planar é definida pelo ângulo de mergulho (β) formado entre a linha de máxima inclinação e a horizontal (0 a 90°) e pela direção do mergulho (α) medido desde o norte em sentido horário (0 a 360°). A orientação normalmente é expressa assim: α/β (Figura 2.10).

Graficamente, esta informação pode ser representada por diagramas de rosetas, por projeções estereográficas ou por diagramas de pólos. Para um maior aprofundamento e compreensão neste tema, publicações como Hoek & Bray (1981), Goodman (1989) e ISRM (2007) são

recomendadas.

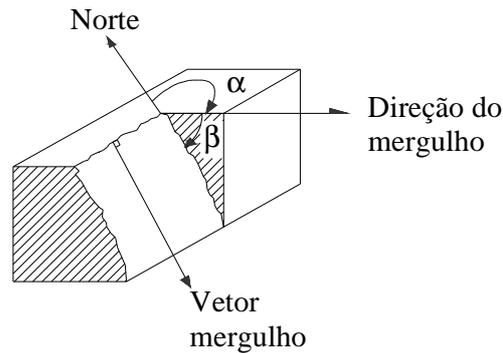


Figura 2.10 - Orientação de uma descontinuidade (modificado- Maia, 2003).

2.5.3 ESPAÇAMENTO

O espaçamento é a distância perpendicular entre descontinuidades adjacentes que pertencem a uma família de descontinuidades e é determinado como o espaçamento médio ou modal. Na determinação do espaçamento, é utilizada, normalmente, uma trena graduada em milímetros de pelo menos 3 m (Figura 2.11).

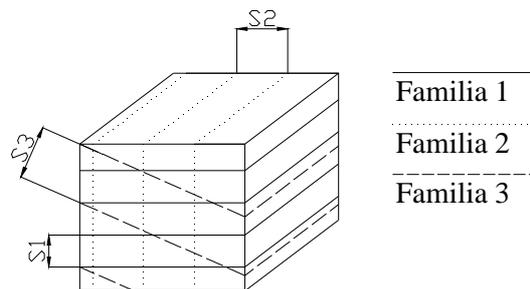


Figura 2.11 - Medida do espaçamento de descontinuidades em rocha exposta (modificado- Assis, 2003).

2.5.4 PERSISTÊNCIA

A persistência ou continuidade de uma fratura é a extensão do traço de uma descontinuidade conforme observado em um afloramento e é determinada como o comprimento de penetração da descontinuidade dentro do maciço rochoso (Figura 2.12).

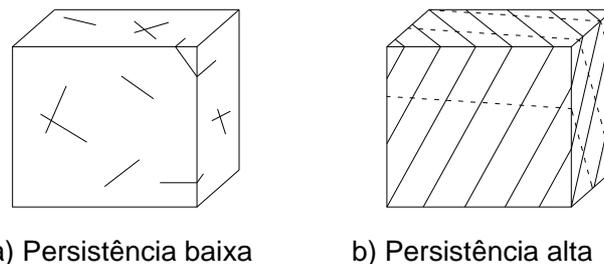


Figura 2.12 - Esquema ilustrativo da persistência em descontinuidades (Assis, 2003).

O número de famílias, sua orientação, sua persistência e seu espaçamento condicionam o tamanho dos blocos individuais de rocha intacta, o qual vai determinar se a ruptura vai ocorrer através das descontinuidades ou do maciço rochoso.

Por exemplo, diversas famílias com espaçamento pequeno e com persistência alta geram um fraturamento intenso, conferindo ao maciço um comportamento mais próximo do comportamento dos materiais granulares, modificando o modo de ruptura de translacional para circular (Assis, 2003).

2.5.5 ABERTURA

Abertura é a distância entre as paredes de uma descontinuidade aberta, onde o espaço só é preenchido por ar ou por água. Descontinuidades que foram preenchidas, mas que tiveram seu preenchimento lavado localmente, também estão incluídas nesta categoria (Assis, 2003). Na determinação do espaçamento, é utilizada normalmente uma trena graduada em milímetros de pelo menos 3 m. A Figura 2.13 apresenta os três tipos de abertura de uma descontinuidade: fechada, aberta, aberta preenchida por água.

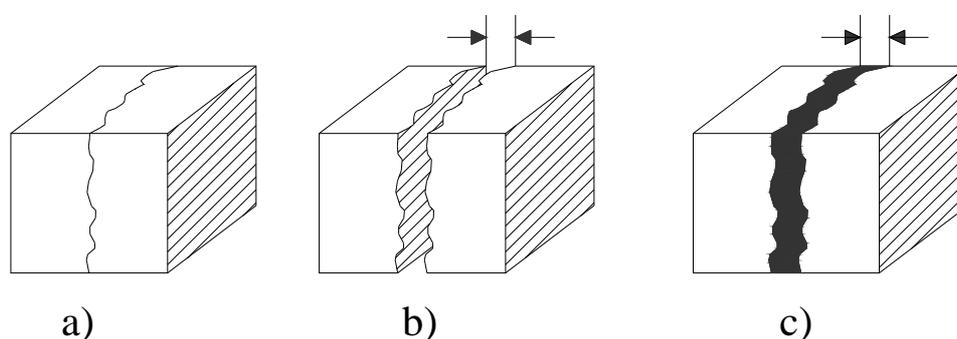


Figura 2.13 - descontinuidade: a) Fechada; b) Aberta; c) Preenchida com água (modificado-Maia, 2003).

2.5.6 PREENCHIMENTO

É o termo usado para descrever o material que separa as paredes adjacentes de uma descontinuidade e que, usualmente, é mais fraco que a rocha que lhe deu origem (Assis, 2003). O tipo de material poderá ser muito diversificado, por exemplo: calcita, quartzo, argila, silte, milonito de falha, brecha, entre outros. A distância perpendicular entre as paredes é chamada de espessura da descontinuidade preenchida, distinguindo-se da abertura de uma feição falhada ou aberta.

A caracterização do preenchimento é importante porque, dependendo do material e de sua

espessura, pode controlar completamente a resistência ao cisalhamento, a deformabilidade e a condutividade hidráulica das descontinuidades.

2.5.7 RESISTÊNCIA DAS PAREDES

A resistência das paredes (*JCS*) se define como a resistência à compressão uniaxial das paredes adjacentes de uma descontinuidade, a qual geralmente é menor que a da rocha intacta devido à ação marcante do intemperismo nas descontinuidades, o qual gera alteração das paredes (ISRM, 2007).

Esta característica tem não só forte influência na resistência ao corte dos maciços rochosos, principalmente se as descontinuidades estiverem fechadas, como também condiciona a sua deformabilidade.

Em diversos casos, a espessura da parede alterada é relativamente fina, portanto, é inviável realizar ensaios diretos para estimar a resistência à compressão uniaxial. Neste caso, opta-se por utilizar métodos indiretos, principalmente o esclerômetro de Schmidt, o qual foi explicado na Seção 2.4.2.7.

2.5.8 RUGOSIDADE

A rugosidade representa as irregularidades observadas nas superfícies das descontinuidades. Estas irregularidades se manifestam na escala da ordem de alguns metros e são caracterizadas como ondulações, ou em dimensões milimétricas a centimétricas, sendo caracterizadas como aspereza.

A rugosidade das paredes de uma descontinuidade é uma característica potencialmente importante na sua resistência ao cisalhamento, especialmente nos casos de descontinuidades não preenchidas.

De acordo com Barton & Choubey (1977), a rugosidade das paredes da descontinuidade é representada pelo coeficiente de rugosidade (*JRC*). Os valores do coeficiente *JRC* podem ser estimados com a ajuda da tabela de Barton & Choubey (1977), comparando o aspecto da descontinuidade a perfis típicos de rugosidade (Figura 2.14).

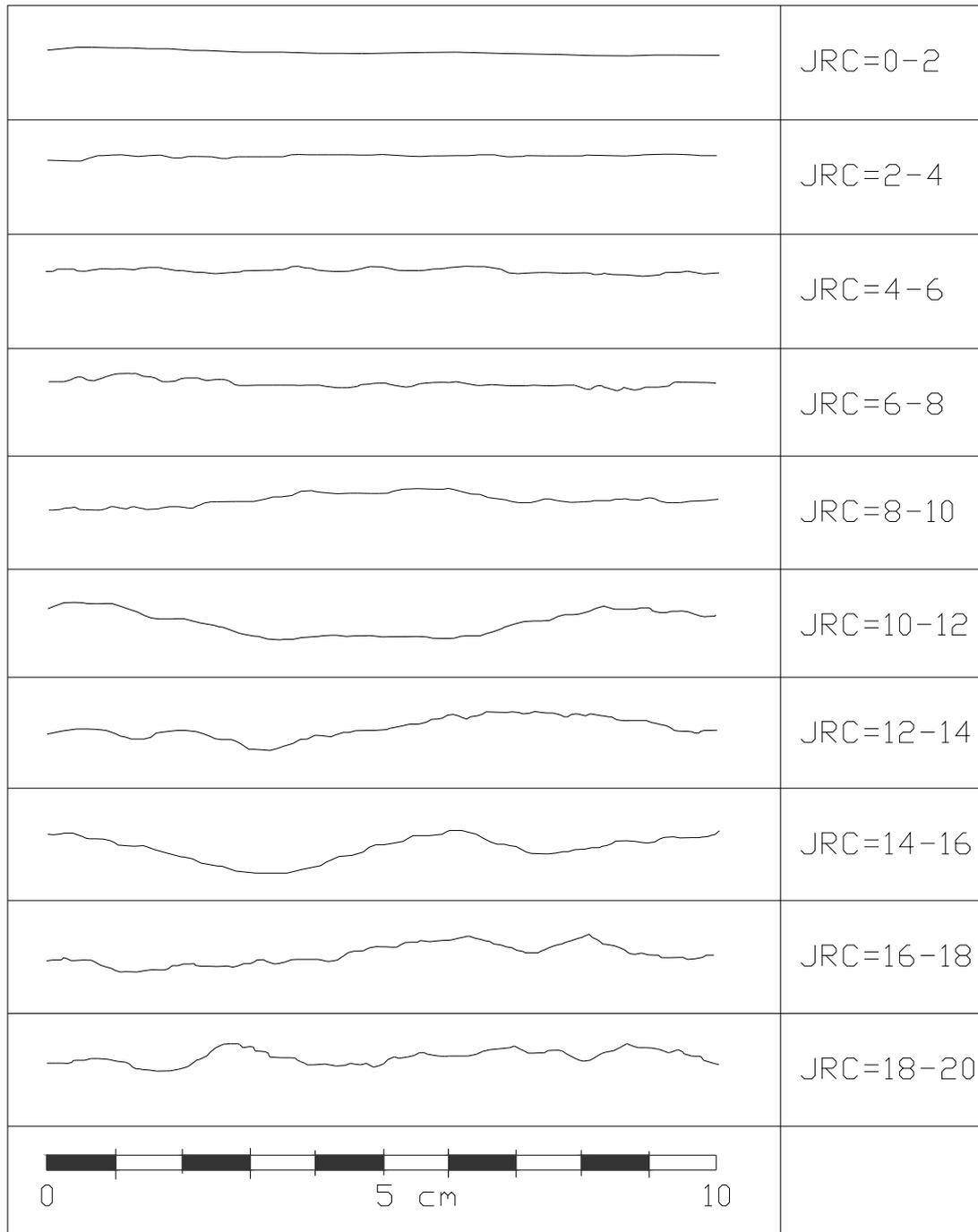


Figura 2.14 - Perfis típicos de rugosidade e respectivos valores de *JRC* (modificado- Hoek, 2007).

Finalmente, este parâmetro é dado de entrada para estimar a resistência ao cisalhamento de discontinuidades sem preenchimento, onde se observa que o ângulo de atrito de pico da discontinuidade é diretamente proporcional à rugosidade.

$$\phi_p = JRC \cdot \log\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right) + \phi_r \quad (2.26)$$

Onde: ϕ_p é o ângulo de atrito de pico (radianos); JRC é o coeficiente de rugosidade da descontinuidade (adimensional); JCS é a resistência à compressão das paredes da descontinuidade (MPa); σ_n é a tensão normal (MPa); ϕ_r é o ângulo de atrito residual (radianos).

2.5.9 PERCOLAÇÃO

Em um maciço rochoso, a percolação de água se dá através da matriz rochosa e das descontinuidades. Na maioria dos casos, esta propriedade é predominantemente controlada pelo sistema de descontinuidades, com exceção de alguns tipos de rochas, como as sedimentares, onde a percolação se dá principalmente através da matriz rochosa.

Segundo Assis (2003), a estabilidade de uma obra pode ser prejudicada pela existência de água em grande escala no maciço, em decorrência dos seguintes fatores:

- A pressão de água atuante reduz os esforços resistentes e, ao mesmo tempo, aumenta aqueles que tendem à ruptura.
- A existência de umidade aumenta o peso do material, dificultando o seu transporte e aumentando os custos de operação.
- Em regiões onde a temperatura alcança valores negativos, há risco de congelamento da água existente no maciço e sua conseqüente expansão. Tal efeito pode bloquear as fissuras de drenagem naturais, ocasionando acúmulo de água e aumento de pressão. A expansão de volume devido ao congelamento pode acelerar o processo de erosão nestas fissuras, criando planos de deslizamento.
- A presença de água pode erodir a superfície da obra e carrear material fino pelas fissuras existentes, podendo obstruir canais de drenagem naturais.

2.6 INTEMPERISMO

O intemperismo representa o conjunto de processos que ocasionam mudanças nas propriedades físicas e mineralógicas das rochas e dos minerais, provocadas por diversos agentes físicos, químicos e biológicos no decorrer do tempo. O intemperismo afeta as propriedades da matriz rochosa, das descontinuidades e, portanto, as do maciço rochoso.

O intemperismo afeta as propriedades índice da rocha intacta, aumenta o nível de fraturamento das descontinuidades e gera mudanças negativas no desempenho geomecânico

do material do maciço rochoso, como a diminuição da resistência, o aumento da deformabilidade e o aumento da percolação.

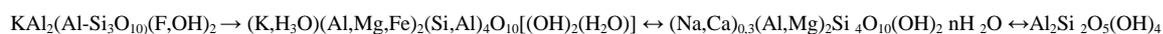
Segundo a ABGE (1998), em termos gerais, os estágios iniciais do intemperismo resultam em uma redução significativa da resistência da rocha em relação à rocha original, enquanto nos estágios mais avançados de intemperismo, esta tendência se atenua.

O intemperismo ocorre na rocha principalmente de duas formas: por desintegração física e por decomposição química (Beavis, 1985). A desintegração física envolve a quebra mecânica da rocha provocada por diversos agentes, tais como mudanças significativas na temperatura, efeito mecânico de animais e plantas, alívio de pressões, entre outros.

A decomposição química afeta a composição dos minerais, gerando mudanças neles e os transformando em outros. Poucos minerais, entre eles o quartzo, são mais resistentes a estas mudanças. De forma geral, os minerais de silicatos que compõem a rocha tendem a gerar argilominerais no estado final da decomposição química, com exceção do quartzo.

Os principais processos envolvidos na decomposição são a oxidação, a hidratação, a hidrólise e a carbonatação. Estes processos são ativados principalmente pela ação de climas úmidos tropicais e de forma menos significativa pela ação química que exercem plantas e animais.

Por exemplo, a muscovita é transformada em illita, a illita em montmorilonita, e finalmente, a montmorilonita pode ser transformada em caulinita. A seguir são apresentadas as transformações sofridas para cada mineral respectivamente (ABGE,1998):



Diferentes propostas existem na literatura para definir o perfil de intemperismo em um maciço rochoso, onde o propósito é estabelecer e identificar os diferentes níveis de intemperismo em profundidade no maciço. Adotar este tipo de zoneamento em maciços intemperizados permite lidar com a variabilidade das propriedades do maciço e, portanto, diminuir os problemas na hora de definir os parâmetros de projeto. Entre as propostas mais populares, encontram-se os trabalhos de Deere e Patton (1971), da Geological Society (1995), da ABGE (1998), e da ISRM (2007).

Na presente pesquisa, adota-se a proposta da ABGE (1998) para descrever os níveis de intemperismo do maciço rochoso de estudo. Este sistema consiste em definir o grau de

intemperismo em termos da coerência, da alteração e do fraturamento.

O grau de intemperismo da matriz rochosa foi definido com base na alteração e na coerência da rocha, visto que estas propriedades são obtidas diretamente da rocha intacta ou da matriz rochosa. Já o grau de intemperismo no maciço rochoso pode-se definir em função da alteração, da coerência e do fraturamento. Desta forma, inclui-se uma variável a mais que quantifica o efeito do intemperismo nas descontinuidades.

2.6.1 ALTERAÇÃO

O grau de alteração descreve o grau de intemperismo principalmente devido à decomposição química, referindo-se, portanto às mudanças mineralógicas sofridas pelos minerais formadores de rocha.

Na Tabela 2.3, é apresentado o critério para definir o grau de alteração segundo a ABGE (1998). O critério é válido para a comparação relativa entre variedades de um mesmo tipo litológico. O único inconveniente com esta classificação é que deve ser realizada por um geólogo treinado e com experiência em discernir as mudanças dos minerais para cada tipo de rocha.

Tabela 2.3 - Graus de alteração (ABGE, 1998).

<i>Grau</i>	<i>Denominação</i>	<i>Características da rocha</i>
A1	Rocha sã ou praticamente sã	Apresenta minerais primários sem vestígios de alterações ou com alterações físicas e químicas incipientes. A rocha é ligeiramente descolorida.
A2	Rocha medianamente alterada	Alteração mineralógica perceptível. Cores esmaecidas e pequenas transformações físico-químicas.
A3	Rocha muito alterada	Coors parcialmente modificadas e intensas transformações físico-químicas. Alteração mineralógica acentuada.
A4	Rocha extremamente alterada	Alteração mineralógica praticamente completa. Cores totalmente modificadas e transformações físico-químicas completas, exceto nos minerais resistentes.

2.6.2 COERÊNCIA

A coerência, definida com base em propriedades de tenacidade, de dureza e de friabilidade das rochas, é caracterizada tátil-visualmente, por meio da apreciação da resistência que a rocha oferece ao impacto do martelo e ao risco com lâmina de aço (Guidicini *et al.*, 1972). Os critérios para a quantificação da coerência das rochas estão registrados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Graus de coerência (ABGE, 1998).

<i>Grau</i>	<i>Denominação</i>	<i>Características da rocha</i>
C1	Muito coerente	Quebra com dificuldade ao golpe do martelo, formando poucos fragmentos com bordas cortantes. Características mecânicas elevadas. Superfície difícil ou levemente riscável por lâmina de aço. Somente escavável a fogo.
C2	Medianamente coerente	Quebra facilmente ao golpe do martelo em vários fragmentos e as bordas podem ser quebradas pela pressão dos dedos. A lâmina de aço provoca um sulco pouco acentuado na superfície do fragmento. Características mecânicas boas.
C3	Pouco coerente	Quebra facilmente ao golpe do martelo, produzindo fragmentos que podem ser partidos manualmente. A lâmina de aço produz sulcos profundos na superfície do fragmento. Características mecânicas baixas.
C4	Incoerente	Desagrega e esfarela com a pressão digital. Pode ser cortado por lâmina de aço. Friável e escavável com lâmina de aço. Características mecânicas muito baixas.

Embora os parâmetros de alteração e coerência encerrem critérios de aplicação subjetiva, são ferramentas que permitem apreciar de forma prática e confiável a intensidade da ação intempérica sobre um determinado maciço rochoso, interessando, à engenharia, as consequentes modificações nas propriedades das rochas, em especial as mecânicas (ABGE, 1998).

2.6.3 FRATURAMENTO

O fraturamento é expresso pela quantidade de descontinuidades que intercepta o testemunho de sondagem. A medida de grau de fraturamento se dá em número de fraturas por metro, descartando-se as quebras decorrentes do manuseio e da execução da sondagem. Na Tabela 2.5, é apresentada uma divisão em categorias de rocha definidas de acordo com fraturamento.

Tabela 2.5 - Graus de fraturamento (ABGE, 1998).

<i>Grau</i>	<i>Denominação do maciço</i>	<i>Fraturamento N° de fraturas por metro</i>	<i>Espaçamento entre fraturas</i>
F1	Maciço ou ocasionalmente fraturado	0 a 1	>1m
F2	Pouco fraturado	2 a 5	< 1m a 0,20m
F3	Medianamente fraturado	6 a 10	< 0,20m a 0,10m
F4	Muito fraturado	11 a 20	< 0,10m a 0,05m
F5	Extremamente fraturado	>20	< 0,05m

2.7 ANISOTROPIA E HOMOGENEIDADE

A anisotropia é definida como a condição de variabilidade de propriedades físicas e mecânicas de um corpo rochoso ou mineral segundo direções diferentes, como, por exemplo, a variação do módulo de deformabilidade, da resistência e da permeabilidade. A anisotropia nas propriedades de um maciço rochoso é induzida principalmente pelas descontinuidades e também pelo arranjo preferencial dos minerais (foliações, xistosidades).

A relação entre os valores de uma mesma propriedade medidos em direções diferentes (geralmente na direção normal e paralela ao plano de simetria ou plano de anisotropia) define o índice de anisotropia, o qual varia dependendo da propriedade medida e dá uma idéia do grau de anisotropia.

A homogeneidade significa que, em um determinado meio, uma propriedade mantém-se em toda a sua extensão. Do ponto de vista da engenharia, a inhomogeneidade em um maciço rochoso se dá, principalmente, pela presença de diferentes tipos de litologia, de descontinuidades e pela ação do intemperismo. Assim, para uma análise de estabilidade, é importante estabelecer zonas de comportamento geomecânico similar dentro do maciço rochoso e caracterizá-las.

Em termos estritos, do ponto de vista geológico, uma pequena amostra de rocha carece de verdadeira isotropia e homogeneidade. Sendo esse o caso, não se pode esperar isotropia nem homogeneidade nas propriedades do maciço rochoso. Mesmo sendo isso verdade, o engenheiro deve estar preocupado em verificar se o desenvolvimento da inhomogeneidade e da anisotropia exerce influência significativa nas propriedades de engenharia do maciço rochoso (Beavis, 1985).

Resistência e Deformabilidade de Maciços Rochosos

Tal como foi descrito anteriormente, os possíveis mecanismos de ruptura em uma obra em rocha podem ser identificados dependendo da orientação das descontinuidades e da escala da obra em relação à intensidade do fraturamento. Ou seja, deve-se estabelecer se a ruptura se dá através da rocha intacta, das descontinuidades ou do maciço rochoso. Isso é importante, pois vai definir quais critérios de ruptura utilizar e como se devem obter as propriedades de resistência e deformação.

Por exemplo, segundo Assis (2003), para estimar a resistência das rochas intactas, pode-se recorrer a ensaios triaxiais ou cisalhamento direto, os quais não apresentam maiores novidades em relação aos ensaios em solos, com exceção das dificuldades na preparação dos corpos de prova e do tamanho e do custo do equipamento.

Para as descontinuidades, ensaios de cisalhamento podem ser feitos na própria descontinuidade, porém, as dificuldades na prática para realizar este tipo de ensaios são grandes, principalmente pelo custo. No entanto, existem critérios de resistência semi-empíricos que usam ensaios simples para a obtenção de seus parâmetros.

No caso de maciços rochosos, na prática, é raríssima a obtenção direta de parâmetros por meio de ensaios, visto que, dependendo das características do maciço, uma amostra representativa dele pode ser muito grande, o que inviabiliza a execução do ensaio do ponto de vista técnico e econômico. Portanto, empregam-se metodologias indiretas para a determinação dos parâmetros geomecânicos, via classificação geomecânica.

De forma análoga à obtenção de parâmetros, existem critérios de ruptura que são mais aceitos e adequados para cada caso, sendo que estes critérios são relações entre as tensões correspondentes ao estado de ruptura de um material. A Tabela 3.1 tenta sumarizar os critérios de ruptura e suas aplicações, os quais são brevemente descritos posteriormente.

Tabela 3.1 - Critérios de resistência aceitos para cada tipo de material rochoso (Assis, 2003).

Material Rochoso		Critério de Resistência	Obtenção de Parâmetros
Rocha Intacta		Mohr-Coulomb Hoek & Brown	Direta (ensaios de cisalhamento direto ou triaxiais)
Descontinuidade	Contato parede/parede	Barton & Choubey	Semi-direta (ensaios simples)
	Parcialmente preenchida	Mohr-Coulomb	Indireta (parâmetros J_r e J_a da classificação de Barton <i>et al.</i> , 1974)
	Preenchimento dominante	Mohr-Coulomb	Direta (ensaios de cisalhamento no material do preenchimento)
Maciço Rochoso		Mohr-Coulomb Hoek & Brown	Indireta (determinação de parâmetros através classificação geomecânica <i>GSI</i>)

3.1 CRITÉRIO DE MOHR-COULOMB

Vários critérios têm sido desenvolvidos na determinação da resistência da rocha intacta. O critério de Mohr-Coulomb, o mais conhecido, consiste em uma envoltória de ruptura linear a todos os círculos de Mohr que representam combinações críticas de tensões principais (Assis, 2003). A linha reta como envoltória de ruptura não é, entretanto, a melhor representação para a maioria das rochas. O critério de Mohr-Coulomb é expresso como a relação entre a tensão cisalhante e a tensão normal na ruptura. A envoltória de ruptura, em termos de tensões efetivas, é dada pela seguinte expressão:

$$\tau = c' + \sigma'_n \tan(\phi') \quad (3.1)$$

Onde: τ é a resistência ao cisalhamento na ruptura (MPa); c' é a coesão efetiva do material (MPa); σ'_n é a tensão normal efetiva aplicada no plano de ruptura (MPa); ϕ' é o ângulo de atrito efetivo do material (radianos).

O critério de Mohr-Coulomb é usado também para representar a resistência residual, isto é, a resistência mínima alcançada pelo material submetido à deformação após o pico. Neste caso, um índice r pode ser utilizado para identificar cada termo como um parâmetro de resistência residual.

$$\tau_r = c'_r + \sigma'_n \tan(\phi'_r) \quad (3.2)$$

Onde: τ_r é a resistência ao cisalhamento residual (MPa); c'_r é a coesão residual efetiva do material (MPa); σ'_n é a tensão normal efetiva aplicada no plano de ruptura (MPa); ϕ'_r é o

ângulo de atrito residual efetivo (radianos).

Existem diversos fatores que tornam a relação tensão normal *versus* cisalhante não linear, o que pode limitar a aplicação do critério de Mohr-Coulomb em rochas intactas, descontinuidades e maciços rochosos. No entanto, três casos especiais de descontinuidades utilizam este critério com frequência, devido à influência dos preenchimentos na descontinuidade: descontinuidade plana e lisa, parcialmente preenchida e predominantemente preenchida (Assis, 2003). A Figura 3.1 esquematiza a forma de identificar estes tipos de descontinuidades, onde f é a amplitude média da ondulação e a é a espessura do preenchimento.

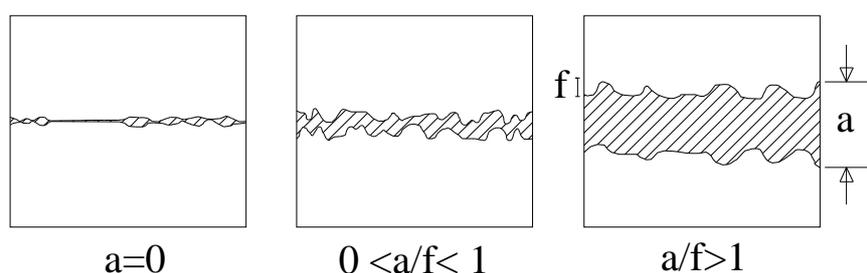


Figura 3.1 – Descont. plana e lisa, parcialmente preenchida e preenchida (modificado- Assis, 2003).

A existência de material fino nas descontinuidades se dá pelo intemperismo, por carregamentos ou pela presença de intrusões de lâminas de minerais. Goodman (1976) demonstrou que quanto maior a espessura do material de preenchimento, menor a resistência cisalhante da descontinuidade. A partir do instante que a espessura da camada de preenchimento supera as ondulações da descontinuidade, a resistência ao cisalhamento da descontinuidade passa a ser controlada pela resistência do material de preenchimento. A Tabela 3.2 apresenta os três casos onde o critério de Mohr-Coulomb é válido.

Tabela 3.2 - Equações de Mohr-Coulomb utilizadas nas descontinuidades (Assis, 2003).

Descontinuidade	Equação de Mohr-Coulomb	Observações
Plana e lisa	$\tau = \sigma'_n \tan(\phi'_r)$	Neste caso, a equação de Barton & Choubey converge para a de Mohr-Coulomb.
Parcialmente preenchida	$\tau = \sigma'_n \tan(\phi')$	Neste caso, $\tan(\phi')$ assumido igual à razão entre os parâmetros J_r e J_a da classificação de Barton <i>et al.</i> , 1974. ($\tan(\phi') = J_r/J_a$)
Preenchimento dominante	$\tau = c'_p + \sigma'_n \tan(\phi'_p)$	Os parâmetros de resistência ao cisalhamento dominantes são os do material de preenchimento, onde c'_p e ϕ'_p são, respectivamente, a coesão efetiva do preenchimento e o ângulo de atrito efetivo do preenchimento.

3.2 CRITÉRIO DE BARTON E CHOUBEY

A proposta de Barton & Choubey (1977) serve para estimar a resistência ao cisalhamento em descontinuidades rugosas, com contato parede/parede. Esta é uma equação semi-empírica, baseada em observações e em ensaios realizados em superfícies artificialmente rugosas. A equação de Barton & Choubey (1977) é dada por:

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \left(JRC \cdot \log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r \right) \quad (3.3)$$

Onde: τ é a resistência ao cisalhamento (MPa); JRC é o coeficiente de rugosidade da descontinuidade (adimensional); JCS é a resistência à compressão das paredes da descontinuidade (MPa); σ_n é a tensão normal aplicada no plano de ruptura (MPa); ϕ_r é o ângulo de atrito residual (radianos).

3.3 CRITÉRIO DE HOEK & BROWN

Devido à existência clara de uma não linearidade na envoltória de resistência para maciços rochosos e para uma grande variedade de rochas intactas, foi desenvolvido o critério de Hoek & Brown (1980a, 1980b) com base em resultados experimentais. O critério de Hoek & Brown (válido para tensões efetivas) foi desenvolvido originalmente para estimar a resistência de rochas intactas, sendo uma envoltória de ruptura definida por uma função potencial em termos das tensões principais.

Posteriormente, este critério foi evoluindo (Hoek, 1983; Hoek, 1994; Hoek & Brown, 1997; Hoek *et al.* 2002) para ampliar sua aplicação em maciços rochosos fraturados de boa e de baixa qualidade. No entanto, devido ao efeito escala (tamanho dos blocos) dos maciços rochosos, a obtenção dos parâmetros do critério de forma direta, por meio da realização de ensaios em laboratório, comumente é inviável e, quando possível, muito onerosa. Assim, a obtenção dos parâmetros de resistência de Hoek & Brown para maciços rochosos fraturados é geralmente feita por meio de classificações geomecânicas destes maciços e de correlações com dados já existentes (Assis, 2003).

Com a revisão do critério proposto por Hoek *et al.* 2002, o critério de ruptura de Hoek & Brown passou a ser denominado de critério de ruptura generalizado de Hoek & Brown, o qual

pode ser utilizado tanto para a rocha intacta como para o maciço rochoso, e é descrito pela seguinte equação:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci}(m_b \sigma'_3 / \sigma_{ci} + s)^a \quad (3.4)$$

Onde: σ'_1 é a tensão efetiva principal maior na ruptura (MPa); σ'_3 é a tensão efetiva principal menor na ruptura (MPa); σ_{ci} é a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta (MPa); m_b , a e s são os parâmetros de resistência do maciço rochoso (adimensionais).

Como foi dito anteriormente, os parâmetros de resistência do maciço rochoso são frequentemente determinados via classificações geomecânicas, devido aos inconvenientes associados à obtenção direta dos parâmetros por ensaios. Neste sentido, atualmente, a classificação geomecânica *GSI* (índice de resistência geológica) tem sido amplamente usada no meio técnico para estimar os parâmetros de resistência indiretamente. O índice *GSI* será explicado na próxima seção. Assim, fazendo uso do *GSI*, o valor da constante m_b pode ser obtido a partir da seguinte equação:

$$m_b = m_i \exp((GSI - 100)/(28 - 14D)) \quad (3.5)$$

Onde: m_i é um parâmetro de resistência da rocha intacta (adimensional); *GSI* é o índice de resistência geológica (adimensional); *D* é o fator de perturbação do maciço rochoso devido ao impacto da detonação na escavação (adimensional).

As demais constantes são calculadas da seguinte maneira:

$$s = \exp\left(\frac{(GSI-100)}{9-3D}\right) \quad (3.6)$$

$$a = 1/2 + 1/6 \left(\exp^{-GSI/15} - \exp^{-20/3} \right) \quad (3.7)$$

O fator *D* avalia o grau de perturbação do maciço rochoso devido ao processo de escavação. O valor deste parâmetro pode assumir valores entre zero, para um maciço não perturbado e um, para um maciço altamente perturbado (Figura 3.2). A escolha de um valor particular de *D*

pode ser feito apoiando-se nas guias reportadas por Hoek (2007).

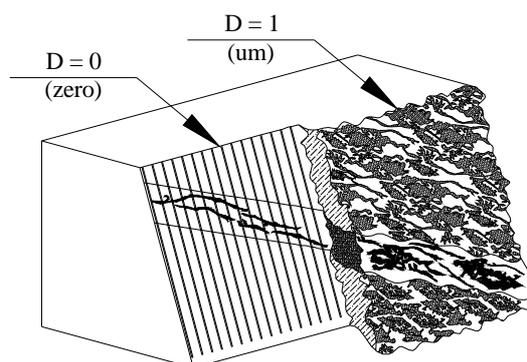


Figura 3.2 - Comparação entre um talude sem e com perturbação devido ao processo de escavação (Maia, 2007).

No caso particular da resistência da rocha intacta, as variáveis do critério assumem os seguintes valores, $GSI = 100$, $a = 1/2$, $s = 1$ e $m_b = m_i$. Assim fica definida a envoltória de resistência de Hoek & Brown para a rocha intacta.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci}(m_i\sigma'_3/\sigma_{ci} + 1)^{0,5} \quad (3.8)$$

Neste caso, a determinação de σ_{ci} e de m_i pode ser feita com dados de ensaios triaxiais, usando técnicas para ajustar a Equação 3.8 aos valores de σ'_3 e σ'_1 . Outra forma é determinar σ_{ci} por ensaios diretos ou indiretos e m_i por meio da tabela proposta por Hoek (1994), que compila valores de m_i para diversos tipos de rochas.

3.3.1 ÍNDICE DE RESISTÊNCIA GEOLÓGICA

O índice de resistência geológica – GSI (*Geological Strength Index*) – é determinado por meio da descrição visual das características geológicas do maciço e por meio de ábacos. O GSI foi apresentado originalmente por Hoek (1994) e ao longo dos anos, o GSI tem passado por seguidos ajustes (Hoek *et al.* 1995; Hoek & Brown 1997; Hoek *et al.* 1998; Marinos & Hoek 2000 e Marinos & Hoek 2001) para se adaptar a diversas condições que não estavam consideradas na classificação original, o que tem contribuído para o enriquecimento do critério de ruptura de Hoek & Brown para maciços rochosos.

O GSI foi desenvolvido inicialmente para sua aplicação em maciços rochosos homogêneos. Com posteriores ajustes, foi proposto um ábaco para maciços rochosos heterogêneos e maciços metamórficos com estruturas xistosas (Wyllie & Mah, 2001). A Figura 3.3 e a Figura

3.4 apresentam, respectivamente, os ábacos para estimar o *GSI* em maciços homogêneos e heterogêneos.

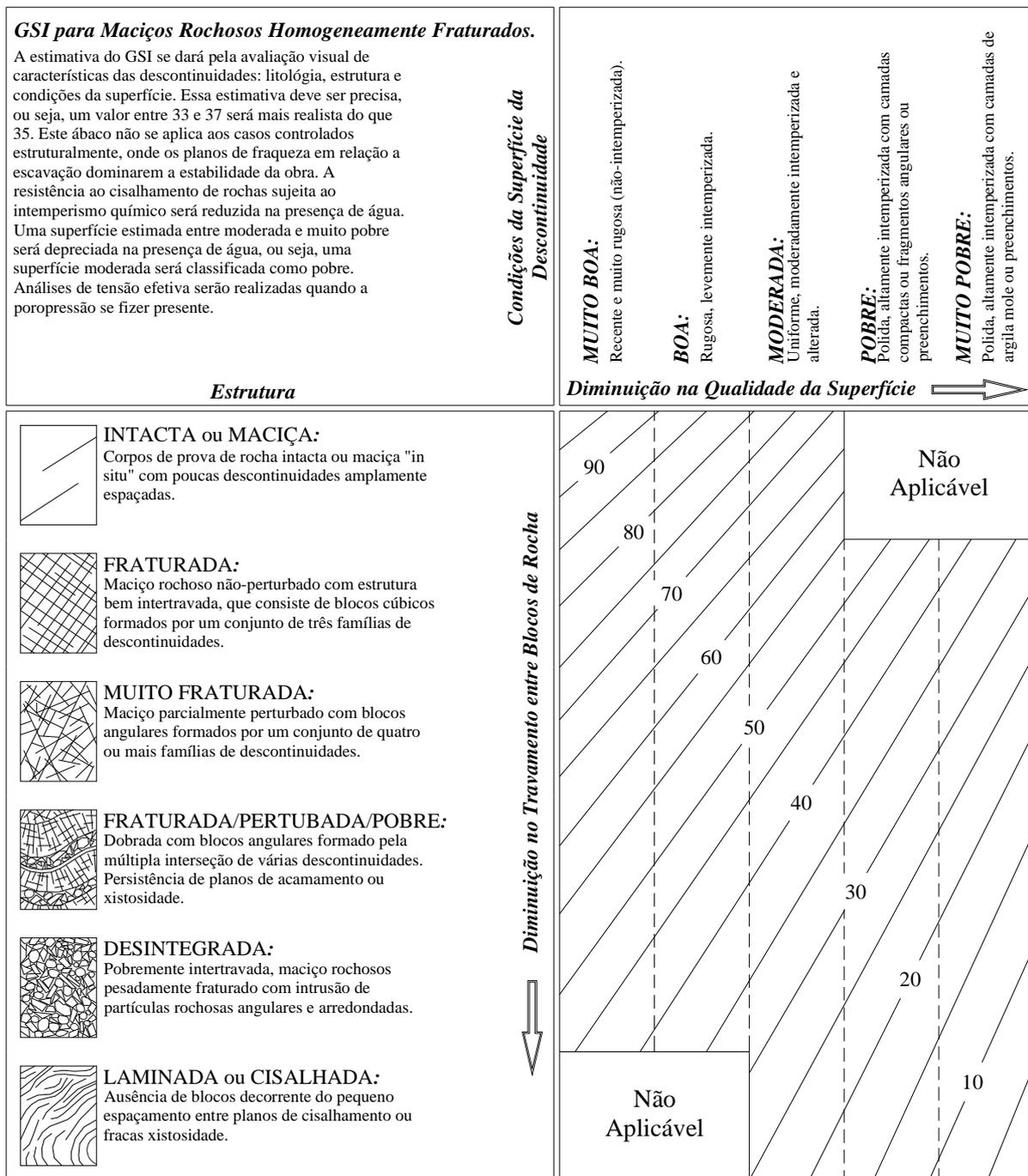


Figura 3.3 - Ábacos do *GSI* em maciços rochosos homogeneamente fraturados (Marinos & Hoek, 2000).

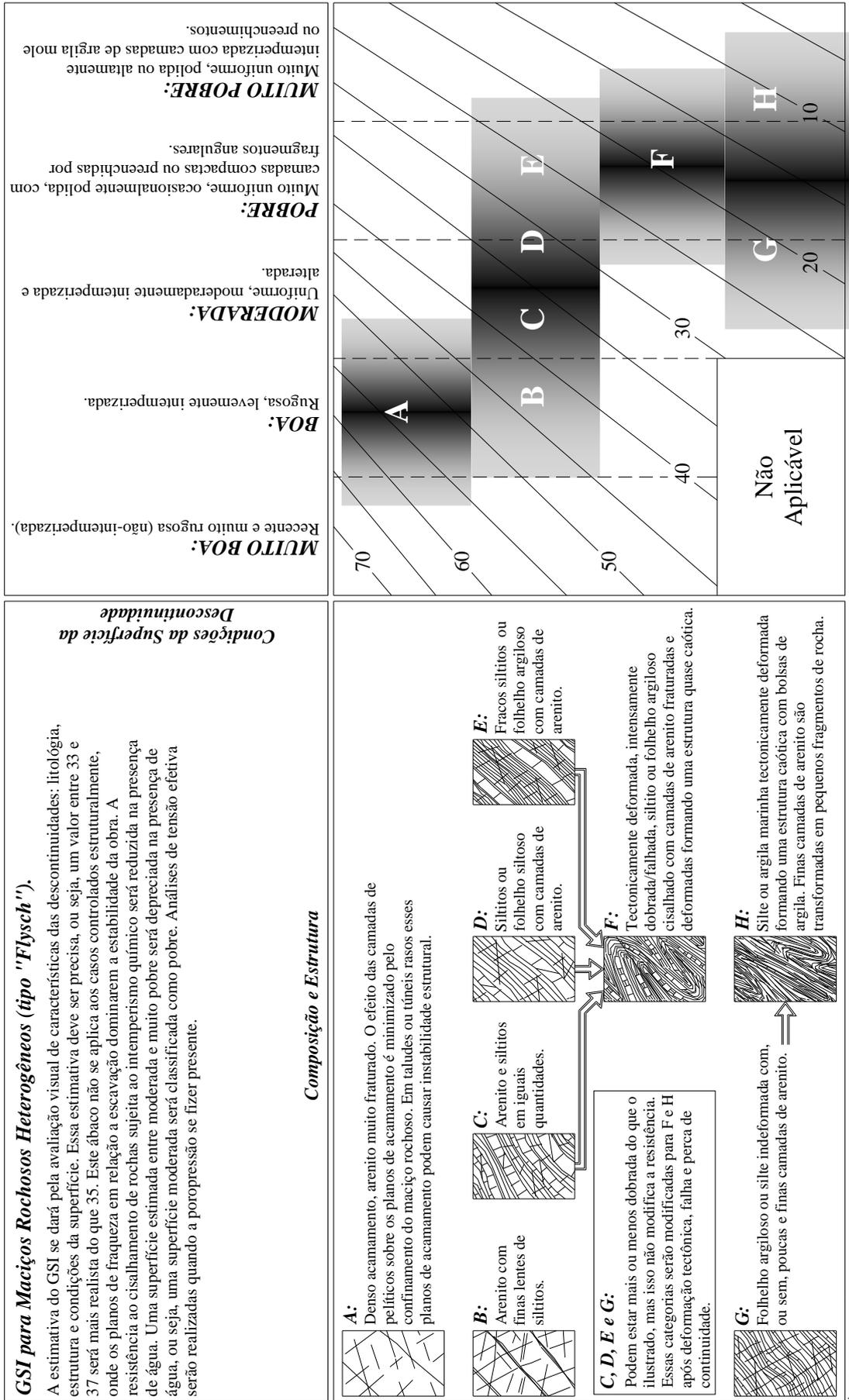


Figura 3.4 - Ábaco para estimar o valor do GSI em maciços rochosos heterogêneos (Marinos & Hoek, 2000).

3.3.2 LIMITAÇÕES DO CRITÉRIO DE HOEK & BROWN

O critério de ruptura de Hoek & Brown assume que o maciço rochoso é isotrópico e que pode ser representado por um meio contínuo equivalente onde as descontinuidades reduzem as propriedades da rocha intacta. Isso pode ser aceito se o maciço rochoso apresenta um número significativo de descontinuidades pouco espaçadas e orientadas aleatoriamente ou se o maciço é altamente intemperizado (Marinos *et al.*, 2005).

Quando a estrutura a ser analisada é grande em relação ao tamanho dos blocos de rocha intacta, o critério de Hoek & Brown pode ser utilizado no maciço rochoso. Assim, este critério não se aplica aos maciços rochosos com claro domínio estrutural (ruptura através das descontinuidades). Caso o maciço possa ser considerado isotrópico e homogêneo, diversas observações de ruptura em taludes sugerem que a superfície de ruptura se aproxima à forma circular.

Atualmente, algumas hipóteses têm sido feitas em relação ao uso do critério de Hoek & Brown em maciços que apresentam condições de anisotropia devido à foliação. Com certa cautela, o critério de ruptura de Hoek & Brown e os ábacos do *GSI* podem ser aplicados se a ruptura do maciço rochoso não se encontra sob o controle de sua anisotropia. Ou seja, quando a foliação é desfavorável à estabilidade da obra, não se deve utilizar o critério de Hoek & Brown, visto que a ruptura provavelmente vai ocorrer através do plano de anisotropia. Caso contrário, o critério pode ser aplicado.

O anterior também é justificado porque se espera que o efeito do intemperismo aliado ao fraturamento possa diminuir o efeito da anisotropia nas propriedades do maciço rochoso (Saroglou *et al.*, 2004).

3.3.3 PARÂMETROS EQUIVALENTES DO CRITÉRIO DE MOHR-COULOMB

O critério Hoek & Brown foi desenvolvido originalmente para projetos de obras subterrâneas, portanto, o critério é dado em termos de tensões principais.

Devido à aplicabilidade do critério de Mohr-Coulomb em análises de estabilidade de taludes e visto que a maioria dos softwares geotécnicos inclui este critério, diversas propostas foram desenvolvidas (Hoek & Brown, 1980b; Hoek, 1983; Hoek *et al.*, 1992; Hoek *et al.*, 2002) para encontrar os parâmetros equivalentes do critério de Mohr-Coulomb para maciços rochosos.

Recentemente, o trabalho de Hoek *et al.* (2002) propõe estimar os parâmetros equivalentes do critério de Mohr-Coulomb, fazendo um ajuste à curva gerada pela equação de Hoek & Brown para maciços rochosos. Este ajuste consiste em balancear a área por cima e por baixo entre as curvas dos critérios de Hoek & Brown e Mohr-Coulomb para um dado intervalo de tensão principal menor (σ'_3) definido por $\sigma_t < \sigma'_3 < \sigma'_{3max}$ (Figura 3.5).

Onde: σ_t é a resistência à tração do maciço; σ'_3 é a tensão principal efetiva menor; σ'_{3max} é a tensão principal efetiva menor máxima definida em função do tipo de obra.

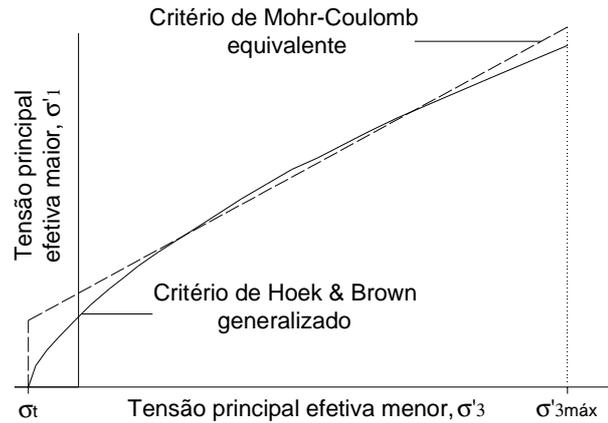


Figura 3.5 - Esquema do ajuste da envoltória de Mohr & Coulomb ao critério de ruptura de Hoek & Brown generalizado (modificado - Hoek *et al.*, 2004).

O resultado do ajuste dá as seguintes expressões dos parâmetros c' e ϕ' :

$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \quad (3.9)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci}[(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma'_{3n}](s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1 + ((6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1})/((1+a)(2+a)))}} \quad (3.10)$$

Onde: $\sigma'_{3n} = \sigma'_{3max}/\sigma_{ci}$; ϕ' é o ângulo de atrito efetivo (radianos); c' é a coesão efetiva (MPa); σ'_{3max} é o limite superior da tensão de confinamento (MPa), que deve ser selecionado segundo o tipo de aplicação; m_b , s e a são parâmetros do critério de Hoek & Brown (adimensionais); σ_{ci} é a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta (MPa).

Define-se ainda σ'_{cm} (MPa) como a resistência global do maciço rochoso para um intervalo

de confinamento $\sigma_t < \sigma'_3 < \frac{\sigma_{ci}}{4}$. A Equação 3.11 permite o seu cálculo.

$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \frac{[m_b + 4s - a(m_b - 8s)] \left(\frac{m_b}{4} + s\right)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad (3.11)$$

A partir disso, o valor de σ'_{3max} (MPa) pode-se definir para três situações diferentes: aplicações gerais, em túneis e taludes. As expressões para cada caso são as seguintes:

- *Aplicações gerais*

$$\sigma'_{3max} = \sigma_{ci}/4 \quad (3.12)$$

- *Aplicação em túneis*

$$\sigma'_{3max} = 0,47\sigma'_{cm}(\sigma'_{cm}/\gamma H)^{-0,94} \quad (3.13)$$

- *Aplicação em taludes*

$$\sigma'_{3max} = 0,72\sigma'_{cm}(\sigma'_{cm}/\gamma H)^{-0,91} \quad (3.14)$$

Onde: H (m) na Equação 3.13 é a profundidade do túnel desde a superfície e na Equação 3.14 é a altura do talude e γ (MN/m³) é o peso específico do maciço rochoso.

Normalmente, a aplicação geral ajusta a envoltória de Mohr-Coulomb para um intervalo de σ'_3 definido por um σ'_{3max} maior quando comparado aos valores de σ'_{3max} obtidos nas aplicações para tuneis e taludes. Assim, ao ajustar a envoltória de Mohr-Coulomb nas aplicações para tuneis e taludes é obtido um ângulo de atrito maior em relação ao ângulo de atrito obtido ao ajustar este critério para a aplicação geral.

3.4 DEFORMABILIDADE EM MACIÇOS ROCHOSOS

O módulo de deformabilidade do maciço rochoso (E_m) é um parâmetro de entrada de fundamental importância em qualquer análise que estude o comportamento tensão *versus*

deformação em um maciço rochoso (Hoek & Diederichs, 2006). A necessidade deste tipo de análise é refletida em obras tais como barragens, onde o recalque da fundação devido ao peso próprio da barragem vai depender dos parâmetros de deformabilidade da fundação. Em projetos de túneis, o conhecimento da expansão ou convergência da cavidade permite estabelecer o suporte adequado. Da mesma forma, o coeficiente de Poisson (ν) é outro parâmetro relevante neste tipo de análise.

A determinação direta do módulo de deformabilidade em maciços rochosos por meio de ensaios *in situ* demanda alto valor operacional e tempo e pode não refletir a deformabilidade do maciço rochoso, devido à questionável confiabilidade dos resultados. Entre os ensaios em campo mais comuns para obter o módulo de deformabilidade, encontram-se o ensaio de carga sobre placa, o ensaio com dilatômetro, o ensaio de macaco plano e os ensaios sísmicos ou dinâmicos.

Devido às dificuldades associadas à execução de ensaios para obter o módulo de deformabilidade do maciço rochoso, foram propostas correlações empíricas entre o módulo de deformabilidade e diversas classificações geomecânicas (Bieniawski, 1978; Serafim & Pereira, 1983; Grimstad & Barton, 1993; Hoek *et al.*, 2002; Hoek & Diederichs, 2006), tais como índice do maciço rochoso (*RMR*), índice de qualidade (*Q*) e o índice de resistência geológica (*GSI*). Deste modo, facilita-se o trabalho de projetistas, bem como se contribui para a redução de custos. A Tabela 3.3 mostra as principais propostas para estimar o módulo de deformabilidade do maciço rochoso.

Tabela 3.3 - Principais propostas para determinar o módulo de deformabilidade de maciços rochosos (Maia, 2007).

<i>Autores</i>	<i>Equações</i>	<i>Considerações</i>
Bieniawski (1978)	$E_m(GPa) = 2RMR - 100$	$RMR > 50$
Serafim & Pereira (1983)	$E_m(GPa) = 10^{\left(\frac{RMR-10}{40}\right)}$	$RMR < 50$
Grimstad & Barton (1993)	$E_m(GPa) = 25 \log(Q)$	$Q > 1$
Hoek & Brown (1997)	$E_m(GPa) = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)}$	$\sigma_{ci} \leq 100 \text{ MPa}$
Hoek <i>et al.</i> (2002)	$E_m(GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)}$	$\sigma_{ci} \leq 100 \text{ MPa}$

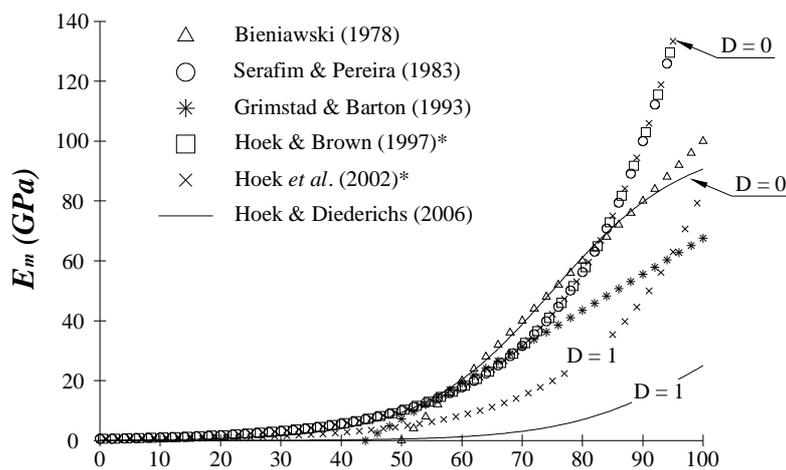
Mais recentemente, Hoek & Diederichs (2006), baseados em dados de numerosos ensaios de placa *in situ* na China e em Taiwan, propuseram duas equações empíricas para estimar o

módulo de deformabilidade de maciços rochosos isotrópicos. A primeira equação é denominada a equação simplificada de Hoek & Diederichs. Esta equação incorpora o fator de perturbação (D) e o índice de resistência geológica (GSI) e é dada por:

$$E_m = 100000 \left((1 - D/2) / (1 + \exp^{((75+25D-GSI)/11)}) \right) \quad (3.15)$$

Onde: E_m é o módulo de deformabilidade do maciço rochoso (MPa); D é o fator de distúrbio do maciço; GSI é o índice de resistência geológica.

A Figura 3.6 compara a equação simplificada de Hoek & Diederichs frente às equações apresentadas na Tabela 3.3. Pode-se observar que, devido ao fator de perturbação (D), a equação simplificada de Hoek & Diederichs possibilita uma maior abrangência de valores para o módulo de deformabilidade do maciço rochoso.



* Curvas calculadas para $\sigma_{ci} = 100$ MPa.

Figura 3.6 - Comparação entre diversas propostas para estimar o módulo de deformabilidade em um maciço rochoso (Maia, 2007).

A segunda equação é chamada equação detalhada de Hoek & Diederichs e incorpora como novidade o módulo da rocha intacta. Esta equação é dada por:

$$E_m = E_i \left(0,02 + \left((1 - D/2) / (1 + \exp^{((60+15D-GSI)/11)}) \right) \right) \quad (3.16)$$

Onde: E_i é o módulo de deformabilidade da rocha intacta (MPa).

Hoek & Diederichs (2006) recomendam utilizar esta expressão sempre que existam dados

confiáveis do módulo de deformabilidade da rocha intacta.

3.5 RESISTÊNCIA DE ROCHAS E MACIÇOS INTEMPERIZADOS

Tal como foi comentado em seções anteriores, o intemperismo é um agente que pode gerar mudanças significativas nas diversas propriedades da rocha e, conseqüentemente, nas propriedades do maciço rochoso.

A ação do intemperismo transforma progressivamente a rocha sã em solo. Assim, as propriedades de resistência da rocha sã apresentam um decaimento progressivo até chegar à resistência do solo.

Considerando o anterior, conforme a matriz rochosa é alterada devido ao intemperismo, é de se esperar que as propriedades do maciço rochoso sejam alteradas também, sendo diferentes as propriedades entre um maciço rochoso composto por uma matriz rochosa sã e por uma matriz rochosa intemperizada. Deste modo, as propriedades do maciço rochoso também tendem a diminuir conforme o grau do intemperismo aumenta (Figura 3.7).

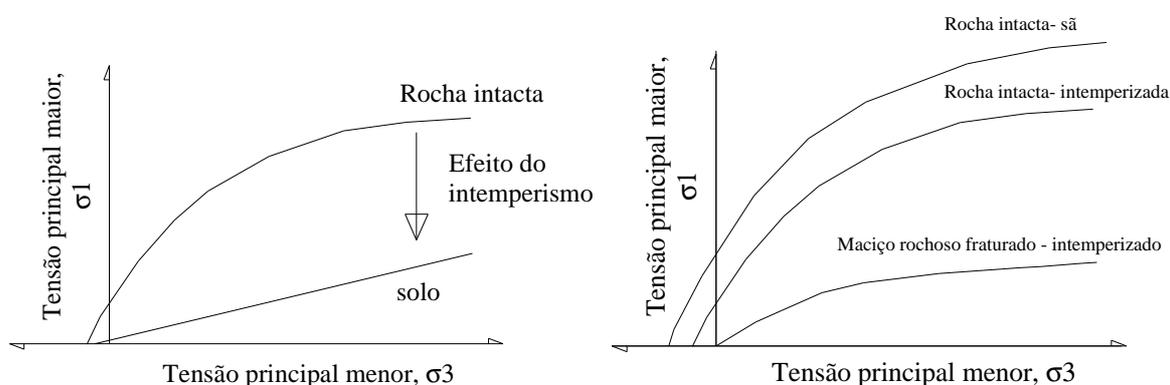


Figura 3.7 - Resistência da rocha e de maciços intemperizados.

Devido às dificuldades para obter os parâmetros de resistência do maciço rochoso por meio de ensaios, devem ser desenvolvidas metodologias que permitam migrar das propriedades de resistência da matriz rochosa intemperizada para as propriedades do maciço rochoso intemperizado. Neste sentido a adequação e a aplicação criteriosa do critério de Hoek & Brown pode ser um ponto de partida, lembrando que, no outro extremo, o critério de Mohr-Coulomb se aplica à resistência de materiais completamente intemperizados (solo).

Caso de Estudo

A metodologia sobre o estudo de maciços rochosos intemperizados é aplicada nos dados provenientes da caracterização do maciço rochoso pertencente a um aproveitamento hidrelétrico localizado no rio São Marcos, na divisa dos estados de Minas Gerais e Goiás. A usina é composta por um barramento de concreto na margem esquerda do rio (segundo a direção de montante a jusante) e uma barragem geotécnica na margem direita do rio. A Figura 4.1 mostra a localização da obra e seus principais componentes. A seguir, são descritas algumas características do empreendimento.

A barragem geotécnica é mixta, com núcleo argiloso compactado e espaldares com material *random*. A altura máxima da barragem é de 50 m. O material do núcleo é obtido em áreas de empréstimo e o material dos espaldares é proveniente das escavações obrigatórias e de áreas de empréstimo.

O vertedouro é constituído por comportas e por uma calha com saída em salto esquí. Esta estrutura é em concreto, tendo, a jusante, a escavação de uma fossa para controle da erosão.

O circuito de geração é composto por um canal de aproximação à tomada d'água de adução, uma estrutura de tomada d'água, um túnel de adução, uma casa de força e um canal de fuga.

O circuito de desvio do rio está formado por ensecadeiras, por um canal de aproximação à tomada de d'água de desvio, por um túnel de desvio e por um canal de restituição. O desvio do rio permite realizar a execução de construção do barramento no leito do rio.

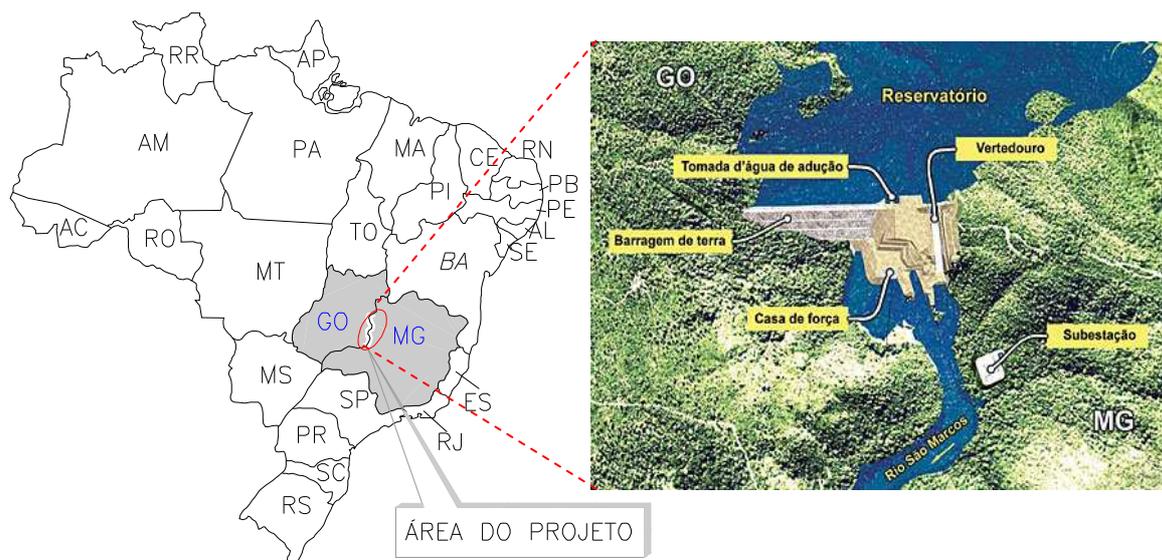


Figura 4.1 - Localização do empreendimento (Foto: Furnas, 2010).

4.1 GEOLOGIA LOCAL E REGIONAL

Em relação às informações geológicas regionais, a área de estudo está localizada na Faixa Brasília, a qual corresponde a uma sequência de rochas metamórficas de baixo a alto grau, sequências ígneas intrusivas e volcano-sedimentares. Esta região passou por dois principais eventos de esforços atuantes, o primeiro extensivo e o posterior compressivo (Furnas, 2006).

Os principais litotipos presentes no eixo e no entorno do empreendimento se referem a filitos, a filitos grafitosos e a quartzitos. Fazem parte também do contexto geológico global coberturas de solos residuais e/ou colúviais, além de depósitos inconsolidados, formados por aluviões e coluviões. Estes litotipos se apresentam em lentes e bandas intercaladas entre si, com espessuras variando de milímetros a alguns metros. Estas rochas são pré-cambrianas, atribuídas ao Grupo Canastra (Figura 4.2).

O maciço é intensamente dobrado (dobras de pequenas amplitudes) e fraturado (principalmente por planos paralelos à foliação e por famílias de descontinuidades subverticais), indicando que os esforços compressivos da fase posterior ocorreram inicialmente e, de forma geral, no domínio do comportamento dúctil das rochas e, na fase final, no domínio do comportamento rúptil, gerando o surgimento das famílias de descontinuidades.

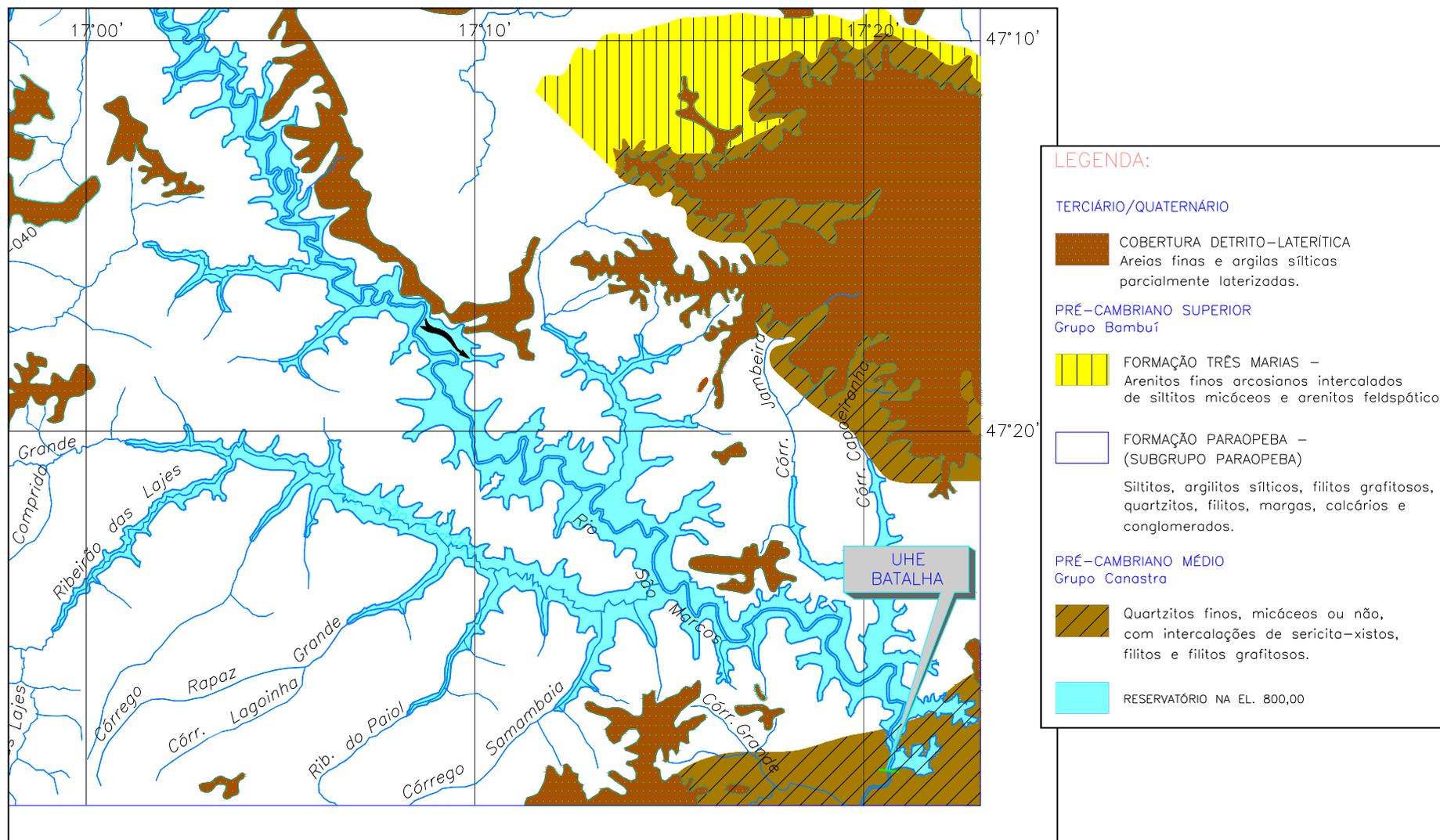


Figura 4.2 - Mapa geológico regional (Furnas, 2006).

As investigações com sondagens mostraram que o intemperismo em profundidade se dá acompanhando a anisotropia do maciço (por planos preferenciais), dada principalmente pela foliação. Portanto, o intemperismo não ocorre de forma uniforme com a profundidade.

4.2 MORFOLOGIA

O local de estudo se situa nas subunidades Superfícies Aplainadas e Planalto Tocantins – Paranaíba, que fazem parte da unidade geomorfológica Planalto Central Goiano. O Planalto Central Goiano está inserido no domínio dos Planaltos de Estruturas Dobradas (Furnas, 2006).

O eixo da barragem, com direção aproximada N42°E, situa-se em um trecho estrangulado de uma curva do rio São Marcos, em um vale assimétrico, oriundo das diferentes composições litológicas das ombreiras.

A ombreira esquerda apresenta uma declividade acentuada, já, a ombreira direita apresenta uma declividade suave. A ombreira esquerda, a partir da margem do rio, apresenta uma inclinação da ordem de 50° até uma distância de 45 m, passando logo para uma inclinação suave, da ordem de 5°. A ombreira direita apresenta uma inclinação mais homogênea e suave, da ordem de 10°.

A declividade mais íngreme na ombreira esquerda é atribuída à maior concentração de camadas e lentes de quartzito em comparação com a ombreira direita, onde há uma forte predominância de filito. Isto indica que, devido à composição litológica, a ombreira esquerda apresenta melhores características contra o desenvolvimento da erosão em relação à ombreira direita. Por isso, foi selecionada a ombreira esquerda para apoiar a barragem de concreto e suas respectivas obras, tais como o vertedouro, a casa de força, o circuito de adução, entre outras.

4.3 DESCONTINUIDADES

Os estudos referentes às descontinuidades indicam que, no local da obra, podem ser identificadas as seguintes feições estruturais: foliações, lineações de estiramento, zonas de cisalhamento dúcteis subverticais, dobras e famílias de juntas. Cabe dizer que não foi detectada a presença de falhas no sítio do empreendimento.

No entanto, definiu-se que a foliação seria a única feição que eventualmente poderia comprometer a estabilidade das diferentes obras executadas no empreendimento,

configurando-se como a principal feição no local da obra e caracterizando-se como uma estrutura planar proeminente e onipresente. Nos filitos, caracteriza-se como uma foliação milonítica, o que se refere ao arranjo preferencial dos minerais, produzido pelo fluxo plástico durante o cisalhamento dúctil, o que define uma rocha finamente laminada. Nos quartzitos, a foliação é dada por um bandeamento que se conforma por faixas milimétricas a centimétricas.

Para fazer o levantamento das orientações das discontinuidades, foi medida a direção do mergulho (α) e o ângulo de mergulho (β), sendo expressa a orientação como α/β . Devido ao grande número de dados levantados, foi necessário representar a orientação das discontinuidades por meio dos seus pólos.

Na Figura 4.3, mostra-se o estereograma de pólos da foliação na ombreira esquerda do maciço de estudo (local onde estão apoiadas a barragem e obras de concreto), onde, apesar da dispersão dos dados, observa-se a projeção (vermelho) de duas concentrações de pólos com atitudes $289^\circ/30^\circ$ (principal) e $225^\circ/28^\circ$ (secundária). Para isto, foram mapeadas 45 discontinuidades (pólos) nesta região.

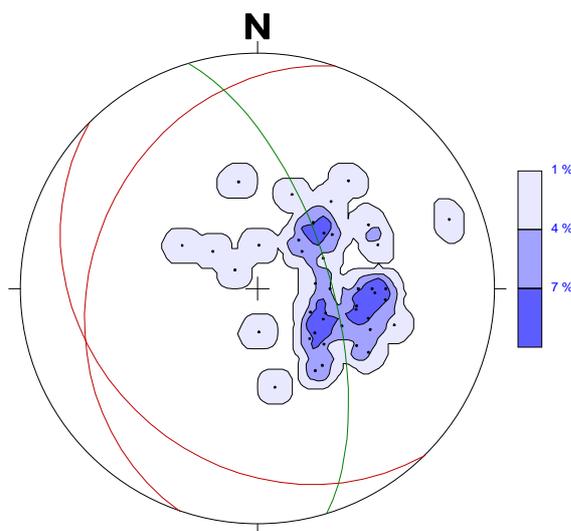


Figura 4.3 - Estereograma da orientação dos sistemas de foliação mais representativos da ombreira esquerda (projeções em vermelho). (Furnas, 2006).

Apesar de existir um sistema principal de foliação, as medidas das atitudes dos planos de foliação na área do barramento se mostraram bastante dispersas, devido à interpenetração das diferentes litologias.

Isso pode ser explicado pelo fluxo deformacional sofrido pelo maciço rochoso, onde as rochas menos resistentes fluem contornando os corpos de rocha mais resistentes, gerando variações

locais na direção da foliação em relação à tendência regional. Aliado ao anterior, a intensa ocorrência de dobras também contribui para a grande variabilidade da orientação da foliação a nível local (Figura 4.4).

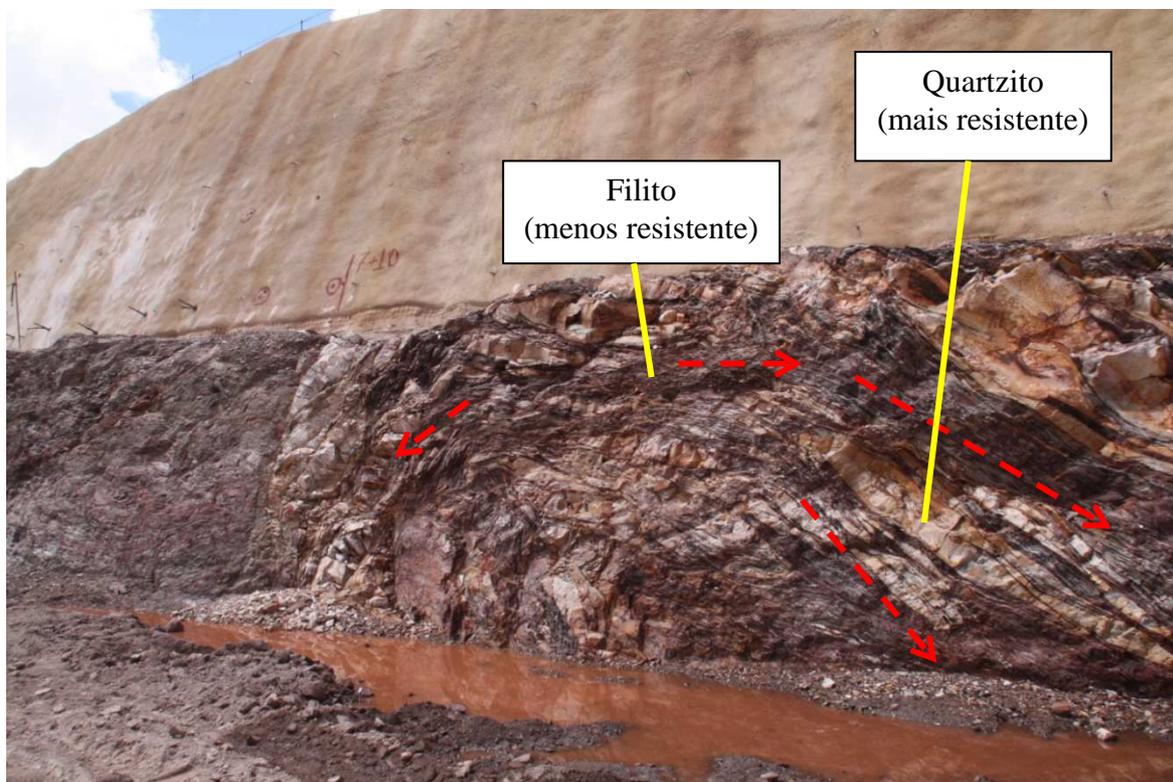


Figura 4.4 - Efeito da interpenetração das litologias e das dobras na orientação da foliação, na ombreira esquerda do maciço.

É, portanto, que, à luz das observações realizadas em campo, constata-se que a orientação da foliação na ombreira esquerda apresenta um padrão disperso e caótico. Recomendações são feitas para avaliar localmente, para cada obra (exemplo: escavação de taludes), se a orientação da foliação é favorável ou desfavorável à estabilidade.

Ressalta-se que, em função da contínua alternância de camadas de filitos, filitos grafitosos e quartzitos, do padrão irregular no qual o intemperismo se dá, da anisotropia conferida pela foliação e da dispersão da orientação das discontinuidades; o maciço rochoso de estudo se configura em um quadro geológico extremamente complexo. Isso gera dificuldades, tanto na modelagem e previsão do comportamento estrutural e geomecânico, tornando difíceis e aproximadas as tentativas de interpolação de dados a partir de sondagens ou de observações visuais e gerando uma grande variabilidade em qualquer propriedade medida na matriz rochosa.

Finalmente, o modo dominante de ruptura é dado pelo maciço e não através dos planos de

xistosidade. Isto ocorre devido ao comportamento dúctil do maciço e ao intenso dobramento que previne a formação de planos de descontinuidades persistentes. Eventualmente podem aparecer zonas onde a estabilidade é controlada pelas descontinuidades (planos de foliação), neste caso a resistência da descontinuidade deve ser avaliada por critérios como Barton & Choubey (1977) ou por meio de ensaios de cisalhamento na descontinuidade.

Aplicação da Metodologia ao Caso de Estudo

Neste capítulo, descrevem-se a metodologia, os procedimentos, os equipamentos e os resultados obtidos na caracterização dos parâmetros geomecânicos do maciço rochoso da ombreira esquerda do caso de estudo. Entre as atividades desenvolvidas na metodologia para chegar ao objetivo proposto, encontram-se:

- A descrição do processo de amostragem;
- A caracterização da matriz rochosa considerando o efeito do intemperismo;
- A estimativa dos parâmetros geomecânicos do maciço rochoso utilizando a metodologia *GSI* de Hoek;
- A estimativa direta dos parâmetros geomecânicos do maciço rochoso por meio de ensaios em blocos representativos;
- A calibração da metodologia *GSI* de Hoek.

Cabe destacar que os convênios entre a pós-graduação de geotecnia da UnB e Furnas possibilitaram o acesso às informações pertencentes ao projeto do caso de estudo, tais como mapas, ensaios em rocha, logs de sondagens, entre outros (Furnas, 2006; Furnas, 2007; Furnas, 2009). Estas informações foram o ponto de partida para realizar as seguintes análises.

5.1 INVESTIGAÇÃO E AMOSTRAGEM

O local do empreendimento conta com um considerável volume de informações obtidas por meio de sondagens de diversos tipos, tais como sondagens rotativas, sondagens a percussão, sondagens mistas e sondagens com amostragem integral.

Estas sondagens foram realizadas em quatro campanhas (1985, 2002, 2005 e 2006), totalizando, aproximadamente, 2200 m perfurados. A Figura 5.1 mostra a localização das sondagens realizadas no empreendimento e se pode observar que estas estão concentradas na área da ombreira esquerda do barramento.

Além das sondagens, outros tipos de investigações foram executados no maciço, tais como trincheiras e poços de inspeção, mapeamentos geológicos e estruturais, ensaios geofísicos (sísmicos e elétricos) e levantamentos topográficos. Estas investigações serviram para estabelecer o modelo geológico/geotécnico do maciço.

A descrição dos testemunhos de rocha foi feita por técnicos de Furnas, os quais caracterizaram o tipo de litologia, a porcentagem de recuperação, o grau de alteração, coerência e fraturamento, o *RQD (Rock quality designation)*, a perda d'água, entre outras informações. Estes dados foram registrados em perfis de sondagens. No apêndice A, são apresentados os perfis de sondagens utilizados na presente pesquisa.

Os perfis de sondagens foram úteis principalmente para associar o grau de intemperismo (grau de coerência e alteração) às diversas amostras ensaiadas para a caracterização da rocha. Isto foi possível visto que cada amostra estava registrada com a identificação do furo e com a profundidade na qual foi obtida. Assim, para cada litotipo, os resultados foram agrupados segundo o grau de intemperismo, visando fazer observações posteriores.

Cabe dizer que só em um caso excepcional não houve acordo com a classificação do intemperismo outorgada pelo técnico de Furnas. Esta inconformidade está relacionada com o perfil de sondagem 105 no trecho 3,13-6,62 m, onde relaciona a um quartzito os graus de intemperismo A3/C3 e A2/C2 ao longo deste trecho, sendo que ele mesmo descreve o material como: *Quartzito- brando, friável de cor branca e coerência baixa (esfarela ao toque digital)*. Já a luz dos resultados desta amostra para diferentes propriedades e atendendo à descrição do material feita pelo técnico de Furnas (Tabela 2.4), optou-se por modificar neste trecho o grau de intemperismo do quartzito para C4/A3.

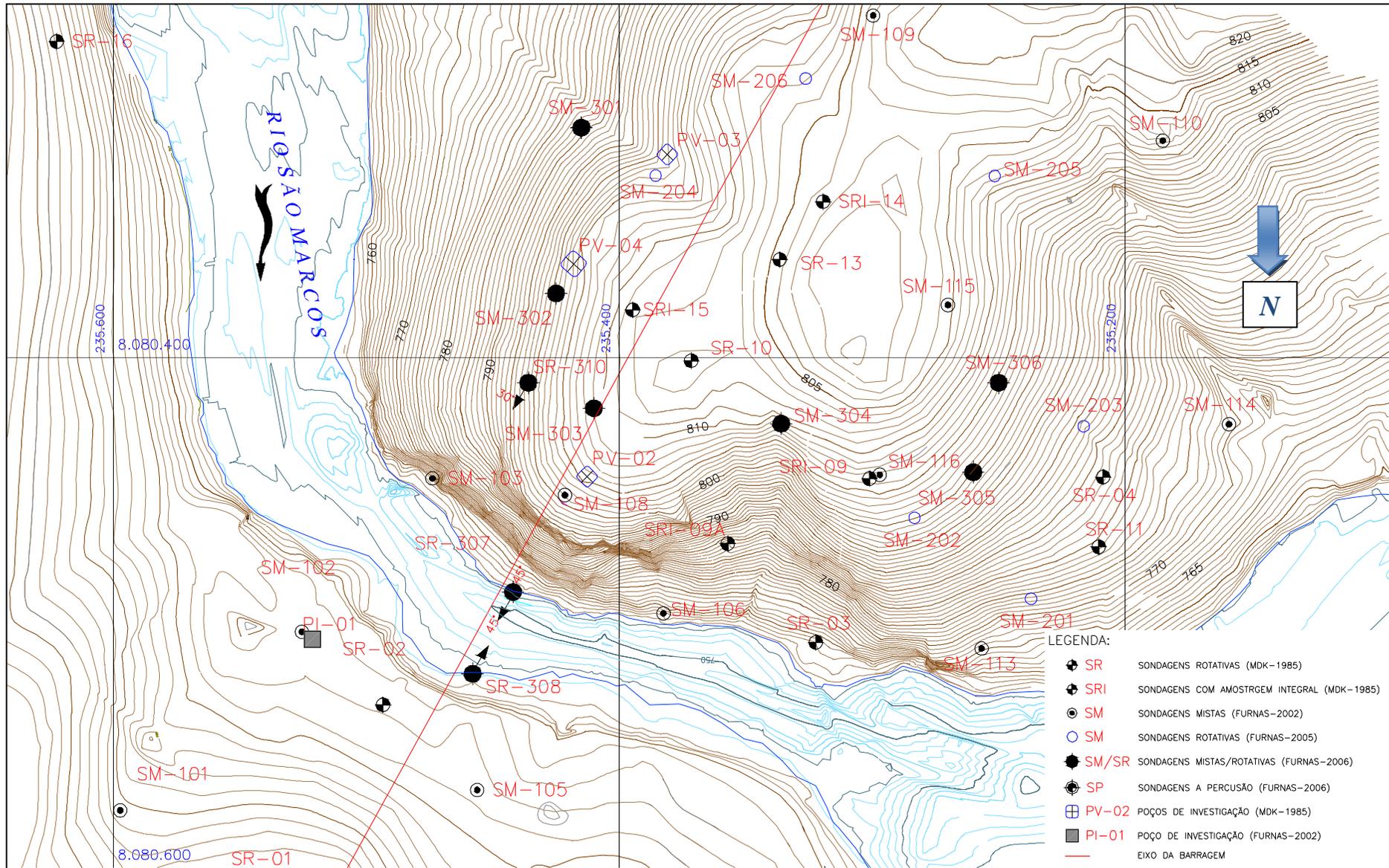


Figura 5.1 - Localização das sondagens (Furnas, 2006)

5.2 CARACTERIZAÇÃO DA MATRIZ ROCHOSA

Nesta seção, são apresentados os ensaios, os procedimentos e os equipamentos que foram utilizados para a caracterização da rocha intacta ou matriz rochosa dos diferentes litotipos encontrados no local do empreendimento. Estes ensaios foram executados no decorrer das etapas de projeto básico e executivo.

As amostras e testemunhos de rochas foram enviados ao Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas, localizado em Aparecida de Goiânia Goiás. para a realização dos diversos ensaios. A amostragem foi de responsabilidade e de Furnas.

Entre as propriedades medidas e estimadas para a matriz rochosa, encontram-se: identificação de minerais por petrografia e difração de raios X, porosidade aparente, absorção aparente, massa específica seca e saturada, índice de vazios, velocidade sônica, índice de carga puntiforme, resistência à compressão uniaxial, módulo de deformabilidade, coeficiente de Poisson, índice do esclerômetro de Schmidt, resistência à tração indireta por ensaio brasileiro, resistência ao cisalhamento direto e resistência à compressão triaxial.

5.2.1 DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA

As análises petrográficas foram realizadas segundo procedimentos estabelecidos na norma NBR-7389/92 e no Sistema de Gestão da Qualidade do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas.

Estas análises foram realizadas no laboratório de Furnas a partir de lâminas delgadas de rocha confeccionadas sobre porta-amostra de vidro, com aproximadamente 30 µm de espessura. Foi empregado o microscópio de luz transmitida, marca LEICA, modelo ORTHOLUX II POL-BK (Figura 5.2).

A seguir, são apresentados os resultados das análises petrográficas executadas para o filito, o filito grafitoso e o quartzito com suas respectivas fotomicrografias. Devido à pouca quantidade de dados disponíveis deste tipo de ensaio, não foi possível observar a variação no conteúdo relativo dos minerais segundo o grau de intemperismo.



Figura 5.2 - Microscópio de luz transmitida para a análise petrográfica.

5.2.1.1 FILITO

A análise petrográfica da rocha, de registro 4.0029.2009, determinou-a como de natureza metamórfica, classificando como filito de cor cinza e de estrutura foliada. Por meio do exame microscópico, estimou-se a composição mineralógica em: quartzo: 80-85%; muscovita (predominante) + biotita(subordinada): 15-20%; opacos + turmalina + zircão + carbonato + epidoto: <1% (Figura 5.3). O material ensaiado corresponde a um grau de intemperismo A2/C2. Esta rocha é de granulação fina e textura lepidogranoblástica, caracterizada pela alternância de faixas lamelares descontínuas de minerais micáceos com os agregados quartzosos.

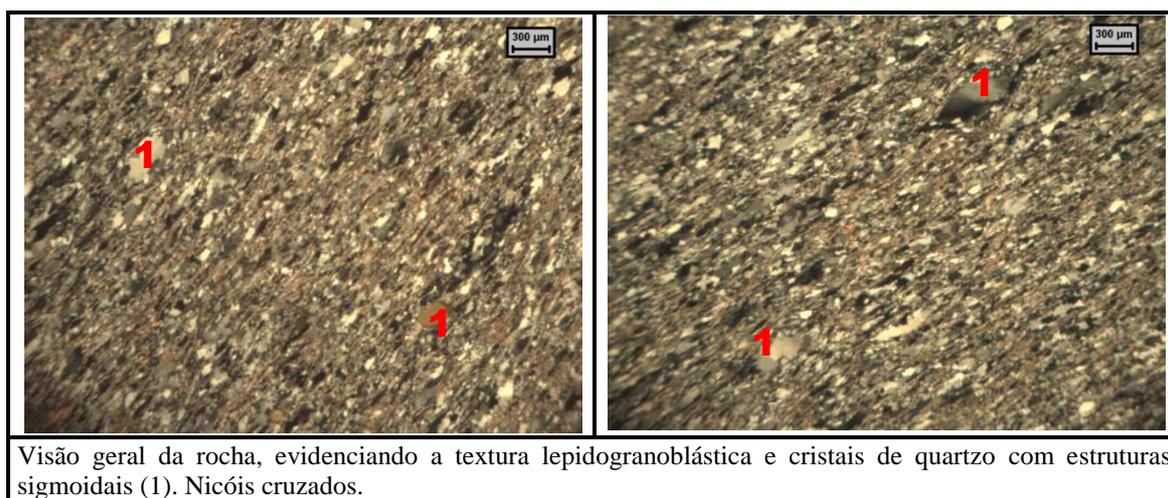


Figura 5.3 - Fotomicrografia do filito, registro: 4.0029.2009. (Furnas, 2009).

Considerando que o quartzo se encontre entre 80-85%, que a muscovita se encontre entre 15-20% e que seus valores respectivos de densidade relativa (Gs) sejam 2,65 e 2,7-3,0 (segundo os valores reportados por Goodman, 1989), é possível calcular a densidade relativa do filito

empregando a Equação 2.8. Assim, tem-se que a densidade relativa para o filito A2/C2 se encontra aproximadamente entre 2,65 e 2,70.

5.2.1.2 FILITO GRAFITOSO

A análise petrográfica da rocha, de registro 4.0021.2009, determinou-a como de natureza metamórfica, classificando como filito de estrutura foliada. Por meio do exame microscópico, estimou-se a composição mineralógica em: quartzo: 60-70%; muscovita (predominante) + clorita (subordinado) + biotita (subordinado): 30-35%; minerais opacos: 1-2%; turmalina+zircão: <1% (Figura 5.4). O material ensaiado corresponde a um grau de intemperismo A2/C2.

Esta rocha é de granulação fina e textura lepidogranoblástica, caracterizada pela alternância de faixas lamelares descontínuas de minerais micáceos intercaladas com os agregados quartzosos.

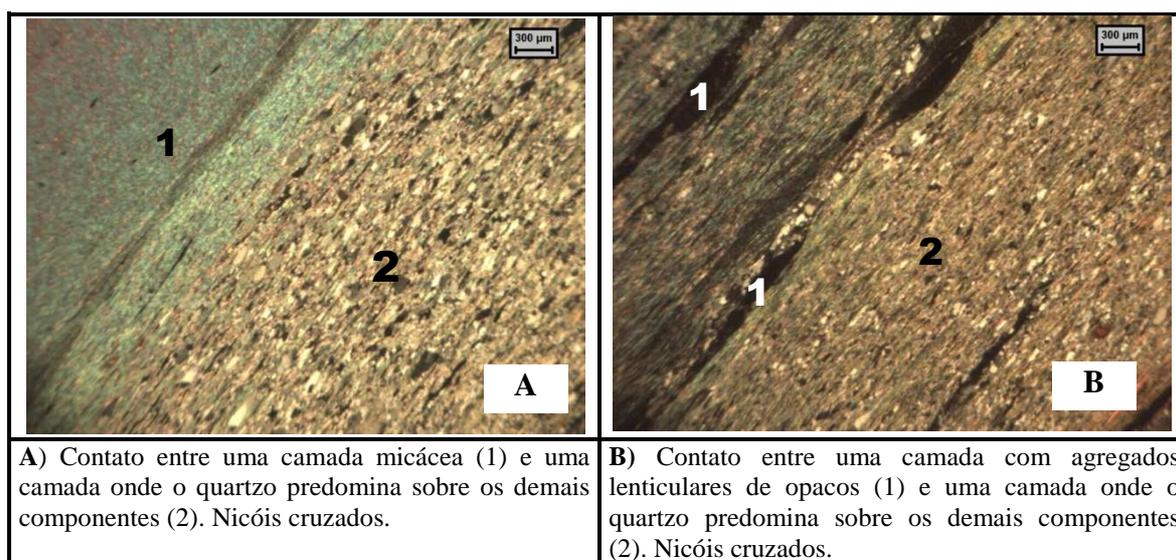


Figura 5.4 - Fotomicrografia do filito grafitoso, registro: 4.0021.2009. (Furnas, 2009).

Considerando que o quartzo se encontre em 70 %, que a muscovita se encontre em 30% e que seus valores respectivos de densidade relativa (G_s) sejam 2,65 e 2,7-3,0 (segundo Goodman, 1989), é possível calcular a densidade relativa do filito empregando a Equação 2.8. Assim, tem-se que a densidade relativa para o filito grafitoso A2/C2 se encontra aproximadamente entre 2,66 e 2,75.

5.2.1.3 QUARTZITO

A análise petrográfica da rocha, de registro 1.1326.2006, determinou-a como de natureza

metamórfica, classificando como quartzito cinza levemente esbranquiçado e de estrutura foliada. Por meio do exame microscópico, estimou-se a composição mineralógica em: quartzo: 80%; argilomineral: 15-20%; minerais opacos: 1% (Figura 5.5).

O material ensaiado corresponde a um grau de intemperismo A2/C2. A rocha tem granulação fina e textura granolepidoblástica caracterizada pela alternância de finas camadas ricas em quartzo e ricas em argilominerais orientados segundo a orientação preferencial da rocha. Os minerais opacos ocorrem como cristais cúbicos disseminados pela lâmina ou associados às camadas micáceas.



Figura 5.5 - Fotomicrografia do quartzito, registro: 1.1327.2006. (Furnas, 2009).

Considerando que o quartzo se encontre em 80%, que os argilominerais se encontrem em 20% e que seus valores respectivos de densidade relativa (G_s) sejam 2,65 e 2,6-3,0 (segundo Goodman, 1989), é possível calcular a densidade relativa do quartzito empregando a Equação 2.8. Assim, tem-se que a densidade relativa para o quartzito A2/C2 se encontra aproximadamente entre 2,64 e 2,72.

5.2.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

As análises de difração de Raios-X foram realizadas no Laboratório de Mecânica das Rochas de Furnas, em um difratômetro marca SIEMENS, modelo D5000 (Figura 5.6). As amostras foram analisadas sob voltagem 40 kV e amperagem de 40 mA, em sistema $\theta/2\theta$, com velocidade de varredura de 0,05°/s, de 2° a 70° 2θ . A fonte de energia é um filamento de tungstênio (catodo) e o tubo de raios-X é de cobre (anodo), cujos comprimentos de onda (λ)

são: $K\alpha$ 1,5418 Å e $K\beta$ 1,3922 Å.

As interpretações dos resultados foram realizadas em um computador acoplado ao difratômetro, utilizando o *software* DIFFRAC PLUS versão 2.4 de 2004 para a coleta de dados e o *software* EVA para a interpretação de dados. O *software* EVA contém um banco de dados de 2004 com 218610 padrões, entre minerais, cimento e material cerâmico.

Deve-se ressaltar, no entanto, que o limite de detecção do método, nas condições usuais de trabalho, é de 5%, ou seja, constituintes minerais que ocorram na amostra abaixo deste limite provavelmente não serão detectados. Cabe dizer que o equipamento empregado só identifica qualitativamente os minerais constituintes da amostra e não quantifica a proporção na qual se apresentam.

O processo de execução do ensaio foi o seguinte: as amostras foram secas, trituradas em moinho orbital até obtenção de 100% passante na peneira de 325 *mesh* Tyler e encaminhadas para a análise no difratômetro de raios X pelo método do pó não orientado. Este ensaio foi definido como a análise integral, visto que possui a granulometria maior e menor da fração argilosa.

Posteriormente, visando identificar os possíveis argilominerais, procedeu-se à separação do material com granulometria inferior à fração argilosa por meio de um processo de sedimentação em coluna, seguida pela preparação de três lâminas com o material resultante. Nestas lâminas, fez-se uma análise ao natural, uma análise após glicolagem (usando etileno-glicol) e outra após calcinação em 550°C.



Figura 5.6 - Equipamento de difratometria de raios X, Laboratório de Furnas.

5.2.2.1 FILITO

Foram executadas quatro análises por difração de raios X (amostra integral, fração argila ao natural, fração argila glicolada e fração argila calcinada) para cada amostra de filito, sendo que, neste caso, têm-se duas amostras com diferente grau de intemperismo. Desde a Figura 5.7 até a Figura 5.10, apresentam-se os resultados da análise integral e acumulada para as rochas com registro 4.0029.2009 e 4.0283.2006. Já na Tabela 5.1, compilam-se as informações pertinentes às amostras ensaiadas e aos resultados obtidos.

Tabela 5.1 - Amostras e resultados da difração em raios X para o filito.

<i>Registro</i>	<i>ID. Furo de sondagem</i>	<i>Profundidade (m)</i>	<i>Litotipo</i>	<i>Coerência</i>	<i>Alteração</i>	<i>Mineral principal</i>	<i>Mineral subordinado</i>
4.0029.2009	SR-06 Pedreira 8	32,00 a 32,60	Filito	2	2	Quartzo	Muscovita e clorita
4.0283.2006	SM-105	15,00 a 15,50	Filito	4	4	Quartzo muscovita e montmorilonita	Caulinita e ilita

Dos resultados obtidos, observa-se que o filito com grau de intemperismo A2/C2 apresenta como mineral principal o quartzo e como minerais subordinados a muscovita e a clorita. Já o filito com grau de intemperismo A4/C4 (material com maior grau de intemperismo) apresenta como minerais principais o quartzo, a muscovita e a montmorilonita, e como minerais subordinados a caulinita e a ilita (estes foram detectados na fração argila).

Isto indica uma mudança mineralógica deste material conforme o grau de alteração, a qual é evidenciada pelo aparecimento de argilominerais (montmorilonita + caulinita + ilita). A caulinita e a ilita são produtos da alteração da muscovita e da clorita, enquanto a montmorilonita é um produto de alteração da ilita.

Observa-se que os resultados das análises de petrografia e de difração de raios X para o filito A2/C2 são compatíveis, coincidindo em que o quartzo é o mineral principal e que os minerais micáceos estão representados em maior medida pela muscovita. Porém, é notável uma diferença: a análise petrográfica identificou traços de biotita, enquanto a análise de difratometria em raios X identificou traços de clorita, sendo esta um mineral formado como produto da alteração da biotita.

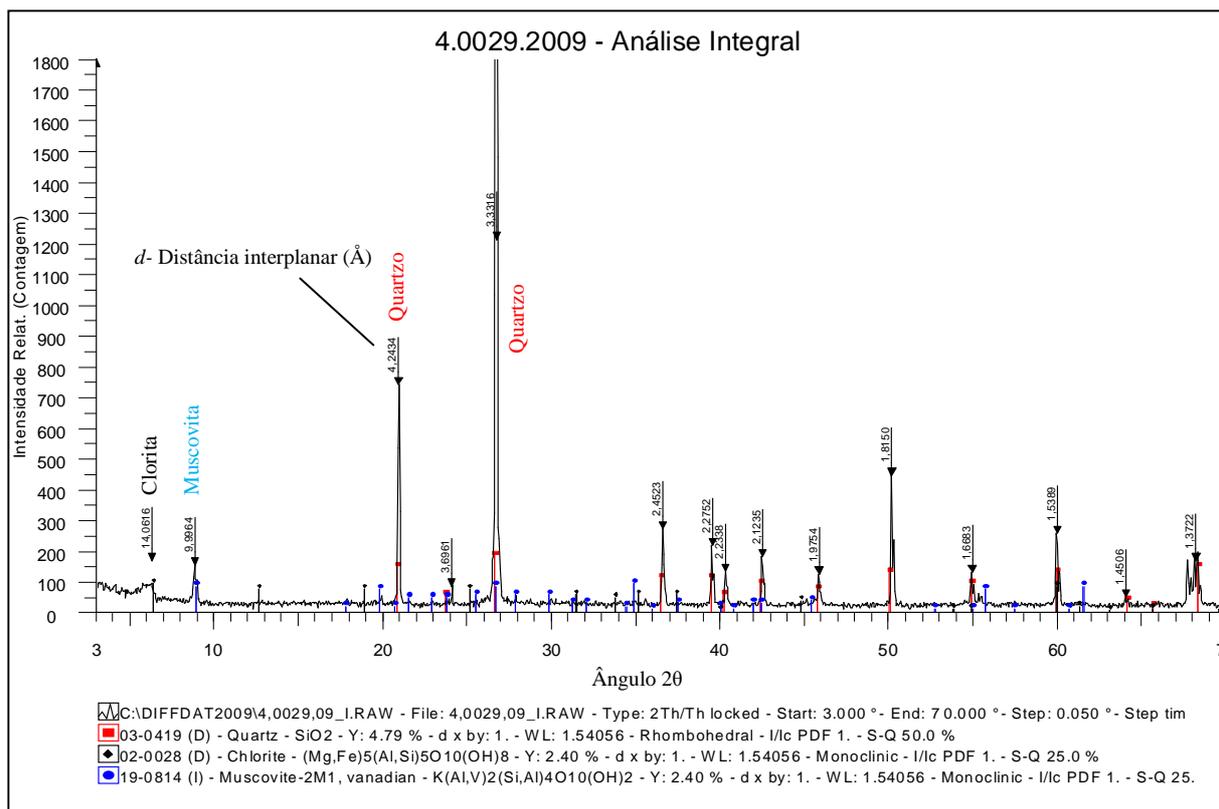


Figura 5.7 - Difratoograma da amostra 4.0029.2009 – Análise Integral filito C2/A2. (Furnas, 2009).

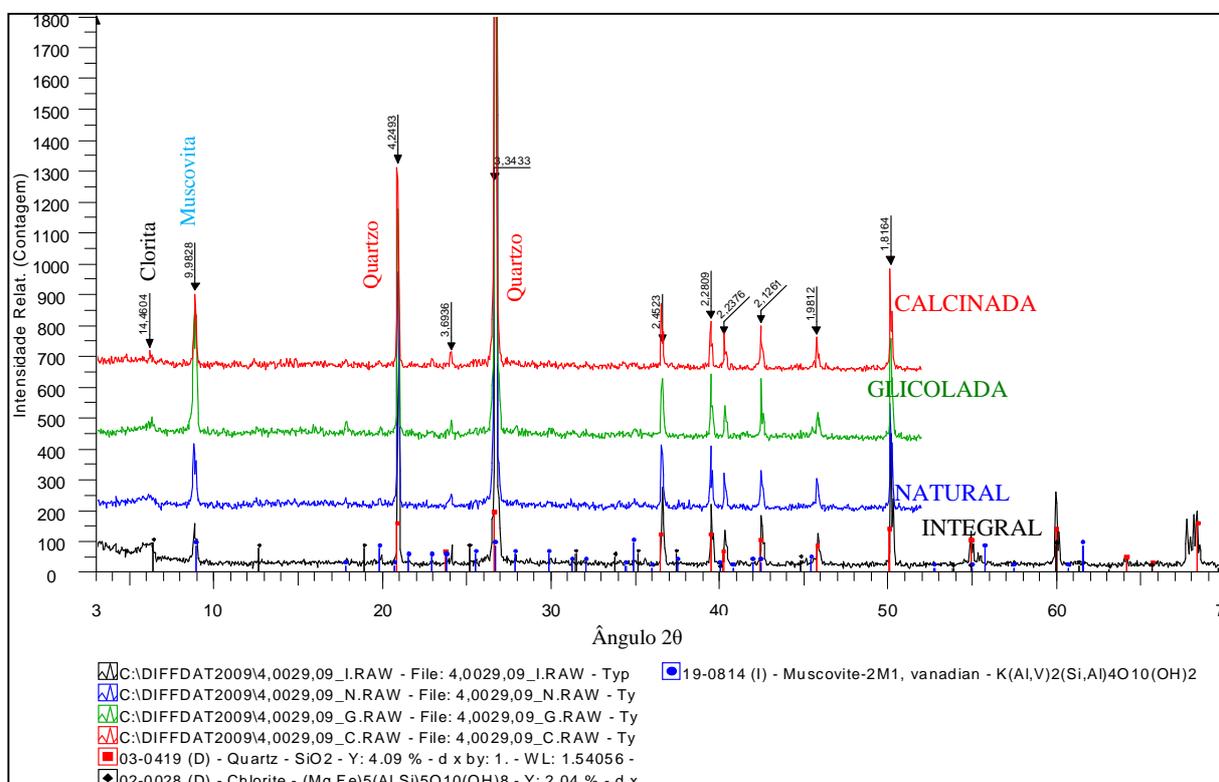


Figura 5.8 - Difratoograma da amostra 4.0029.2009 – Análise Acumulada filito C2/A2. (Furnas, 2009).

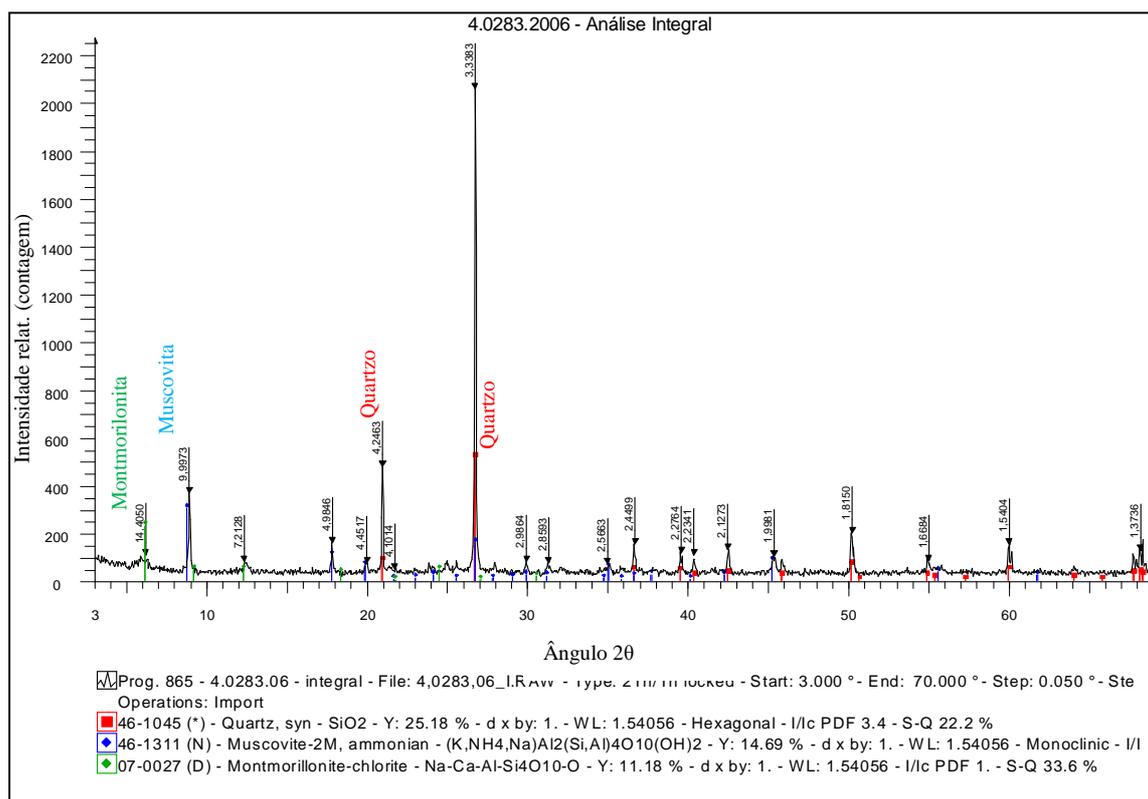


Figura 5.9 - Difratoograma da amostra 4.0283.2006– Análise Integral filito C4/A4. (Furnas, 2007).

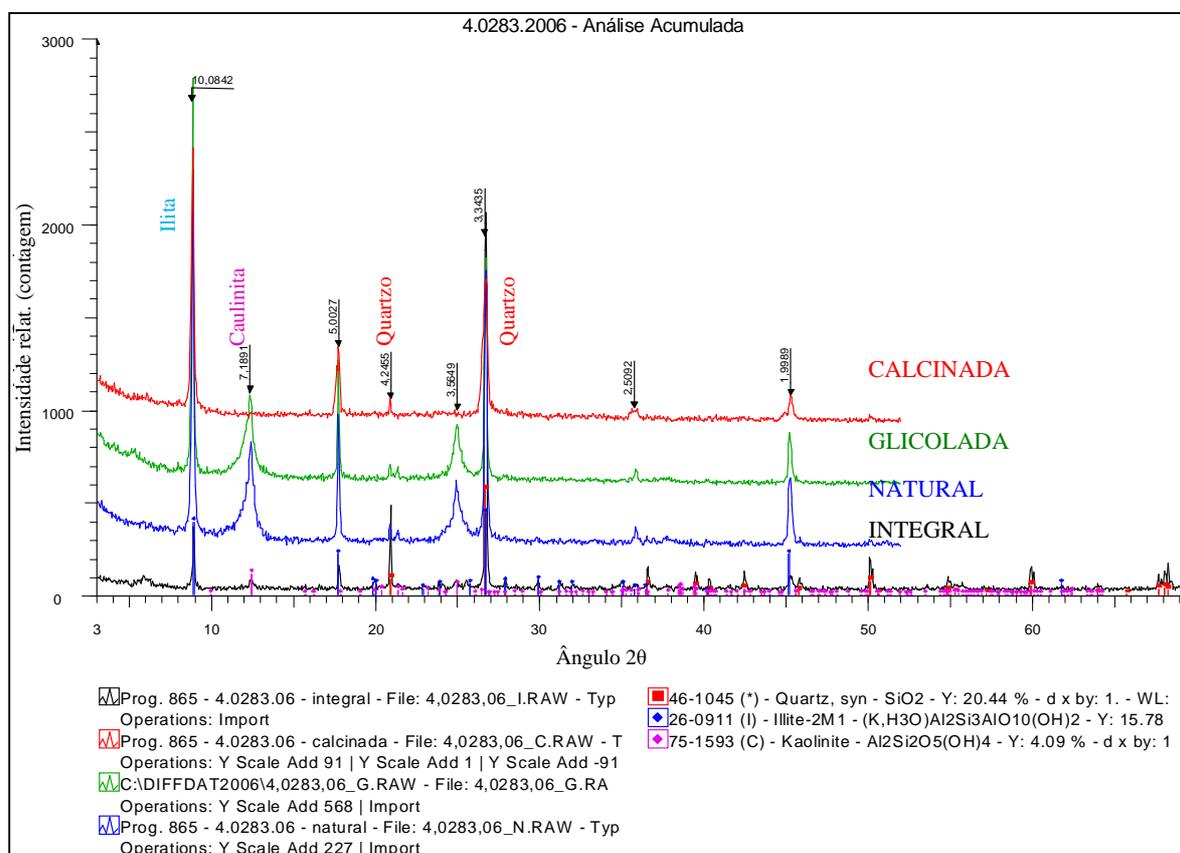


Figura 5.10 - Difratoograma da amostra 4.0283.2006– Análise Acumulada filito C4/A4. (Furnas, 2007).

5.2.2.2 FILITO GRAFITOSO

Foram executadas quatro análises por difração de raios X (amostra integral, fração argila ao natural, fração argila glicolada e fração argila calcinada) para cada amostra de filito grafitoso, sendo que neste caso têm-se três amostras com diferente grau de intemperismo. Desde a Figura 5.12 até a Figura 5.17, apresentam-se os resultados da análise integral e acumulada para as rochas com registro 4.0121.2008, 4.0120.2008 e 4.0274.2006 e, na Tabela 5.2, compilam-se as informações pertinentes às amostras ensaiadas.

Tabela 5.2 - Amostras e resultados da difração em raios X para o filito grafitoso.

<i>Registro</i>	<i>ID. Furo de sondagem</i>	<i>Profundidade (m)</i>	<i>Litotipo</i>	<i>Coerência</i>	<i>Alteração</i>	<i>Mineral principal</i>	<i>Mineral subordinado</i>
4.0121.2008	SM-115	59,00	Filito Grafitoso	2	2	Quartzo	Caulinita e muscovita
4.0120.2008	SM-115	53,50	Filito Grafitoso	3	3	Quartzo	Caulinita e muscovita
4.0274.2006	SM-109	7,33-8,30	Filito Grafitoso	4	4	Quartzo	caulinita e illita

Observa-se dos resultados apresentados que os graus de intemperismo A2/C2 e A3/C3 apresentam como mineral principal o quartzo e como minerais subordinados a caulinita e muscovita. Já para o grau de intemperismo A4/C4, é observado que os minerais subordinados passam a ser argilominerais (caulinita+illita), indicando uma possível alteração da muscovita em argilominerais (caulinita+illita) devido ao efeito do intemperismo.

É interessante ressaltar que, nas análises anteriores, a caulinita pode ser identificada em função de seu pico principal ($d = 7,10\text{\AA}$) ter desaparecido na análise calcinada, indicando colapso de sua estrutura cristalina. Também se observou certa compatibilidade entre os resultados da petrografia e da difração de raios X para o filito grafitoso de C2/A2, coincidindo em que o quartzo é o mineral primário e que a muscovita é um mineral subordinado.

É importante notar que, apesar do material ser um filito escuro, pulverulento, que suja as mãos (Figura 5.11), não foi encontrada grafita dentro dos minerais constituintes deste litotipo, tanto para a análise de petrografia, quanto para a de difração em raios X. Assim, posteriormente, veio a se confirmar, por meio de ensaios complementares realizados por Azevedo (2008), que este material corresponde a um filito carbonoso.



Figura 5.11 - Filito inicialmente identificado em campo como grafitoso, e posteriormente em laboratório como carbonoso (Foto: Malafaia, 2007).

Estes estudos confirmaram que a amostra apresenta o elemento carbono com estrutura em um estado intermediário entre matéria orgânica e grafita, ou seja, já não é mais a matéria orgânica *in natura*, porém ainda não passou por aumento de pressão e temperatura suficiente para transformar esta matéria orgânica em grafita. Isto é verificado também por outras pesquisas desenvolvidas na região, onde são enfáticos ao reconhecer este material como filito carbonoso (Silva, 1991 & Silva, 1996).

No entanto, devido a esta conclusão ser conhecida pelos profissionais do empreendimento recentemente (2008), diversas informações (*logs* de sondagens, mapas, alguns ensaios, entre outras) registram este material com o nome de filito grafitoso. Na presente pesquisa, continuar-se-á chamando este material dessa forma, ressaltando que, segundo os resultados das análises mineralógicas, este material corresponde realmente a um filito carbonoso.

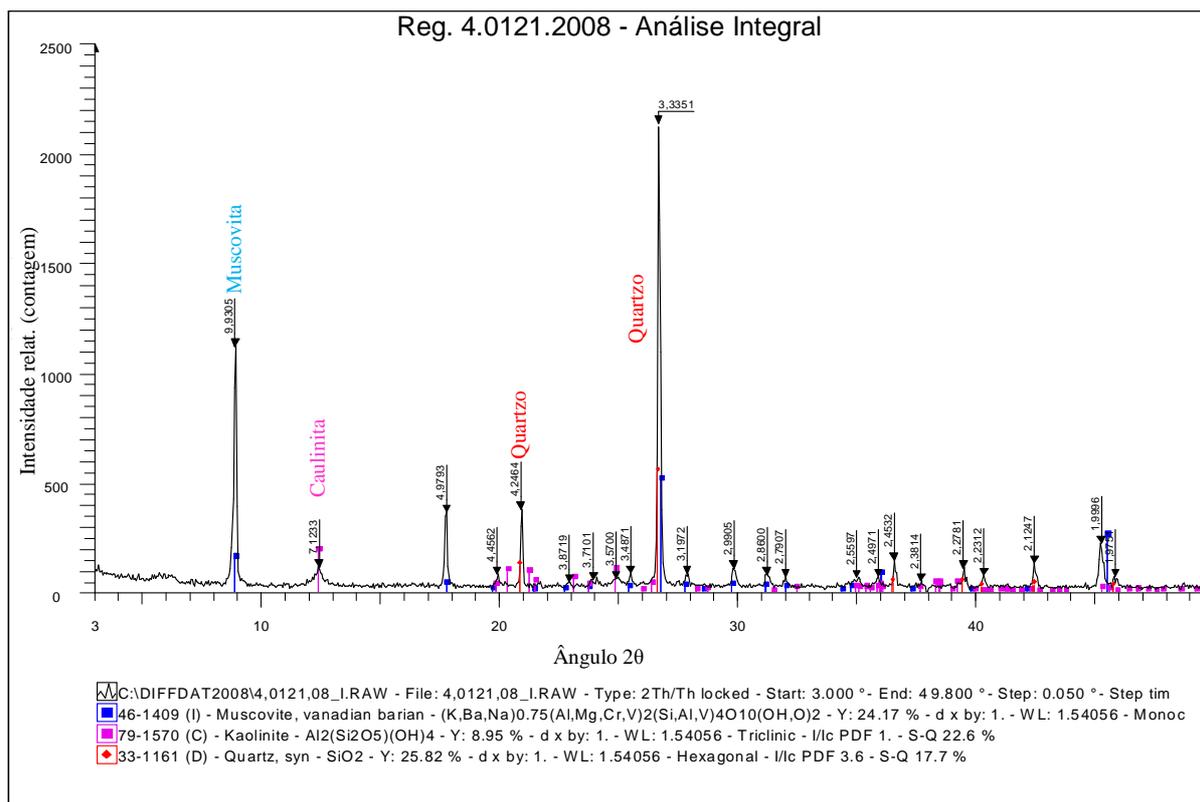


Figura 5.12 - Difratoograma da amostra 4.0121.2008 – Análise Integral filito graf. C2/A2. (Furnas, 2009).

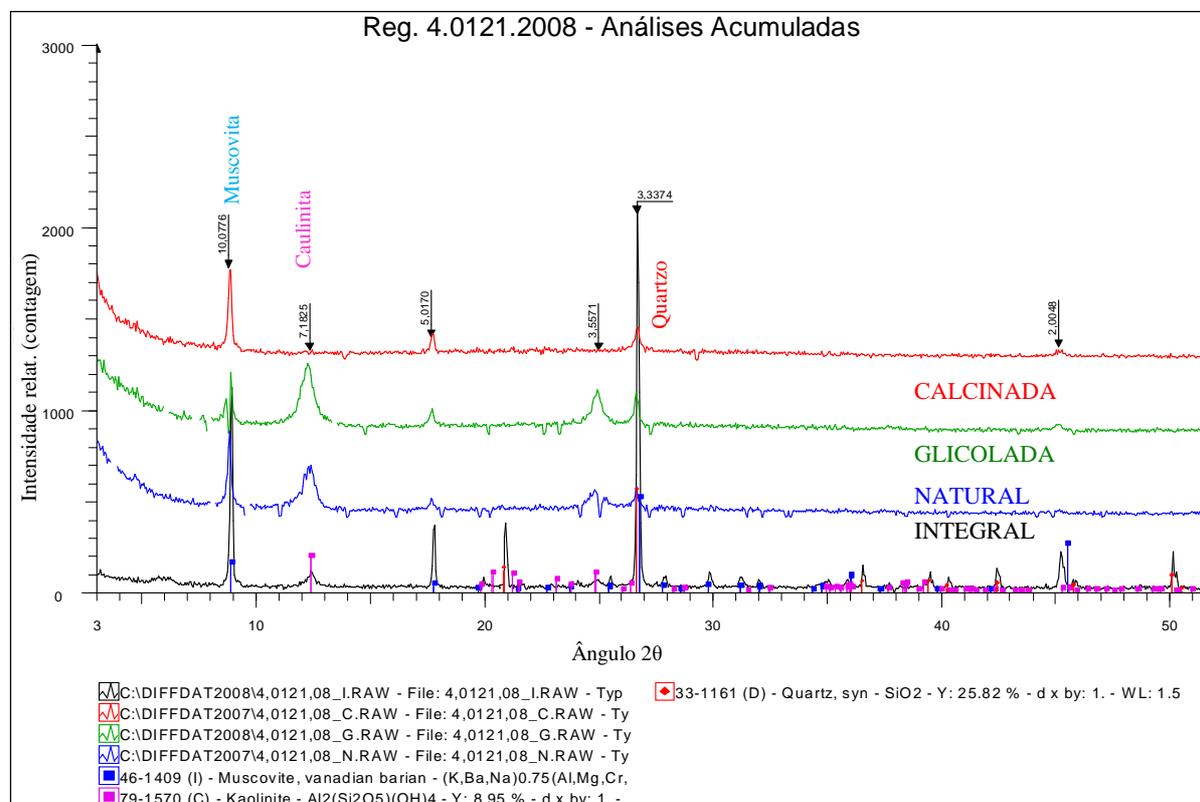


Figura 5.13 - Difratoograma da amostra 4.0121.2008 – Análise Acumulada filito graf. C2/A2. (Furnas, 2009).

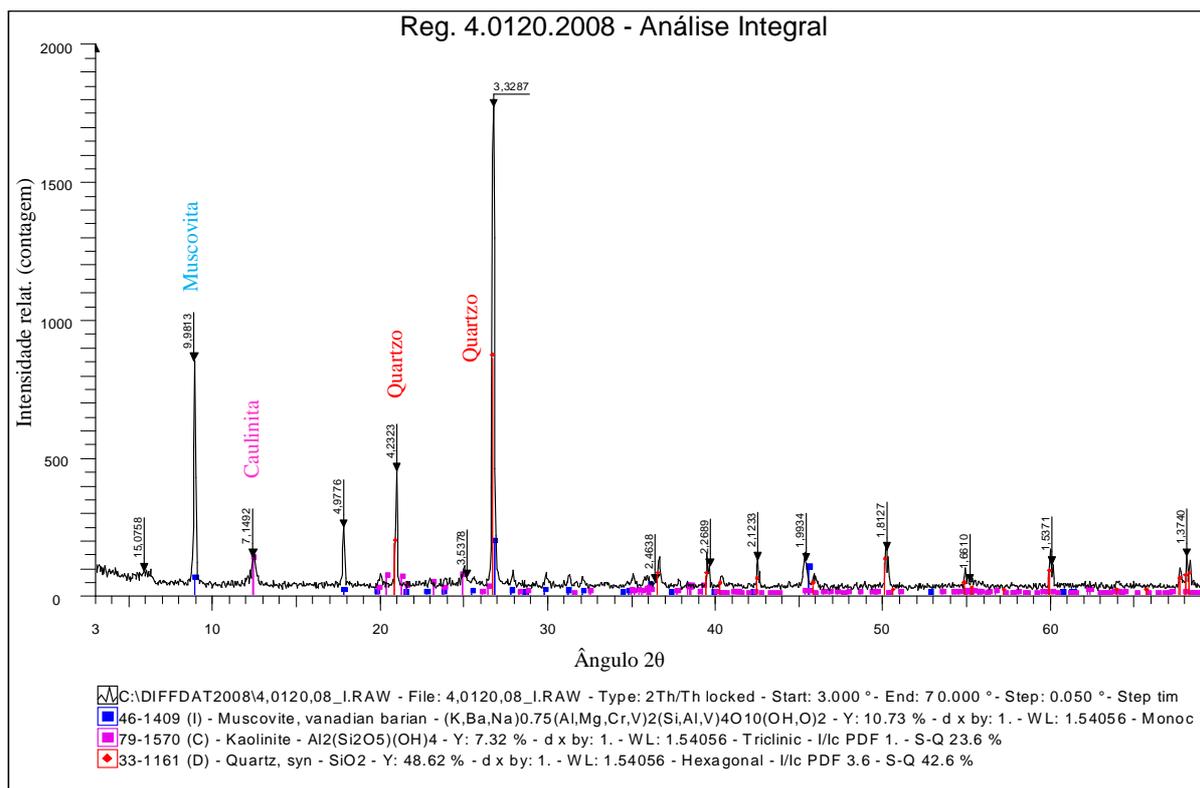


Figura 5.14 - Difratograma da amostra 4.0120.2008 – Análise Integral filito graf. C3/A3. (Furnas, 2009).

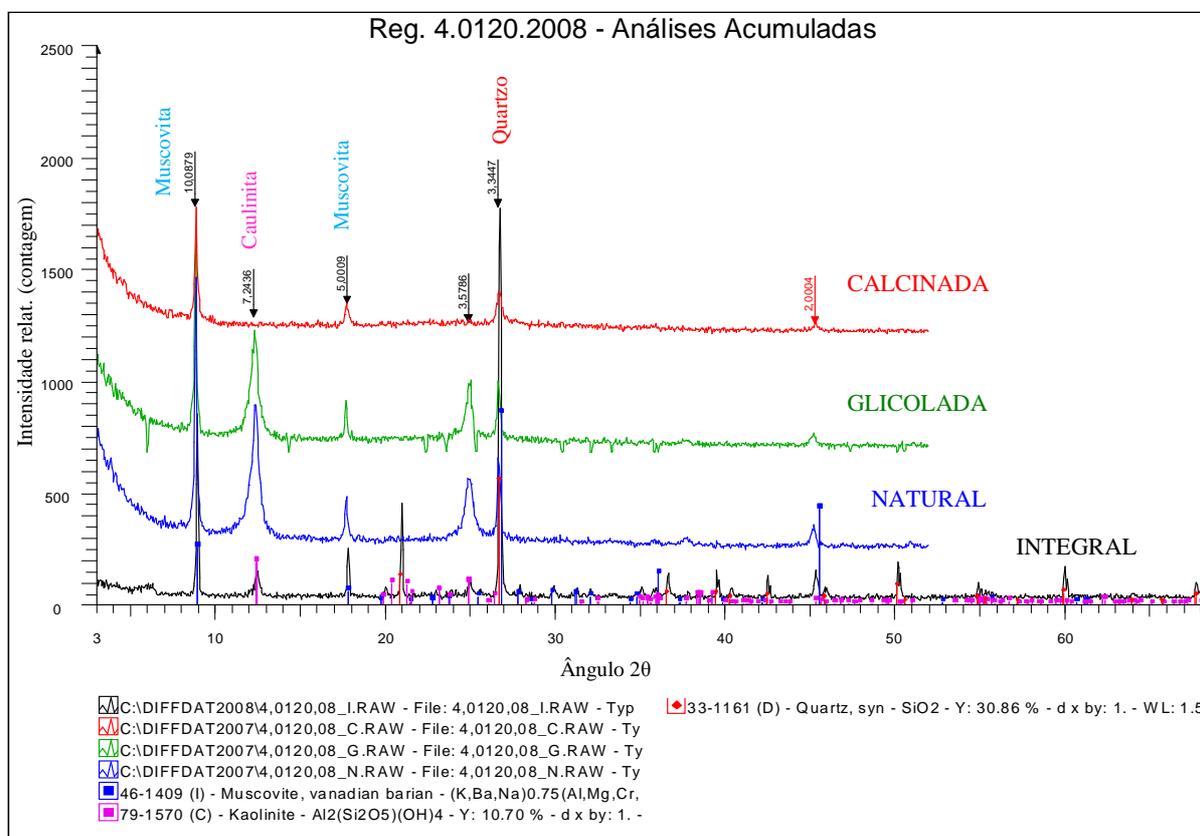


Figura 5.15 - Difratograma da amostra 4.0120.2008 – Análise Acumulada filito graf. C3/A3. (Furnas, 2009).

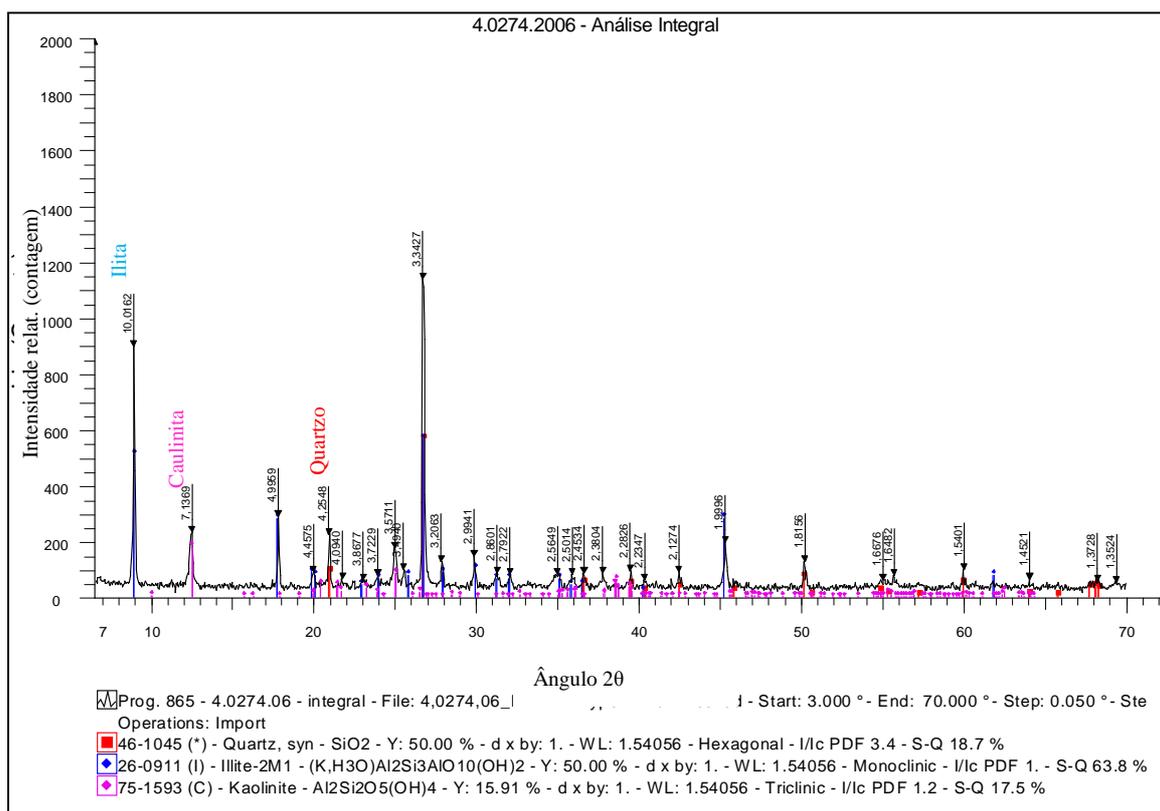


Figura 5.16 - Difratoograma da amostra 4.0274.2006 – Análise Integral filito graf. C4/A4. (Furnas, 2007).

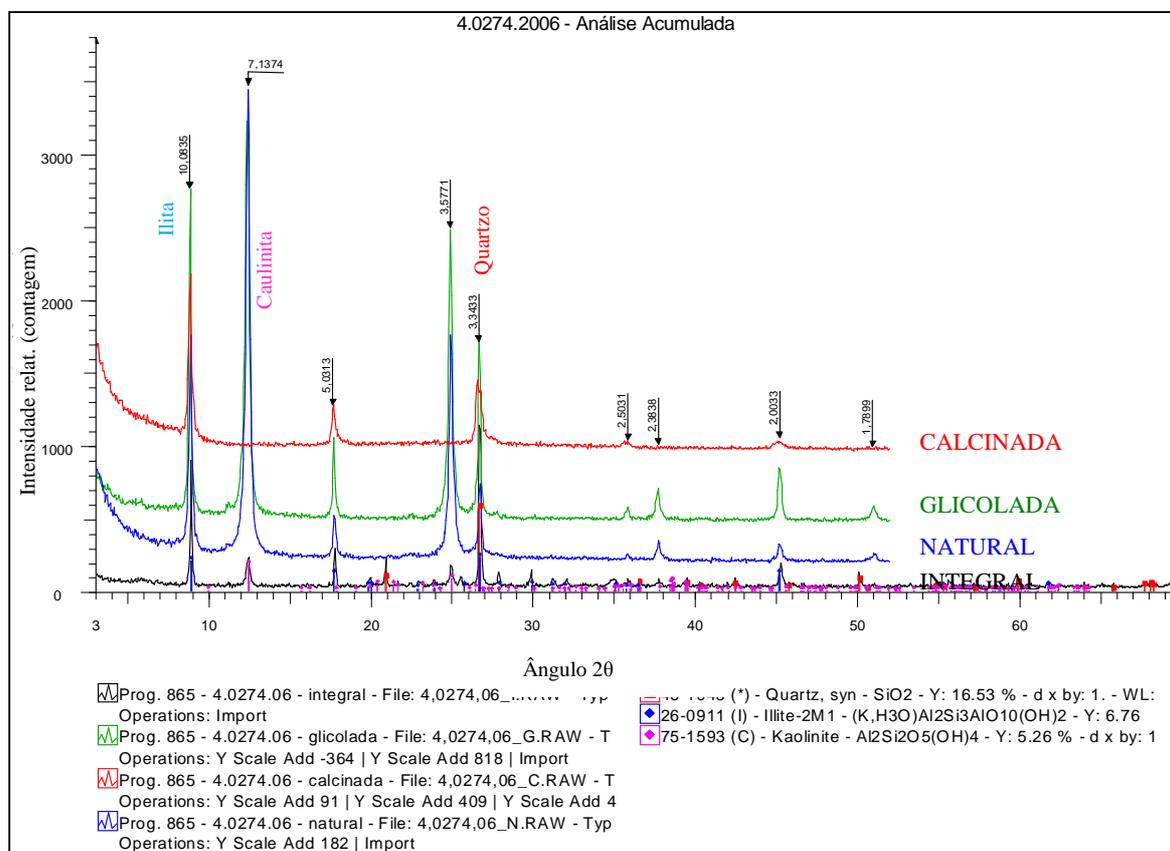


Figura 5.17 - Difratoograma da amostra 4.0274.2006 – Análise Acumulada filito graf. C4/A4. (Furnas, 2007).

5.2.2.3 QUARTZITO

Foram executadas quatro análises por difração de raios X (amostra integral, fração argila ao natural, fração argila glicolada e fração argila calcinada) na rocha de registro 4.0281.2006. Esta amostra foi obtida do furo de sondagem SM-105 a uma profundidade de 3,13- 4,14 m e é identificada como um quartzito com grau de intemperismo A3/C4. Na Figura 5.18 e Figura 5.19, são apresentados os difratogramas das análises integral e acumulada para o quartzito com registro 4.0281.2006. Nestas análises, observa-se que o quartzito A3/C4 apresenta como mineral principal o quartzo e como minerais subordinados a caulinita e a illita.

Comparando este resultado com o resultado da análise petrográfica para o quartzito A2/C2 (registro 1.1326.2006), pode-se concluir que não houve mudanças de tipo de mineral na transição do grau de intemperismo A2/C2 para o grau A3/C4 no quartzito, sendo que a análise petrográfica identificou o quartzo como mineral principal e argilominerais como minerais subordinados. É claro que, devido às limitações deste método, não foi possível identificar que tipos de argilominerais estavam presentes na amostra de quartzito A2/C2. Assim, destaca-se uma das vantagens do método de difração de raios X, a identificação dos tipos de argilominerais presentes em uma amostra.

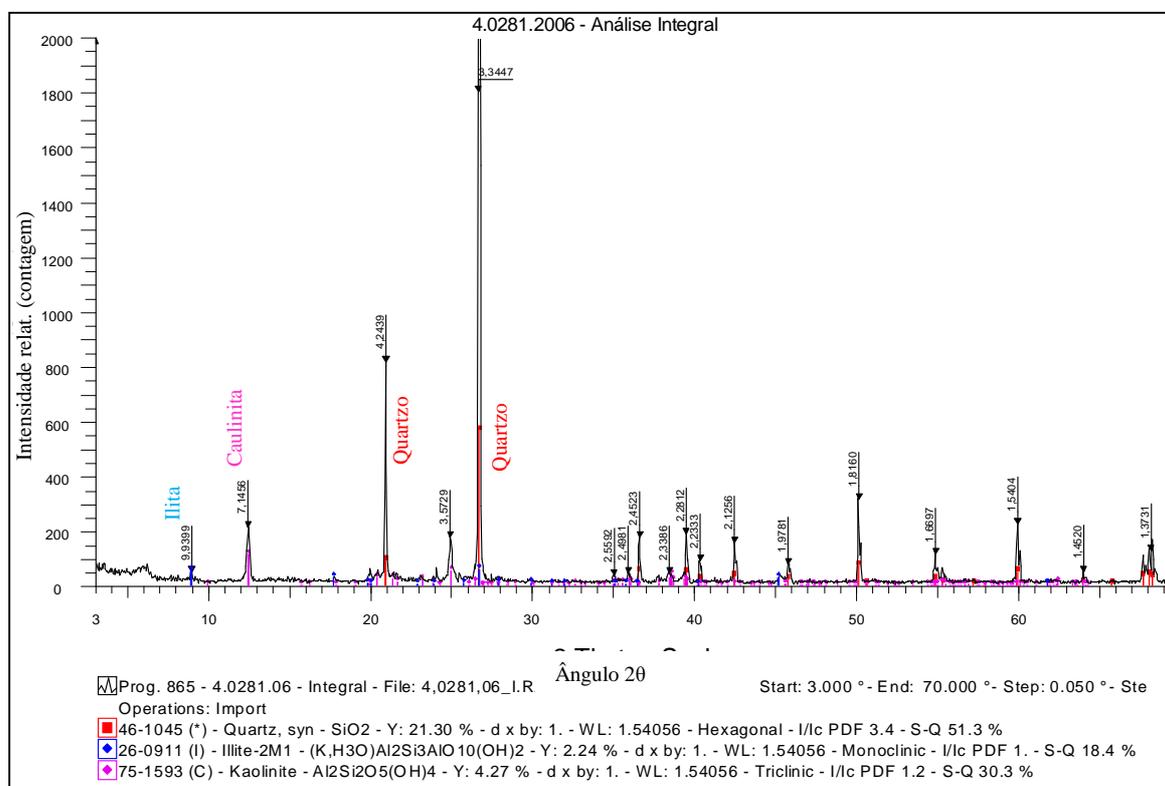


Figura 5.18 - Difratograma da amostra 4.0281.2006 – Análise Integral quartzito C4/A3. (Furnas, 2007).

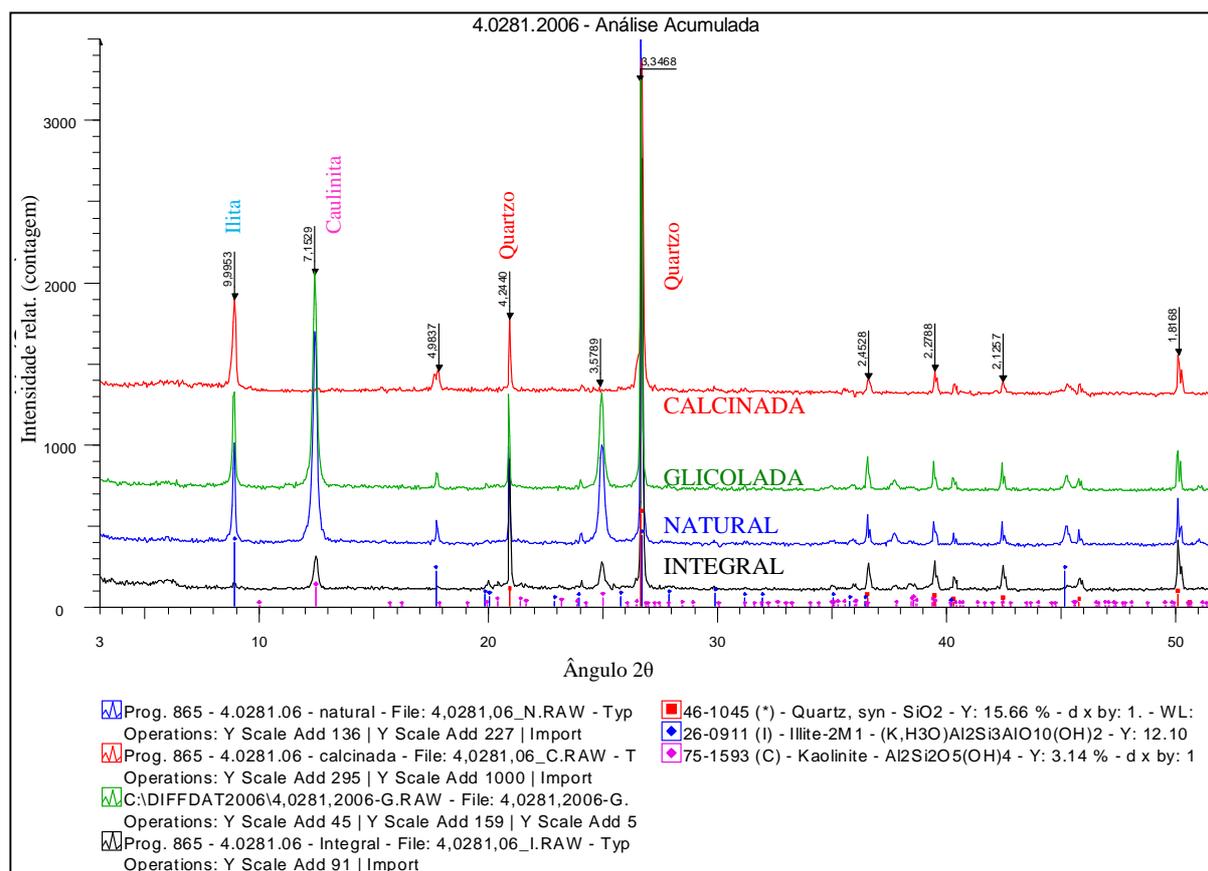


Figura 5.19 - Difratoograma da amostra 4.0281.2006 – Análise Acumulada quartzito C4/A3. (Furnas, 2007).

5.2.3 POROSIDADE APARENTE

Inicialmente, em laboratório, foi determinada, para cada amostra de rocha, a massa saturada (M_{sat}), a massa submersa (M_{sub}) e a massa seca (M_d), sendo estes resultados empregados como dados de entrada para o cálculo das seguintes propriedades: porosidade aparente, absorção aparente, massa específica seca, massa específica saturada e índice de vazios. No Apêndice B, apresentam-se estes resultados para cada amostra.

A porosidade foi determinada no Laboratório de Mecânica de Rochas de Furnas seguindo a metodologia proposta pela ISRM (2007), a qual está descrita brevemente na Seção 2.4.2.4, sendo utilizadas as Equações 2.5, 2.9 e 2.10. As determinações foram feitas para o filito, o filito grafitoso e o quartzito e os resultados foram agrupados segundo o tipo de litologia e grau de intemperismo.

5.2.3.1 FILITO

Para este litotipo, tem-se 77 dados de porosidade aparente e foram identificados quatro graus diferentes de intemperismo, sendo que a grande maioria dos dados está concentrada no grau

de intemperismo C2/A2. A Tabela 5.3 sumariza os resultados por meio do valor médio e desvio padrão para cada grau de intemperismo. Já a Figura 5.20 mostra a variação média desta propriedade segundo o grau de intemperismo.

Tabela 5.3 - Resultados da porosidade aparente do filito.

<i>Porosidade aparente do filito</i>				
Grau de intemperismo	C1/A2	C2/A2	C3/A2	C4/A2
# de dados	4	61	8	4
Valor médio (%)	12,72	16,15	16,91	18,71
Desvio padrão (%)	1,04	5,27	7,14	2,36

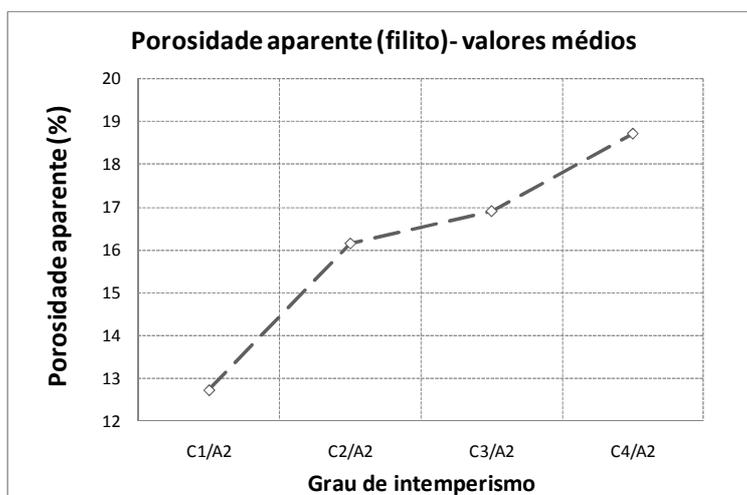


Figura 5.20 - Variação média da porosidade aparente do filito segundo o grau de intemperismo.

Observa-se, em média, um aumento da porosidade aparente quanto maior é o grau de intemperismo, sendo o aumento mais significativo ao passar do grau C1/A2 ao grau C2/A2. No entanto, observa-se uma dispersão significativa dos resultados para os graus de intemperismo C2/A2 e C3/A2, o que estaria justificado pelas limitações do critério usado para caracterizar o grau de intemperismo e pela grande variabilidade intrínseca que este material apresenta no local da obra.

Segundo Beavis (1985), as mudanças em propriedades tais como a densidade e o teor de umidade são consequências diretas do aumento da porosidade devido ao intemperismo, que causa um aumento de microfissuras da matriz rochosa. Os resultados obtidos são significativamente maiores aos reportados por Beavis (1985), onde os valores de porosidade variam em média de 7,08-11,83% para um filito calcário de Nova Gales do Sul na Austrália.

5.2.3.2 FILITO GRAFITOSO

Para este litotipo, tem-se 56 dados de porosidade aparente e foram identificados três graus diferentes de intemperismo, sendo que a grande maioria dos dados está concentrada no grau de intemperismo C2/A1. A Tabela 5.4 sumariza os resultados desses ensaios por meio do valor médio e desvio padrão para cada grau de intemperismo. A Figura 5.21 mostra a variação média desta propriedade segundo o grau de intemperismo.

Tabela 5.4 - Resultados da porosidade aparente do filito grafitoso.

Porosidade aparente do filito grafitoso			
Grau de intemperismo	C2/A1	C2/A2	C4/A3
# de dados	36	17	3
Valor médio (%)	1,95	9,95	15,70
Desvio padrão (%)	0,51	2,12	1,54

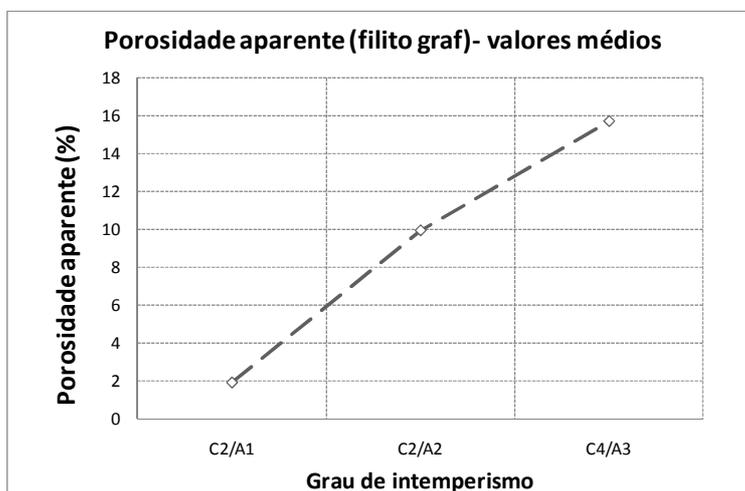


Figura 5.21 - Variação média da porosidade aparente do filito grafitoso segundo o grau de intemperismo.

Dos resultados obtidos, observa-se em média um aumento da porosidade aparente quanto maior é o grau de intemperismo, sendo que a taxa de aumento parece ser mais ou menos constante da transição do grau C2/A1 até o grau C4/A3. Observa-se que, neste caso, a dispersão dos dados dentro de um mesmo grau de intemperismo é relativamente pequena.

5.2.3.3 QUARTZITO

Para este litotipo, tem-se 41 dados de porosidade aparente e foram identificados quatro graus diferentes de intemperismo, sendo que a maioria dos dados está concentrada no grau de intemperismo C1/A1. A Tabela 5.5 sumariza os resultados desses ensaios por meio do valor médio e desvio padrão para cada grau de intemperismo.

Dos resultados obtidos, observa-se em média um aumento da porosidade aparente quanto maior é o grau de intemperismo, sendo que a maior taxa de aumento ocorre na transição do grau C2/A1 até o grau C4/A3. Observa-se que, neste caso, o grau C2/A1 apresenta uma maior absorção em relação ao grau C1/A2, evidenciando, neste caso, que a perda na coerência é um fator mais relevante na modificação desta propriedade.

Tabela 5.5 - Resultados da porosidade aparente do quartzito.

<i>Porosidade aparente do quartzito</i>				
Grau de intemperismo	A1/C1	A2/C1	A1/C2	A3/C4
# de dados	22	6	5	8
Valor médio (%)	2,47	3,83	5,57	10,26
Desvio padrão (%)	0,97	1,82	1,92	1,16

A Figura 5.22 mostra a variação média desta propriedade segundo o grau de intemperismo.

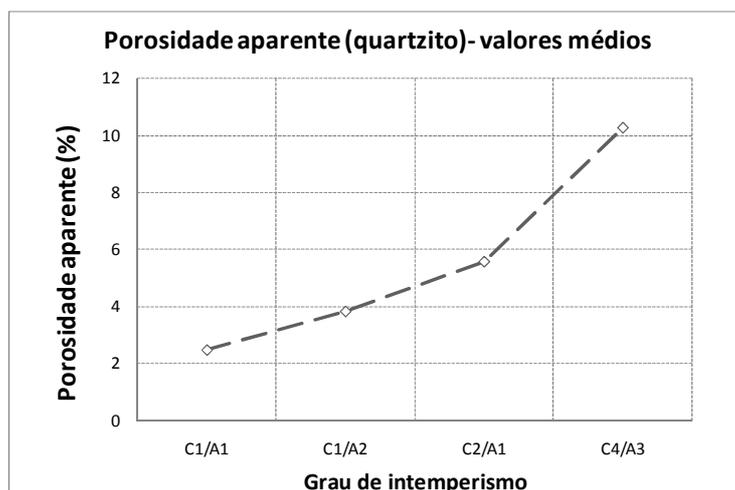


Figura 5.22 - Variação média da porosidade aparente do quartzito segundo o grau de intemperismo.

5.2.4 ABSORÇÃO APARENTE D'ÁGUA

A absorção d'água foi determinada no Laboratório de Mecânica de Rochas de Furnas seguindo a metodologia proposta pela ISRM (2007), a qual está descrita brevemente na Seção 2.4.2.2. Assim, empregando a Equação 2.2, foi calculada a absorção aparente d'água para cada amostra. Foram feitas determinações para o filito, o filito grafitoso e o quartzito e os resultados foram agrupados segundo o tipo de litologia e grau de intemperismo.

5.2.4.1 FILITO

Para este litotipo, tem-se 77 dados de absorção da rocha e foram identificados quatro graus

diferentes de intemperismo. A Tabela 5.6 sumariza os resultados destes ensaios por meio do valor médio e desvio padrão para cada grau de intemperismo. Já a Figura 5.23 mostra a variação média desta propriedade segundo o grau de intemperismo.

Dos resultados obtidos, observa-se, em média, um aumento da absorção aparente quanto maior é o grau de intemperismo, sendo o aumento mais significativo ao passar do grau C1/A2 ao grau C2/A2. Também se observa uma dispersão significativa dos resultados para os graus de intemperismo C2/A2 e C3/A2. Os resultados obtidos são significativamente maiores aos reportados por Beavis (1985), onde os valores de absorção variam em média de 2,70-4,22% para um filito calcário de Nova Gales do Sul na Austrália.

Tabela 5.6 - Resultados da absorção aparente do filito.

<i>Absorção aparente do filito</i>				
Grau de intemperismo	C1/A2	C2/A2	C3/A2	C4/A2
# de dados	4	61	8	4
Valor médio (%)	5,19	7,35	7,94	8,73
Desvio padrão (%)	0,56	2,67	3,55	1,44

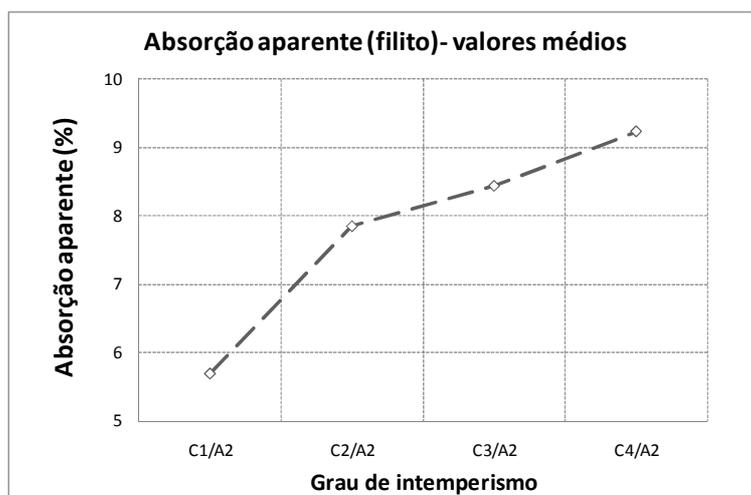


Figura 5.23 - Variação média da absorção aparente do filito segundo o grau de intemperismo.

5.2.4.2 FILITO GRAFITOSO

Para este litotipo, tem-se 56 dados de absorção da rocha e foram identificados três graus diferentes de intemperismo. A Tabela 5.7 sumariza os resultados destes ensaios por meio do valor médio e desvio padrão para cada grau de intemperismo. Já a Figura 5.24 mostra a variação média desta propriedade segundo o grau de intemperismo.

Dos resultados obtidos, observa-se, em média, um aumento da absorção aparente quanto maior é o grau de intemperismo, sendo que a taxa de aumento parece ser constante da

transição do grau C2/A1 até o grau C4/A3. Observa-se que, neste caso, a dispersão dos dados dentro de um mesmo grau de intemperismo é pequena.

Tabela 5.7 - Resultados da absorção aparente do filito grafitoso.

<i>Absorção aparente do filito grafitoso</i>			
Grau de intemperismo	C2/A1	C2/A2	C4/A3
# de dados	36	17	3
Valor médio (%)	0,71	4,10	6,98
Desvio padrão (%)	0,19	0,94	0,76

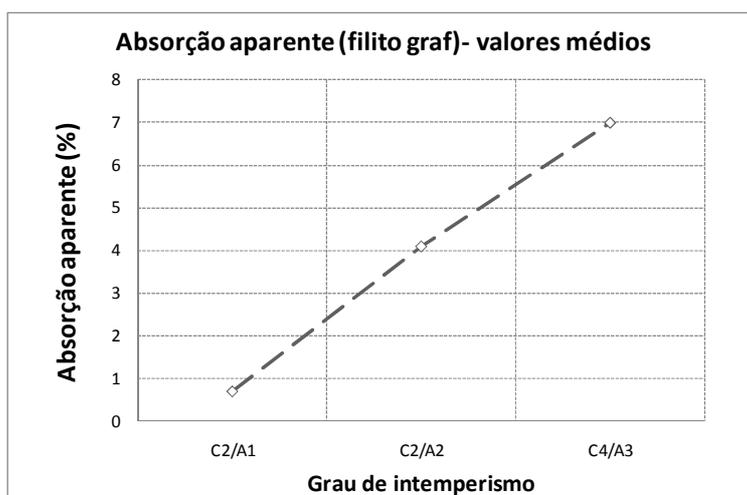


Figura 5.24 - Variação média da absorção aparente do filito grafitoso segundo o grau de intemperismo.

5.2.4.3 QUARTZITO

Para este litotipo, tem-se 41 dados de absorção da rocha e foram identificados quatro graus diferentes de intemperismo. A Tabela 5.8 sumariza os resultados destes ensaios por meio do valor médio e desvio padrão para cada grau de intemperismo. A Figura 5.25 mostra a variação média desta propriedade segundo o grau de intemperismo.

Tabela 5.8 - Resultados da absorção aparente do quartzito.

<i>Absorção aparente do quartzito</i>				
Grau de intemperismo	A1/C1	A2/C1	A1/C2	A3/C4
# de dados	22	6	5	8
Valor médio (%)	1,00	1,55	2,32	4,55
Desvio padrão (%)	0,40	0,74	0,86	0,60

Dos resultados obtidos, observa-se, em média, um aumento da absorção aparente quanto maior é o grau de intemperismo, sendo que a maior taxa de aumento ocorre na transição do grau C2/A1 até o grau C4/A3.

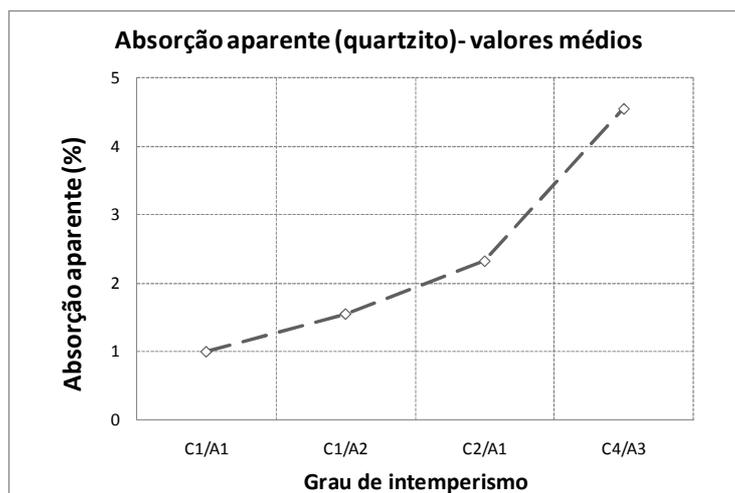


Figura 5.25 - Variação média da absorção aparente do quartzito segundo o grau de intemperismo.

5.2.5 MASSA ESPECÍFICA SECA

A massa específica seca foi determinada no Laboratório de Mecânica de Rochas de Furnas seguindo a metodologia proposta pela ISRM (2007), a qual é explicada brevemente na Seção 2.4.2.3, sendo utilizadas as Equações 2.4, 2.5 e 2.6 para a determinação da massa específica seca.

Foram feitas determinações para o filito, o filito grafitoso e o quartzito e os resultados foram agrupados segundo o tipo de litologia e grau de intemperismo.

5.2.5.1 FILITO

Para este litotipo, tem-se 77 dados de massa específica seca da rocha e foram identificados quatro graus diferentes de intemperismo. A Tabela 5.9 sumariza os resultados destes ensaios por meio do valor médio e desvio padrão para cada grau de intemperismo. A Figura 5.26 mostra a variação média desta propriedade segundo o grau de intemperismo.

Tabela 5.9 - Resultados da massa específica seca do filito.

<i>Massa específica seca do filito</i>				
Grau de intemperismo	C1/A2	C2/A2	C3/A2	C4/A2
# de dados	4	61	8	4
Valor médio (kg/m ³)	2456,4	2243,2	2181,1	2152,8
Desvio padrão (kg/m ³)	91,1	133,0	138,7	88,1

Observa-se, em média, um decréscimo da massa específica seca quanto maior é o grau de intemperismo, sendo o decréscimo mais significativo ao passar do grau C1/A2 ao grau C2/A2.

Observa-se que estes decréscimos tendem a atenuar com o aumento do intemperismo. Também se observa uma dispersão significativa nos resultados.

Os resultados obtidos são significativamente menores aos reportados por Beavis (1985), onde os valores de massa específica seca variam em média de 2420-2620 kg/m³ para um filito calcário de Nova Gales do Sul na Austrália.

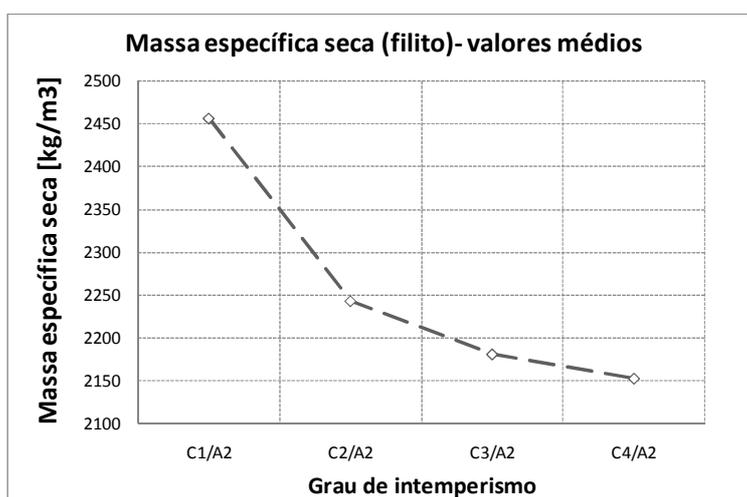


Figura 5.26 - Variação média da massa específica seca do filito segundo o grau de intemperismo.

5.2.5.2 FILITO GRAFITOSO

Para este litotipo, tem-se 56 dados de massa específica seca da rocha e foram identificados três graus diferentes de intemperismo. A Tabela 5.10 sumariza os resultados destes ensaios por meio do valor médio e desvio padrão para cada grau de intemperismo. A Figura 5.27 mostra a variação média desta propriedade segundo o grau de intemperismo.

Tabela 5.10 - Resultados da massa específica seca do filito grafitoso.

<i>Massa específica seca do filito grafitoso</i>			
Grau de intemperismo	C2/A1	C2/A2	C4/A3
# de dados	36	17	3
Valor médio (kg/m ³)	2732,0	2437,3	2250,1
Desvio padrão (kg/m ³)	26,6	45,2	58,3

Dos resultados obtidos, observa-se, em média, um decréscimo da massa específica seca quanto maior é o grau de intemperismo, sendo que a taxa de diminuição é mais ou menos constante na transição do grau C2/A1 até o grau C4/A3. Observa-se que, neste caso, a dispersão dos dados dentro de um mesmo grau de intemperismo é relativamente pequena.

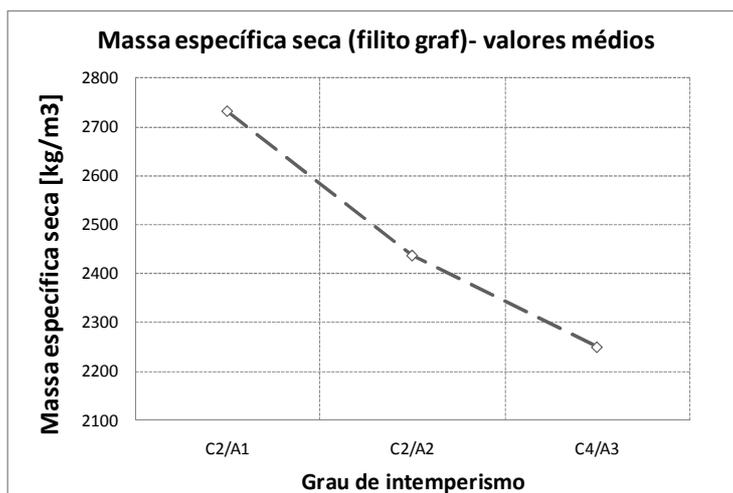


Figura 5.27 - Variação média da massa específica seca do filito grafítico segundo o grau de intemperismo.

5.2.5.3 QUARTZITO

Para este litotipo, tem-se 41 dados de massa específica seca e foram identificados quatro graus diferentes de intemperismo. A Tabela 5.11 sumariza os resultados destes ensaios por meio do valor médio e desvio padrão para cada grau de intemperismo.

Tabela 5.11 - Resultados da massa específica seca do quartzito.

<i>Massa específica seca do quartzito</i>				
Grau de intemperismo	A1/C1	A2/C1	A1/C2	A3/C4
# de dados	22	6	5	8
Valor médio (kg/m ³)	2501,1	2485,5	2413,0	2259,5
Desvio padrão (kg/m ³)	55,9	62,9	54,0	40,1

A Figura 5.28 mostra a variação média desta propriedade segundo o grau de intemperismo.

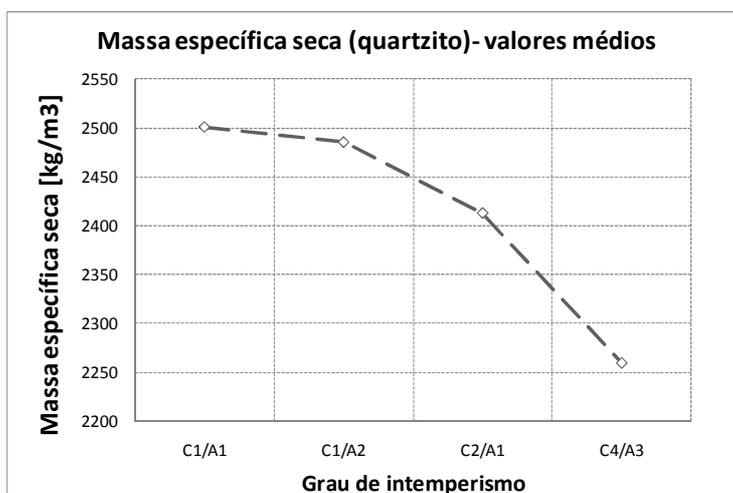


Figura 5.28 - Variação média da massa específica seca do quartzito segundo o grau de intemperismo.

Dos resultados obtidos, observa-se, em média, uma diminuição da massa específica seca quanto maior é o grau de intemperismo, sendo que a maior taxa do decréscimo ocorre na transição do grau C2/A1 até o grau C4/A3.

5.2.6 MASSA ESPECÍFICA SATURADA

A massa específica saturada foi determinada no Laboratório de Mecânica de Rochas de Furnas seguindo a metodologia proposta pela ISRM (2007), sendo utilizadas as Equações 2.3, 2.5 e 2.6 para a determinação da massa específica saturada. Foram feitas determinações para o filito, o filito grafitoso e o quartzito e os resultados foram agrupados segundo o tipo de litologia e grau de intemperismo.

5.2.6.1 FILITO

Para este litotipo, tem-se 77 dados de massa específica saturada da rocha, e foram identificados quatro graus diferentes de intemperismo. A Tabela 5.12 sumariza os resultados destes ensaios por meio do valor médio e desvio padrão para cada grau de intemperismo.

Tabela 5.12 - Resultados da massa específica saturada do filito.

<i>Massa específica saturada do filito</i>				
Grau de intemperismo	C1/A2	C2/A2	C3/A2	C4/A2
# de dados	4	61	8	4
Valor médio (kg/m ³)	2583,7	2404,7	2350,1	2339,9
Desvio padrão (kg/m ³)	85,1	87,8	80,0	67,6

A Figura 5.29 mostra a variação média desta propriedade segundo o grau de intemperismo.

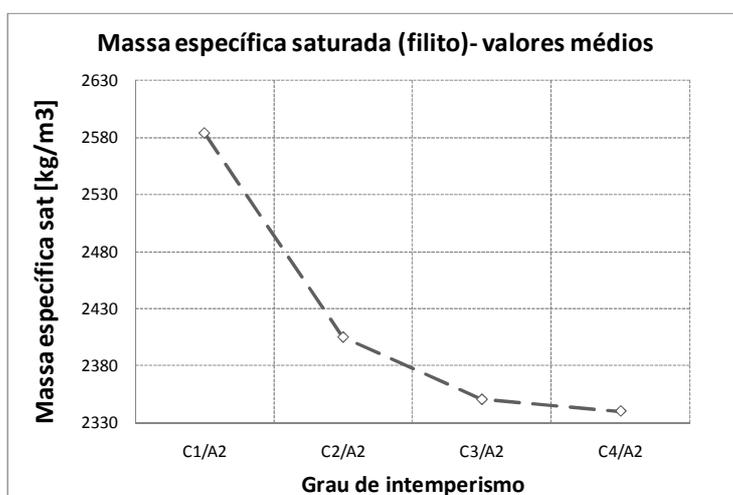


Figura 5.29 - Variação média da massa específica saturada do filito segundo o grau de intemperismo.

Dos resultados obtidos, observa-se, em média, um decréscimo da massa específica saturada quanto maior é o grau de intemperismo, sendo o decréscimo mais significativo ao passar do grau C1/A2 ao grau C2/A2. Observa-se que estes decréscimos tendem a atenuar com o aumento do intemperismo. Também se observa uma dispersão significativa nos resultados.

Os resultados obtidos são significativamente menores aos reportados por Beavis (1985), onde os valores de massa específica seca variam em média de 2530-2690 kg/m³ para um filito calcário de Nova Gales do Sul na Austrália.

5.2.6.2 FILITO GRAFITOSO

Para este litotipo, tem-se 56 dados de massa específica saturada da rocha e foram identificados três graus diferentes de intemperismo. A Tabela 5.13 sumariza os resultados destes ensaios por meio do valor médio e desvio padrão para cada grau de intemperismo.

Tabela 5.13 - Resultados da massa específica saturada do filito grafitoso.

<i>Massa específica saturada do filito grafitoso</i>			
Grau de intemperismo	C2/A1	C2/A2	C4/A3
# de dados	36	17	3
Valor médio (kg/m ³)	2751,5	2536,8	2407,1
Desvio padrão (kg/m ³)	22,9	28,5	54,6

A Figura 5.30 mostra a variação média desta propriedade segundo o grau de intemperismo.

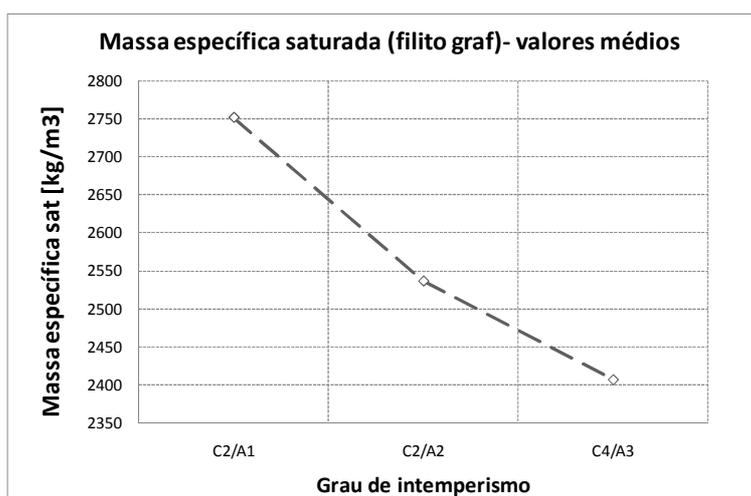


Figura 5.30 - Variação média da massa específica saturada do filito grafitoso segundo o grau de intemperismo.

Dos resultados obtidos, observa-se, em média, um decréscimo da massa específica saturada quanto maior é o grau de intemperismo, sendo que a taxa de diminuição é mais ou menos

constante na transição do grau C2/A1 até o grau C4/A3. Observa-se que, neste caso, a dispersão dos dados dentro de um mesmo grau de intemperismo é relativamente pequena.

5.2.6.3 QUARTZITO

Para este litotipo, tem-se 41 dados de massa específica saturada e foram identificados quatro graus diferentes de intemperismo. A Tabela 5.14 sumariza os resultados destes ensaios por meio do valor médio e desvio padrão para cada grau de intemperismo. A Figura 5.31 mostra a variação média desta propriedade segundo o grau de intemperismo.

Dos resultados obtidos, observa-se, em média, uma diminuição da massa específica seca quanto maior é o grau de intemperismo, sendo que a maior taxa do decréscimo ocorre na transição do grau C2/A1 até o grau C4/A3.

Tabela 5.14 - Resultados da massa específica saturada do quartzito.

<i>Massa específica saturada do quartzito</i>				
Grau de intemperismo	A1/C1	A2/C1	A1/C2	A3/C4
# de dados	22	6	5	8
Valor médio (kg/m ³)	2525,8	2523,8	2468,7	2362,1
Desvio padrão (kg/m ³)	48,3	55,8	40,0	28,7

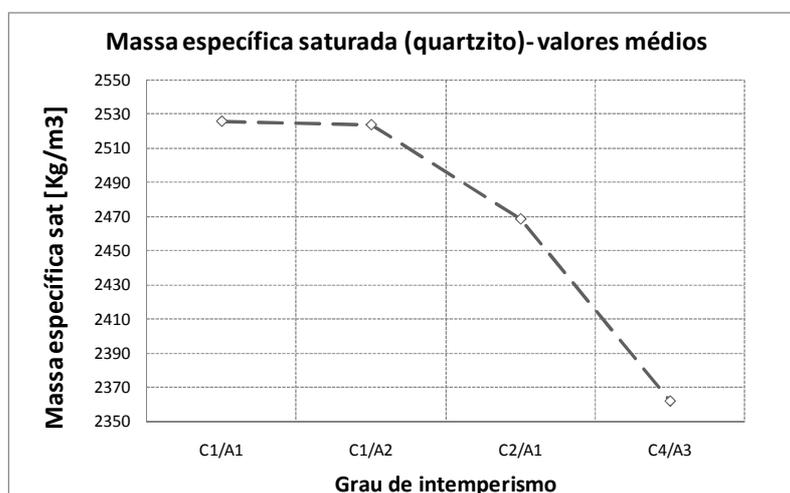


Figura 5.31 - Variação média da massa específica saturada do quartzito segundo o grau de intemperismo.

5.2.7 ÍNDICE DE VAZIOS

O índice de vazios foi calculado em função da porosidade aparente, empregando a Equação 2.11. Foram feitas determinações para o filito, o filito grafitoso e o quartzito e os resultados foram agrupados segundo o tipo de litologia e grau de intemperismo.

5.2.7.1 FILITO

Para este litotipo, tem-se 77 dados de índice de vazios e foram identificados quatro graus diferentes de intemperismo. A Tabela 5.15 sumariza os resultados por meio do valor médio e desvio padrão para cada grau de intemperismo. Já a Figura 5.32 mostra a variação média desta propriedade segundo o grau de intemperismo.

Tabela 5.15 - Resultados do índice de vazios para o filito.

<i>Índice de vazios do filito</i>				
Grau de intemperismo	C1/A2	C2/A2	C3/A2	C4/A2
# de dados	4	61	8	4
Valor médio	0,15	0,20	0,21	0,23
Desvio padrão	0,01	0,07	0,09	0,04

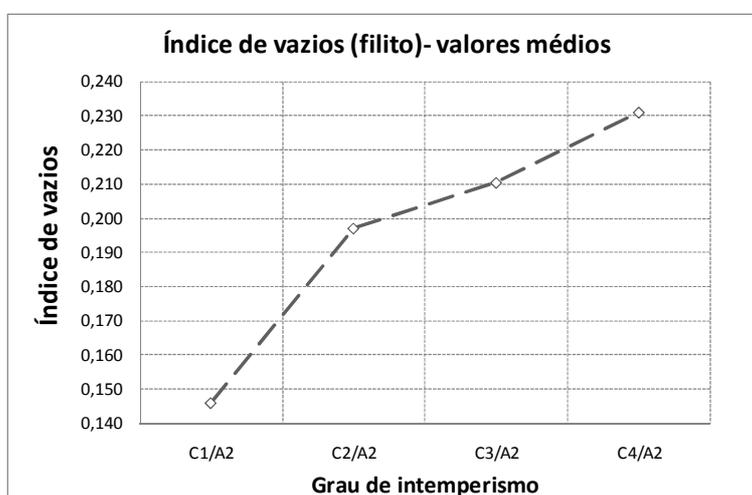


Figura 5.32 - Variação média do índice de vazios do filito segundo o grau de intemperismo.

Observa-se, em média, um aumento do índice de vazios quanto maior é o grau de intemperismo, sendo o aumento mais significativo ao passar do grau C1/A2 ao grau C2/A2.

5.2.7.2 FILITO GRAFITOSO

Para este litotipo, tem-se 56 dados de índice de vazios e foram identificados três graus diferentes de intemperismo. A Tabela 5.16 sumariza os resultados desses ensaios por meio do valor médio e desvio padrão para cada grau de intemperismo.

Tabela 5.16 - Resultados do índice de vazios para o filito grafitoso.

<i>Índice de vazios do filito grafitoso</i>			
Grau de intemperismo	C2/A1	C2/A2	C4/A3
# de dados	36	17	3
Valor médio	0,020	0,111	0,187
Desvio padrão	0,01	0,03	0,02

A Figura 5.33 mostra a variação média desta propriedade segundo o grau de intemperismo.

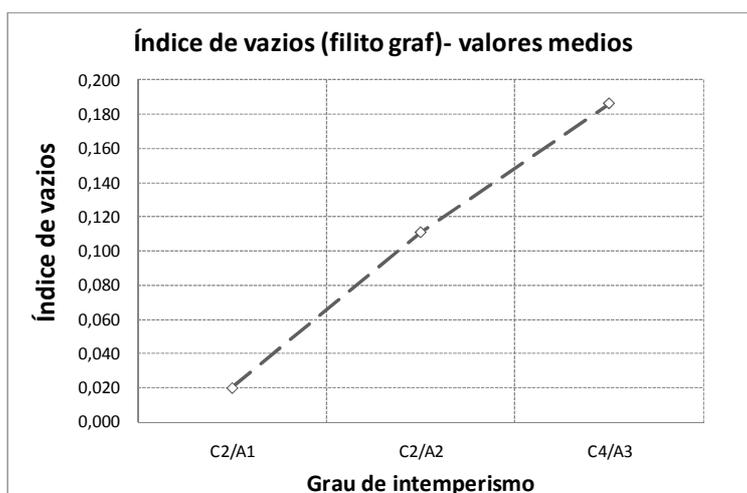


Figura 5.33 - Variação média do índice de vazios do filito grafitoso segundo o grau de intemperismo.

Observa-se, em média, um aumento do índice de vazios quanto maior é o grau de intemperismo, sendo que a taxa de aumento parece ser mais ou menos constante da transição do grau C2/A1 até o grau C4/A3.

5.2.7.3 QUARTZITO

Para este litotipo, tem-se 41 dados de índice de vazios e foram identificados quatro graus diferentes de intemperismo. A Tabela 5.17 sumariza os resultados de esses ensaios por meio do valor médio e desvio padrão para cada grau de intemperismo. A Figura 5.34 mostra a variação média desta propriedade segundo o grau de intemperismo.

Tabela 5.17 - Resultados do índice de vazios para o quartzito.

<i>Índice de vazios do quartzito</i>				
Grau de intemperismo	A1/C1	A2/C1	A1/C2	A3/C4
# de dados	22	6	5	8
Valor médio	0,025	0,040	0,059	0,115
Desvio padrão	0,010	0,020	0,022	0,015

Observa-se, em média, um aumento do índice de vazios quanto maior é o grau de intemperismo, sendo que a maior taxa de aumento ocorre na transição do grau C2/A1 até o grau C4/A3.

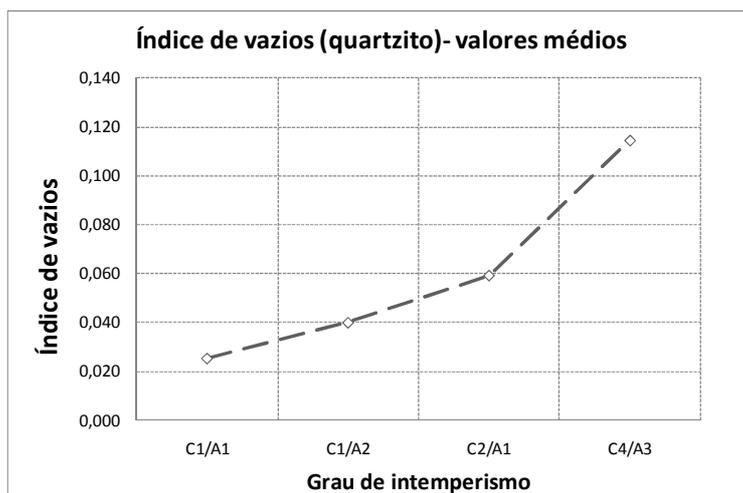


Figura 5.34 - Variação média do índice de vazios do quartzito segundo o grau de intemperismo.

5.2.8 VELOCIDADE SÔNICA

A velocidade sônica foi determinada no Laboratório de Mecânica de Rochas de Furnas seguindo a metodologia proposta pela ISRM (2007). Neste caso só foi medida a onda P devido às especificações do equipamento empregado.

O equipamento usado nestes ensaios foi o instrumento ultra-sônico modelo TICO da companhia PROCEQ da Suíça. Este gera uma onda compressiva (onda longitudinal P) em uma frequência entre 0,15 e 67 kHz. O equipamento tem dois transdutores piezelétricos (um transmissor e o outro receptor) de 54 kHz, os quais possuem forma cilíndrica com diâmetro de 54 mm (Suárez-Burgoa, 2008). Sobre estes transdutores é aplicado um gel que melhora a transmissibilidade da onda no núcleo de rocha. Assim, este equipamento consegue obter uma medida de tempo de viagem da onda P entre os dois transdutores a cada três segundos, já a distância entre os transdutores é obtida por meio de um paquímetro.

Antes de realizar as leituras nos núcleos de rocha, o instrumento deve ser calibrado com um núcleo de um material padrão, para o qual sua velocidade sônica de propagação é conhecida. Neste caso é um material de cor branca, de forma cilíndrica de 135 mm de comprimento e 54 mm de diâmetro e possui uma velocidade de 56 $\mu\text{m/s}$. A Figura 5.35 mostra o equipamento empregado.

Deste ensaio, foram feitas determinações para o filito, o filito grafitoso e o quartzito e os resultados foram agrupados segundo o tipo de litologia e grau de intemperismo (Apêndice B). Não foi possível definir uma direção específica da foliação em relação à direção da onda, sendo a foliação definida para as diferentes amostras como aquele obtido pela extração do

testemunho. As amostras foram ensaiadas no estado de umidade seco ao ar (durante um longo período de tempo). Assim mesmo, foi determinada para as mesmas amostras sua densidade seca ao natural, sendo possível calcular o módulo de Young dinâmico por meio da Equação 2.12.



Figura 5.35 - Equipamento e ensaio de velocidade sônica.

5.2.8.1 FILITO

Para este litotipo, foram encontrados alguns inconvenientes e dificuldades na execução do ensaio, entre eles, a dificuldade do equipamento para estabilizar as leituras de tempo de viagem da onda P entre os transdutores. Isto pode ser devido à absorção do gel por parte da amostra de filito. Assim, observou-se uma grande variabilidade dos resultados.

A Tabela 5.18 sumariza os resultados dos ensaios por meio do valor médio e desvio padrão para cada grau de intemperismo.

Tabela 5.18 -Resultados da velocidade de propagação da onda P para o filito.

<i>Velocidade sônica do filito</i>				
Propriedade	Grau de intemperismo	C1/A1	C2/A2	C3/A3
	# de dados	2	11	2
Velocidade sônica	Valor médio (m/s)	1632,8	1055,7	736,1
	Desvio padrão (m/s)	24,7	362,5	94,4
Densidade seca ao natural	Valor médio (kg/m ³)	2468,79	2291,82	2216,50
	Desvio padrão (kg/m ³)	66,22	97,95	92,63
Módulo elástico dinâmico	Valor médio (GPa)	6,58	2,88	1,22
	Desvio padrão (GPa)	0,02	2,04	0,36

Na Figura 5.36 e na Figura 5.37, mostra-se, respectivamente, a variação média da velocidade de propagação da onda P e do módulo de elasticidade dinâmico conforme o avanço do intemperismo.

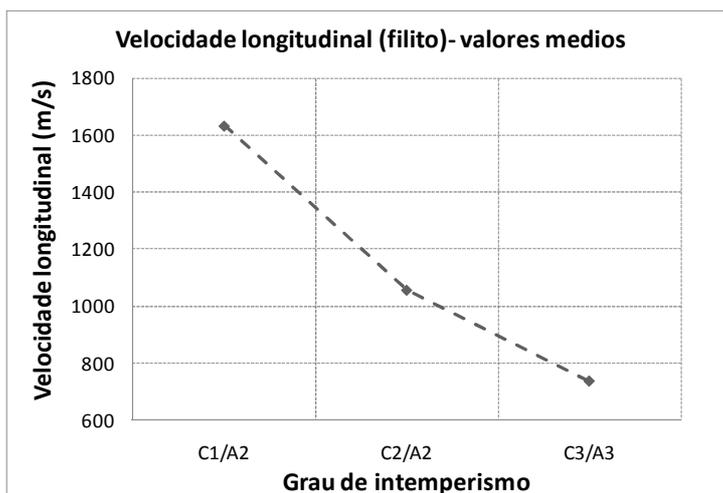


Figura 5.36 - Variação média da velocidade de propagação da onda P do filito segundo o grau de intemperismo.

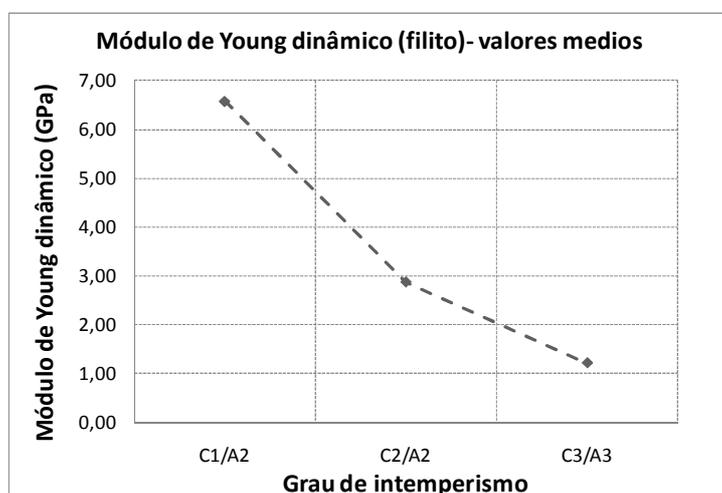


Figura 5.37 - Variação média do módulo de Young dinâmico do filito segundo o grau de intemperismo.

Apesar da variabilidade encontrada nos resultados, as médias apresentam uma tendência que indica a diminuição da velocidade longitudinal quanto maior é o grau de intemperismo. Já os valores do módulo de elasticidade dinâmico obtidos são maiores que os valores reportados por Beavis (1985), sendo que este calculou o módulo de elasticidade tangente em ensaios estáticos convencionais, com valores variando entre 1,6-4,9 GPa para um filito calcário e entre 0,8-2,5 GPa para um filito dolomítico, sendo estas rochas de Nova Gales do Sul na Austrália.

5.2.8.2 FILITO GRAFITOSO

Neste ensaio, também foram encontrados os mesmos problemas comentados na seção anterior para a determinação da velocidade sônica, obtendo-se uma grande variabilidade entre os resultados. A Tabela 5.19 sumariza os resultados dos ensaios por meio do valor médio e

desvio padrão para cada grau de intemperismo.

Tabela 5.19 - Resultados da velocidade de propagação da onda P para o filito grafitoso.

Velocidade sônica do filito grafitoso				
Propriedade	Grau de intemperismo # de dados	C2/A1	C2/A2	C3/A3
Velocidade sônica	Valor médio (m/s)	1180,2	955,4	809,0
	Desvio padrão (m/s)	347,2	393,3	214,7
Densidade seca ao natural	Valor médio (kg/m ³)	2554,56	2337,58	2249,50
	Desvio padrão (kg/m ³)	48,97	105,81	83,47
Módulo elástico dinâmico	Valor médio (GPa)	3,80	2,49	1,58
	Desvio padrão (GPa)	2,05	2,17	0,88

Na Figura 5.38 e na Figura 5.39, mostra-se, respectivamente, a variação média da velocidade de propagação da onda P e do módulo de elasticidade dinâmico conforme o avanço do intemperismo.

Observa-se, dos resultados apresentados, que o módulo de Young dinâmico e a velocidade da onda P apresentam uma diminuição conforme aumenta o grau de intemperismo. Também é notória a grande dispersão nos resultados da velocidade sônica, da densidade e do módulo de Young dinâmico para cada grau de intemperismo.

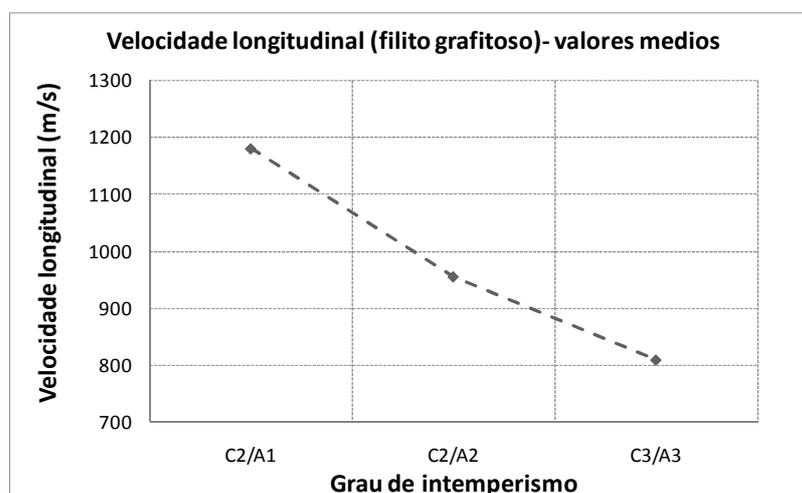


Figura 5.38 - Variação média da velocidade de propagação da onda P do filito grafitoso segundo o grau de intemperismo.

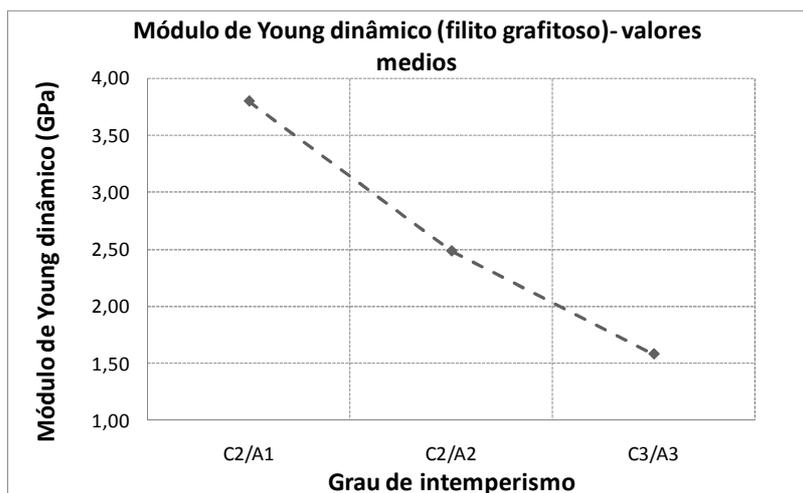


Figura 5.39 - Variação média do módulo de Young dinâmico do filito grafitoso segundo o grau de intemperismo.

5.2.8.3 QUARTZITO

A Tabela 5.20 sumariza os resultados dos ensaios por meio do valor médio e desvio padrão para cada grau de intemperismo. Na Figura 5.40 e na Figura 5.41, mostra-se, respectivamente, a variação média da velocidade de propagação da onda P e do módulo de elasticidade dinâmico conforme o avanço do intemperismo.

Tabela 5.20 - Resultados da velocidade de propagação da onda P para o quartzito.

<i>Velocidade sônica do filito quartzito</i>				
Propriedade	Grau de intemperismo	C1/A1	C2/A2	C4/A3
	# de dados	2	3	1
Velocidade sônica	Valor médio (m/s)	4569,7	1299,1	136,8
	Desvio padrão (m/s)	103,2	309,9	-
Densidade seca ao natural	Valor médio (kg/m ³)	2556,09	2448,67	2245,42
	Desvio padrão (kg/m ³)	42,90	27,56	-
Módulo elástico dinâmico	Valor médio (GPa)	53,44	4,48	0,04
	Desvio padrão (GPa)	3,31	2,08	-

Dos resultados encontrados, observa-se uma grande diferença entre a velocidade sônica P para o quartzito são C1/A1 em comparação com o quartzito com grau C2/A2 e C4/A3, confirmando que variações nos vazios da rocha produzidas pelo intemperismo podem produzir efeitos mecânicos apreciáveis em outras propriedades. O mesmo efeito é observado, conseqüentemente, na densidade e no módulo de Young dinâmico.

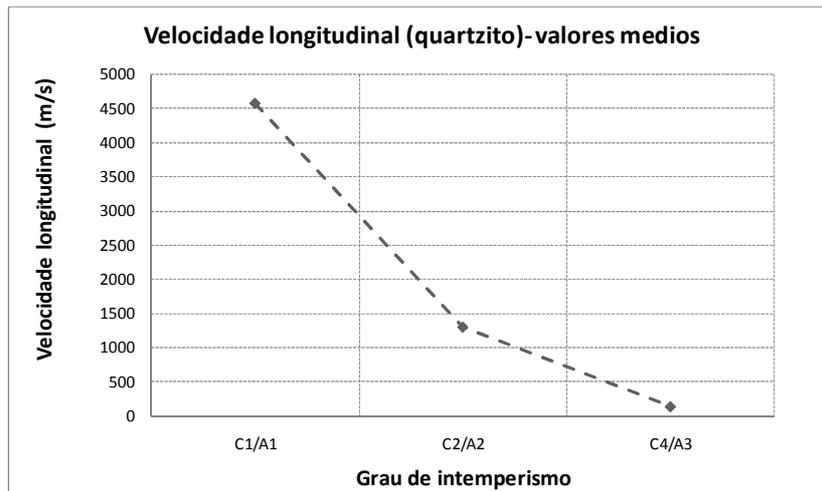


Figura 5.40 - Variação média da velocidade de propagação da onda P do quartzito segundo o grau de intemperismo.

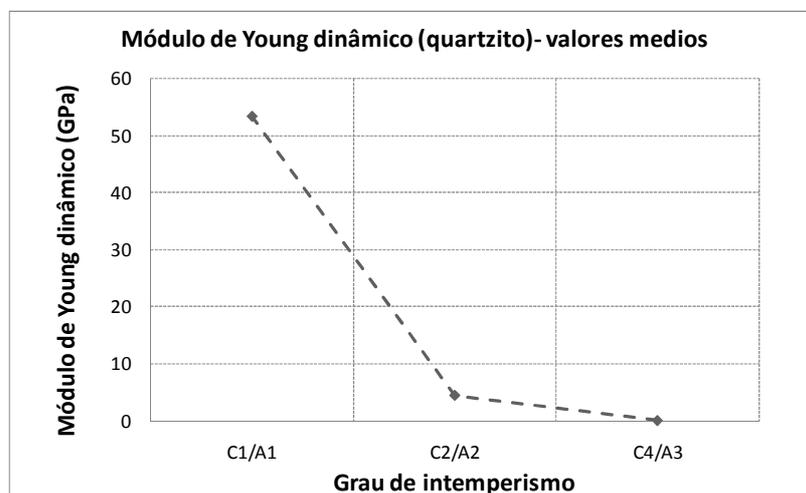


Figura 5.41 - Variação média do módulo de Young dinâmico do quartzito segundo o grau de intemperismo.

5.2.9 ÍNDICE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PUNTIFORME

O índice de resistência à compressão puntiforme foi determinado no Laboratório de Mecânica de Rochas de Furnas, segundo a orientação da ASTM D5731-05 da ISRM (2007). O equipamento empregado foi um modelo *POINT LOAD TESTER D550* da companhia CONTROL'S, onde o carregamento é feito manualmente por meio de um macaco hidráulico e a carga obtida é dada em unidades de kN, sendo que a capacidade máxima é de 55 kN. Os corpos de prova ensaiados eram pastilhas de forma cilíndrica com diâmetro de 54 mm e altura de 30 mm aproximadamente. A Figura 5.42 mostra o equipamento usado para fazer este ensaio.

Deste ensaio, foram feitas determinações para o filito, o filito grafitoso e o quartzito e os resultados foram agrupados segundo o tipo de litologia e grau de intemperismo (Apêndice B),

sendo que todos os corpos de prova foram submetidos a uma imersão prévia em água por um período mínimo de 24 h antes da realização dos ensaios e foram ensaiados corpos de prova com a direção do carregamento de força orientado perpendicularmente à foliação e com a direção do carregamento de força orientado paralelamente à foliação.



Figura 5.42 - Equipamento de carregamento puntiforme.

5.2.9.1 FILITO

Para este litotipo, foi avaliado o índice de resistência à compressão puntiforme, sendo que estes ensaios foram executados com direção do carregamento de força orientado perpendicularmente ($I_{s(50)\perp}$) à foliação e com a direção do carregamento de força orientado paralelamente à foliação ($I_{s(50)//}$), o que permitiu determinar o índice de anisotropia para a matriz rochosa, que é definido como $I_{s(50)a} = ((I_{s(50)\perp})/(I_{s(50)//}))$.

Na Tabela 5.21, resumam-se estes resultados por meio do valor médio e desvio padrão para cada grau de intemperismo. Da Figura 5.43 até a Figura 5.45, mostra-se a variação média destas propriedades segundo o grau de intemperismo.

Tabela 5.21 - Resultados do índice à compressão puntiforme do filito.

Índice à compressão puntiforme			
Propriedade	Grau de intemperismo	C2/A2	C3/A2
$I_{s(50)//}$	# de dados	5	6
	Valor médio (MPa)	0,072	0,056
	Desvio padrão (MPa)	0,016	0,043
Propriedade	Grau de intemperismo	C2/A2	C4/A2
$I_{s(50)\perp}$	# de dados	12	1
	Valor médio (MPa)	0,255	0,180
	Desvio padrão (MPa)	0,282	-
Índice de anisotropia			
$I_{s(50)a} = \left(\frac{I_{s(50)\perp}}{I_{s(50)//}} \right)$	Valor médio	3,553	3,176

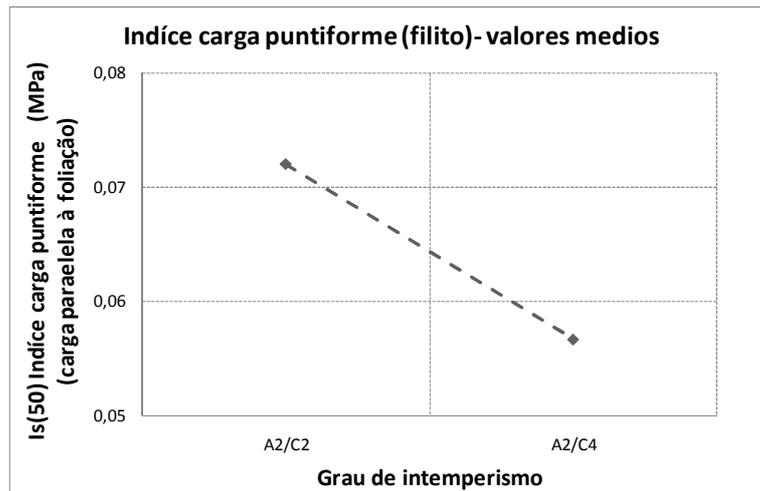


Figura 5.43 - Variação média do $I_{s(50)//}$ do filito segundo o grau de intemperismo.

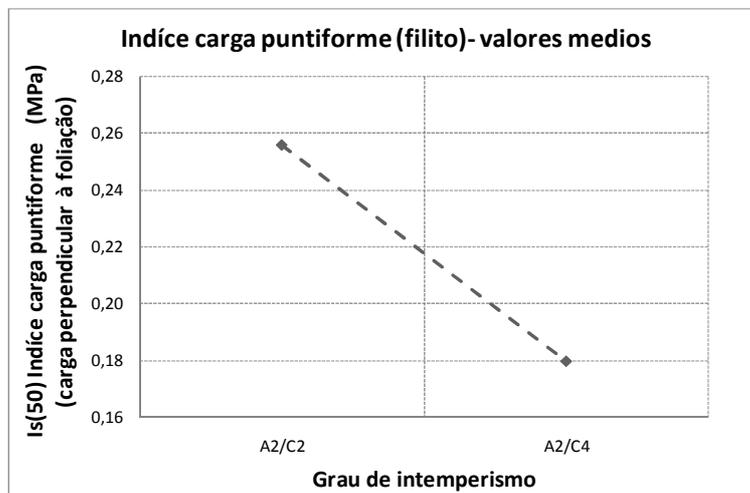


Figura 5.44 - Variação média do $I_{s(50)\perp}$ do filito segundo o grau de intemperismo.

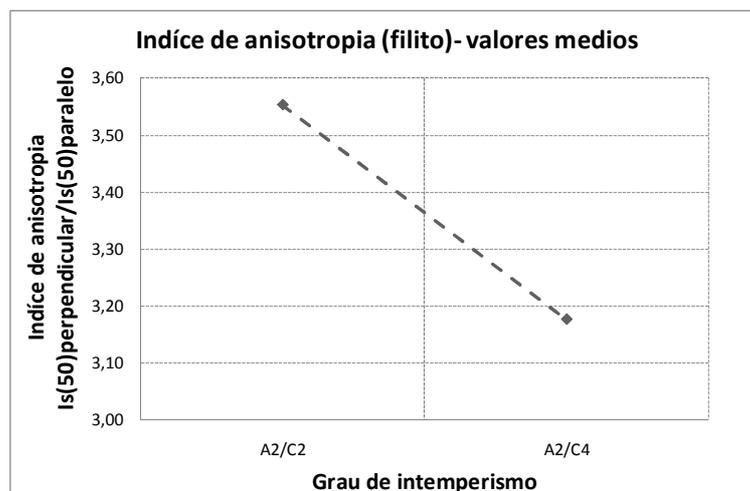


Figura 5.45 - Variação média do índice de anisotropia do filito segundo o grau de intemperismo.

Observa-se, para o filito, que os índices de resistência puntiforme $I_{s(50)\perp}$ e $I_{s(50)//}$ diminuem

quanto é maior o grau de intemperismo, também, como era de se esperar, a resistência à compressão puntiforme é maior para as amostras ensaiadas com o carregamento perpendicular ao plano de foliação em comparação às amostras ensaiadas com o carregamento paralelo ao plano de foliação. Também, é observada uma grande variabilidade dos resultados.

Em relação ao índice de anisotropia, observa-se que foi feita a relação entre os graus de intemperismo C4/A2 e C3/A3, já que, estes graus são pelo menos semelhantes. Também foi observada uma diminuição do índice de anisotropia conforme aumenta o grau de intemperismo. Isto é explicado, visto que o índice puntiforme $I_{s(50)\perp}$ (numerador) diminui a uma taxa muito maior ao passar do grau de intemperismo C2/A2 a C4/A2 em relação ao índice puntiforme $I_{s(50)\parallel}$ (denominador). Assim, esta relação tende a diminuir, o que significa que o aumento do intemperismo diminuiu um pouco o efeito da anisotropia na matriz rochosa. Já segundo as tabelas reportadas por Suárez-Burgoa (2008), este material pode ser considerado como altamente anisotrópico.

5.2.9.2 FILITO GRAFITOSO

Para este litotipo, foram executados ensaios com direção do carregamento de força orientado perpendicularmente ($I_{s(50)\perp}$) à foliação e com a direção do carregamento de força orientado paralelamente à foliação ($I_{s(50)\parallel}$) e também foi calculado o índice de anisotropia.

Na Tabela 5.22, resumiram-se estes resultados por meio do valor médio e desvio padrão para cada grau de intemperismo.

Tabela 5.22 - Resultados do índice à compressão puntiforme do filito grafitoso.

<i>Índice à compressão puntiforme</i>					
Propriedade	Grau de intemperismo	A1/C1	A1/C2	A2/C2	A3/C4
$I_{s(50)\parallel}$	# de dados	1	20	2	1
	Valor médio (MPa)	0,740	0,608	0,315	0,280
	Desvio padrão (MPa)	-	0,177	0,049	-
$I_{s(50)\perp}$	# de dados	1	3	3	0
	Valor médio (MPa)	1,3	1,043	0,393	-
	Desvio padrão (MPa)	-	0,522	0,347	-
Índice de anisotropia $I_{s(50)a} = \left(\frac{I_{s(50)\perp}}{I_{s(50)\parallel}} \right)$	Valor médio	1,756	1,714	1,104	-

Da Figura 5.46 até a Figura 5.48, mostra-se a variação média destas propriedades segundo o grau de intemperismo.

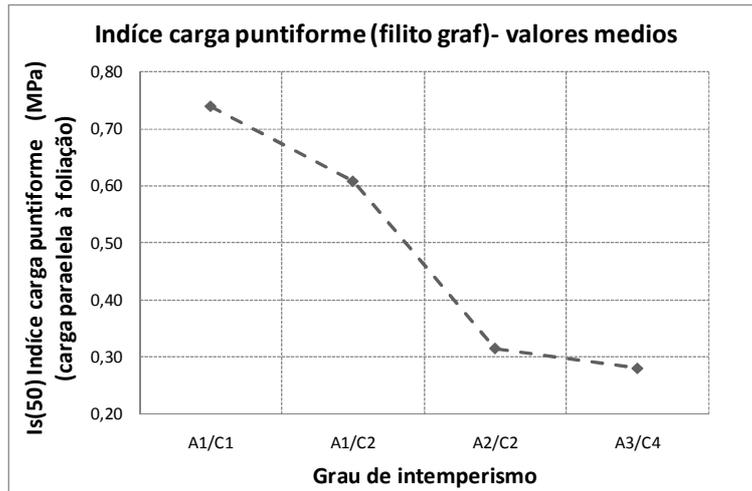


Figura 5.46- Variação média do $I_{s(50)//}$ do filito grafitoso segundo o grau de intemperismo.

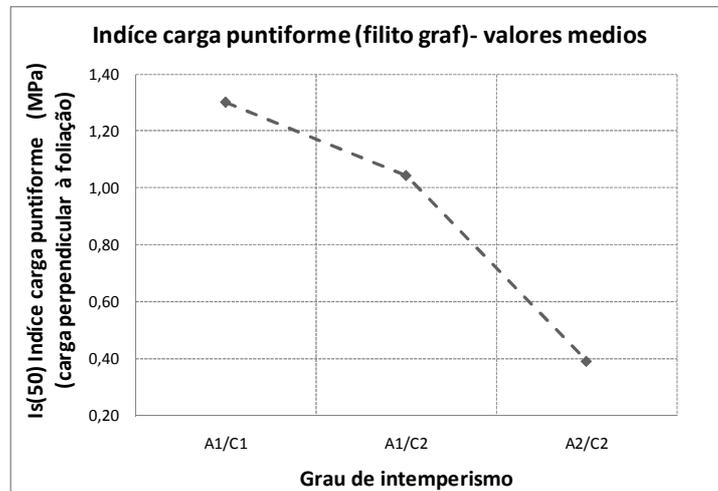


Figura 5.47 - Variação média do $I_{s(50)\perp}$ do filito grafitoso segundo o grau de intemperismo.

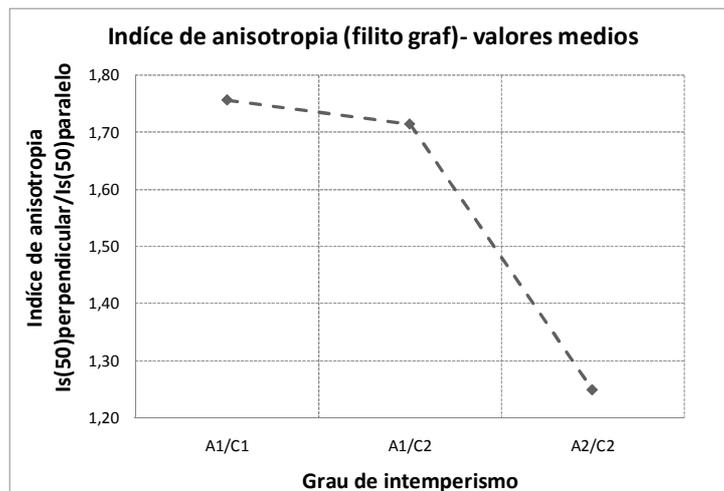


Figura 5.48 - Variação média do índice de anisotropia do filito grafitoso segundo o grau de intemperismo.

Observa-se, para o filito grafitoso, que os índices de resistência puntiforme $I_{s(50)//}$ e $I_{s(50)\perp}$

diminuem quanto é maior o grau de intemperismo e também que a resistência à compressão puntiforme é maior para as amostras ensaiadas com o carregamento perpendicular ao plano de foliação em comparação com as amostras ensaiadas com o carregamento paralelo ao plano de foliação. Para o índice $I_{s(50)\perp}$, observa-se uma atenuação desta propriedade ao passar do grau de intemperismo A2/C2 ao grau A3/C4.

Em relação ao índice de anisotropia, observa-se uma diminuição deste conforme aumenta o grau de intemperismo e também que, conforme o intemperismo aumenta, o valor deste índice tende a um, o que significa que a matriz rochosa tende a ser isotrópica com o aumento do intemperismo. Segundo as tabelas reportadas por Suárez-Burgoa (2008), este material pode ser considerado de pobre a moderadamente anisotrópico.

5.2.9.3 QUARTZITO

Para este litotipo, foram executados ensaios com direção do carregamento de força orientado perpendicularmente ($I_{s(50)\perp}$) à foliação e com a direção do carregamento de força orientado paralelamente à foliação ($I_{s(50)//}$), e também foi calculado o índice de anisotropia.

Na Tabela 5.23, resumiram-se estes resultados por meio do valor médio e desvio padrão para cada grau de intemperismo.

Tabela 5.23 - Resultados do índice à compressão puntiforme do quartzito.

<i>Índice à compressão puntiforme</i>					
Propriedade	Grau de intemperismo	A1/C1	A2/C1	A1/C2	A3/C4
$I_{s(50)//}$	# de dados	16	5	4	2
	Valor médio (MPa)	5,222	1,008	0,318	0,045
	Desvio padrão (MPa)	3,891	0,622	0,274	0,007
$I_{s(50)\perp}$	# de dados	4	1	2	2
	Valor médio (MPa)	5,650	2,390	0,980	0,690
	Desvio padrão (MPa)	3,343	-	0,396	0,099
Índice de anisotropia $I_{s(50)a} = \left(\frac{I_{s(50)\perp}}{I_{s(50)//}} \right)$	Valor médio	1,082	2,371	3,087	15,333

Da Figura 5.49 até a Figura 5.51, mostra-se a variação média destas propriedades segundo o grau de intemperismo.

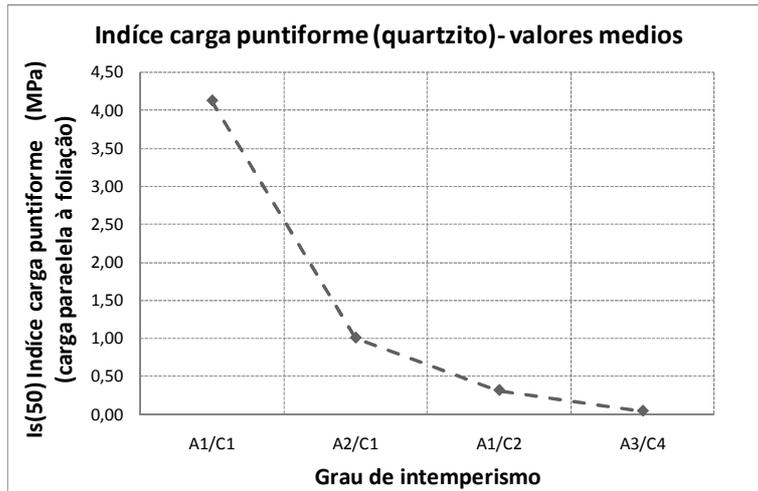


Figura 5.49 - Variação média do $I_{s(50) //}$ do quartzito segundo o grau de intemperismo.

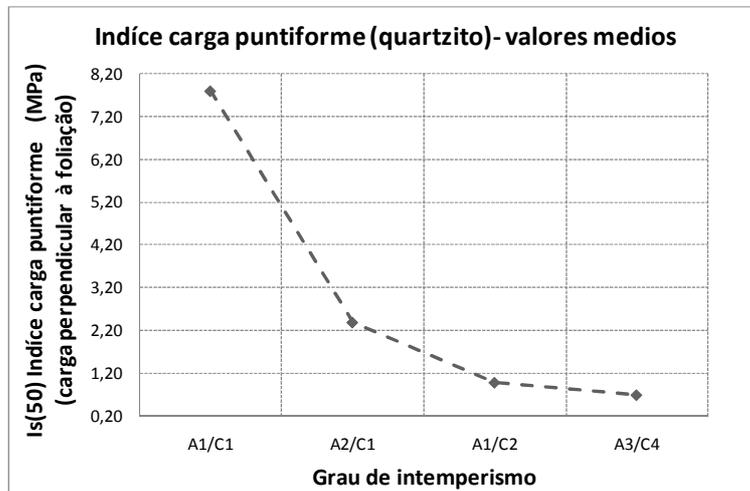


Figura 5.50 - Variação média do $I_{s(50) \perp}$ do quartzito segundo o grau de intemperismo.

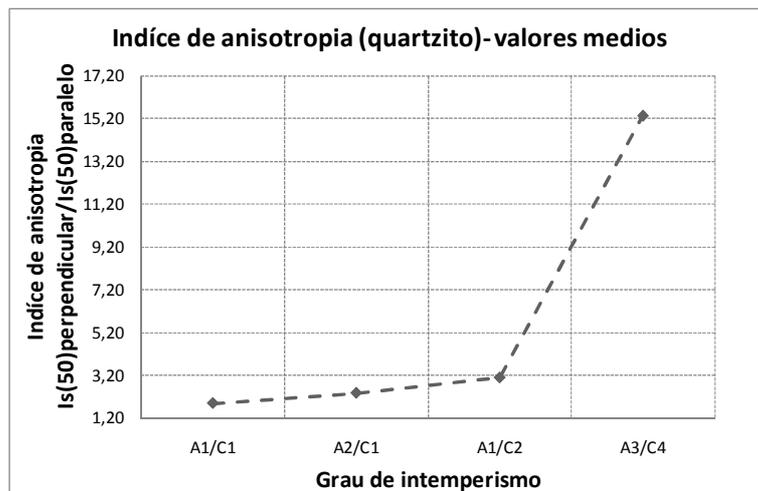


Figura 5.51 - Variação média do índice de anisotropia do quartzito segundo o grau de intemperismo.

Observa-se, para o quartzito, que os índices de resistência puntiforme $I_{50 \perp}$ e $I_{s(50) //}$ diminuem

quanto é maior o grau de intemperismo, sendo que os decréscimos tendem a atenuar com o aumento do intemperismo. Também é observado como a resistência à compressão puntiforme é maior para as amostras ensaiadas com o carregamento perpendicular ao plano de foliação em comparação com as amostras ensaiadas com o carregamento paralelo ao plano de foliação. Observa-se uma grande queda neste índice ao passar do grau A1/C1 ao grau A2/C1.

Em relação ao índice de anisotropia, observa-se um aumento do índice conforme aumenta o grau de intemperismo, sendo este resultado contrário aos obtidos no filito e filito grafitoso.

Isso poderia ser explicado visto que, de forma geral, os quartzitos do empreendimento apresentam finas passagens de filito ou filito grafitoso. Deste modo, quando o material é ensaiado perpendicularmente à foliação, a resistência vai depender principalmente do quartzito e, quando o material é ensaiado com carregamento paralelo à foliação, a resistência vai depender mais do material de preenchimento (filitos).

Assim, partindo da amostra de quartzito sã para uma com um grau avançado de intemperismo, tem-se que o material que vai ter uma maior taxa na redução das suas propriedades vai ser o material de preenchimento em comparação com o quartzito (rocha mais resistente ao intemperismo). Desta forma, a taxa de decréscimo do índice $I_{s(50)//}$ (denominador) será maior que a taxa de decréscimo do índice $I_{s(50)\perp}$ (numerador), o que vai gerar que o índice de anisotropia $I_{s(50)a}$ tenda a aumentar conforme aumenta o intemperismo (Figura 5.52).

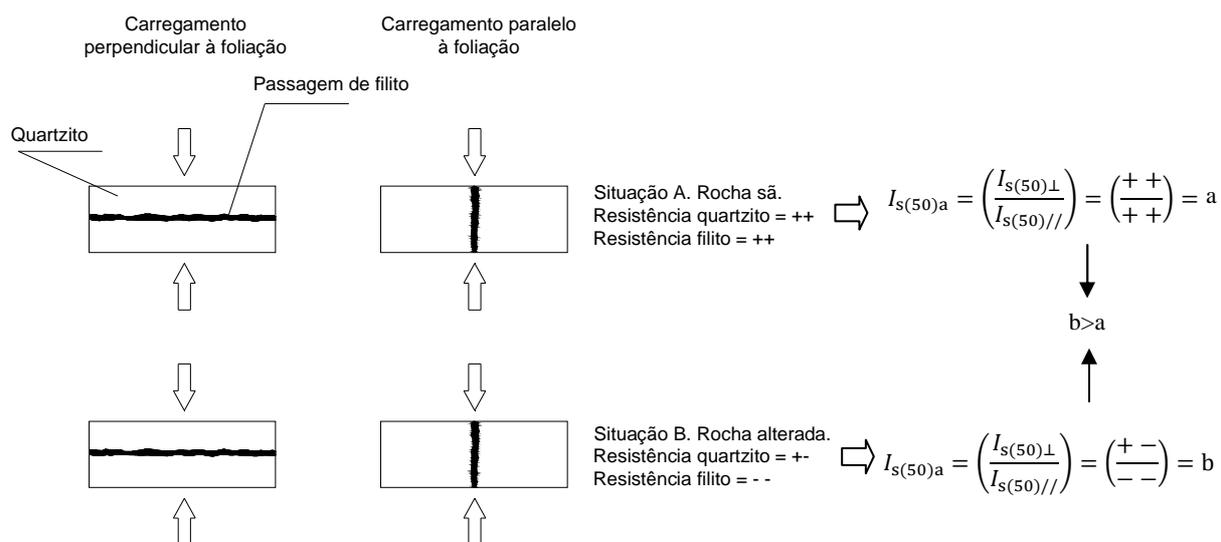


Figura 5.52 - Esquema da explicação do aumento do índice de anisotropia com o avanço de intemperismo no quartzito.

Finalmente, segundo as tabelas reportadas por Suárez-Burgoa (2008), este material pode ser

considerado de pobre a extremamente anisotrópico, isto dependendo claramente do grau de intemperismo no qual se encontre o quartzito.

5.2.10 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL, MÓDULO DE ELASTICIDADE E COEFICIENTE DE POISSON

A resistência à compressão uniaxial das amostras de rocha foi determinada no Laboratório de Mecânica de Rochas de Furnas, segundo a orientação da ASTM D2938-95 e da ISRM (2007), sendo a grande maioria destes ensaios instrumentados para obter a deformação longitudinal e lateral do corpo de prova. Estes ensaios foram realizados utilizando-se uma máquina rígida servo-controlada, com capacidade de aplicação de 5,0 MN de carga axial e rigidez de 5,02 MN/mm. A vista geral do equipamento é apresentada na Figura 5.53.

As deformações foram medidas por meio de um conjunto de três transdutores de deslocamento do tipo LVDT, dois deles dispostos diametralmente opostos à geratriz do corpo de prova e destinados à obtenção da deformação axial do mesmo. Esses transdutores foram fixados em dois anéis apoiados em cabeçotes de aço de alta dureza em contato com as extremidades do corpo de prova. O terceiro transdutor foi fixado à meia altura do corpo de prova por meio de um sistema de corrente, de forma a obter a deformação circunferencial. O detalhe da montagem do corpo de prova pode ser visualizado na Figura 5.54.

Os corpos de prova foram obtidos a partir de extração em amostra indeformada provenientes de blocos e de testemunhos (Figura 5.55) moldados no formato de corpos de prova cilíndricos de aproximadamente 54 mm de diâmetro, sendo a relação altura x diâmetro maior ou igual a 2.

Os corpos de prova foram submetidos à saturação em água por um período mínimo de 24 horas e o carregamento foi controlado usando uma razão de deformação radial máxima limite para os corpos de prova por unidade de tempo, permitindo a definição contínua do diagrama tensão x deformação. Os ensaios foram conduzidos com velocidade de deformação constante igual a 0,5 mm/min. O plano de aplicação da carga foi aquele definido pela extração dos testemunhos.

Assim, foram feitas determinações da resistência à compressão uniaxial, módulo de elasticidade secante e coeficiente de Poisson para o filito, o filito grafitoso e o quartzito, sendo os resultados agrupados segundo o tipo de litologia e grau de intemperismo (Apêndice B).



Figura 5.53 - Sistema servo-controlado para ensaios de compressão.



Figura 5.54 - Detalhe da montagem do corpo de prova. (Furnas, 2009).



Figura 5.55 - Processo para obtenção de amostras. (Furnas, 2009).

5.2.10.1 FILITO

Na Tabela 5.24, sumarizam-se estes resultados por meio do valor médio e desvio padrão para

cada grau de intemperismo. Da Figura 5.56 até a Figura 5.58, mostra-se a variação média destas propriedades segundo o grau de intemperismo.

Tabela 5.24 - Resultados da compressão uniaxial para o filito.

Resistência à compressão uniaxial com instrumentação			
Propriedade	Grau de intemperismo	A2/C2	A2/C3
	# de dados	7	3
Resist. Comp. Uniaxial σ_c	Valor médio (MPa)	7,21	4,02
	Desvio padrão (MPa)	3,11	2,71
Módulo de elasticidade E_s	Valor médio (GPa)	0,93	0,84
	Desvio padrão (GPa)	0,84	0,40
Coeficiente de Poisson ν	Valor médio	0,028	0,046
	Desvio padrão	0,017	0,024

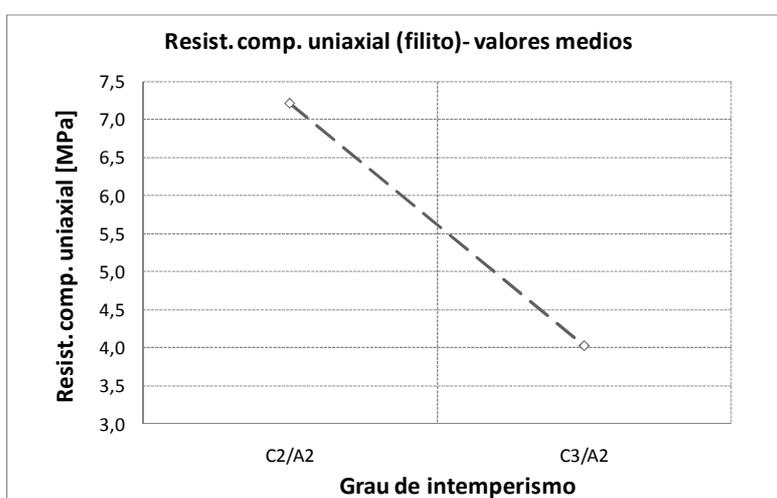


Figura 5.56 - Variação média da resistência à compressão uniaxial do filito segundo o grau de intemperismo.

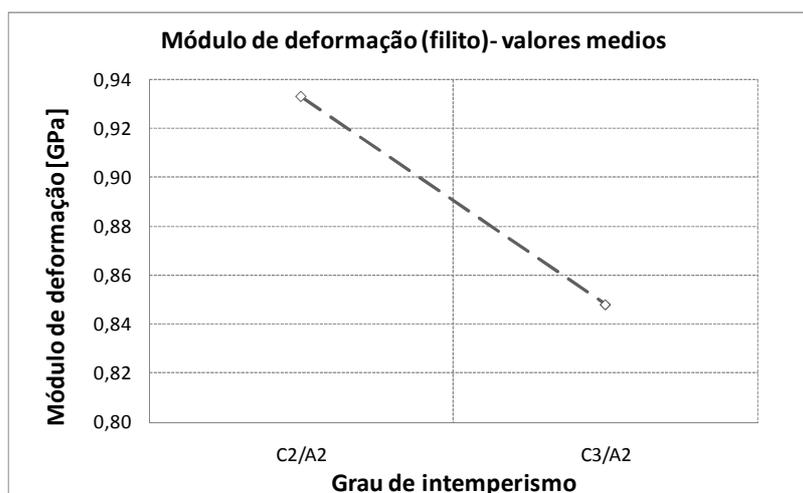


Figura 5.57 - Variação média do módulo de elasticidade secante do filito segundo o grau de intemperismo.

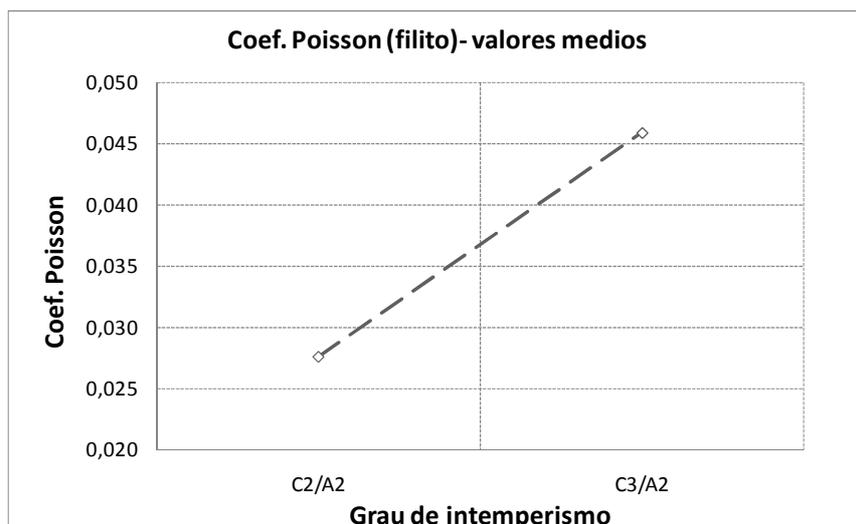


Figura 5.58 - Variação média do coeficiente de Poisson do filito segundo o grau de intemperismo.

Dos resultados obtidos, observa-se a diminuição da resistência à compressão uniaxial e do módulo de elasticidade secante conforme aumenta o grau de intemperismo. Já em relação ao coeficiente de Poisson, é observado um aumento deste valor quando aumenta o intemperismo.

5.2.10.2 FILITO GRAFITOSO

Na Tabela 5.25, resumem-se os resultados obtidos para o filito grafitoso por meio do valor médio e desvio padrão para cada grau de intemperismo, sendo que, neste caso, as amostras correspondentes ao grau de intemperismo A4/C4 foram instrumentadas somente para obter a deformação axial e não a radial. Desta forma, não foi possível estimar o coeficiente de Poisson para este grau de intemperismo.

Tabela 5.25 - Resultados da compressão uniaxial para o filito grafitoso.

<i>Resistência à compressão uniaxial com instrumentação</i>					
Propriedade	Grau de intemperismo	A1/C2	A2/C2	A3/C3	A4/C4
	# de dados	1	1	4	3
Resist. Comp. Uniaxial σ_c	Valor médio (MPa)	20,67	6,56	3,85	0,28
	Desvio padrão (MPa)	-	-	1,09	0,08
Módulo de elasticidade E_s	Valor médio (GPa)	1,71	0,99	0,32	0,01
	Desvio padrão (GPa)	-	-	0,08	0,005
Coeficiente de Poisson ν	Valor médio	0,004	0,010	0,011	-
	Desvio padrão	-	-	0,005	-

Da Figura 5.59 até a Figura 5.61, mostra-se a variação média destas propriedades segundo o grau de intemperismo.

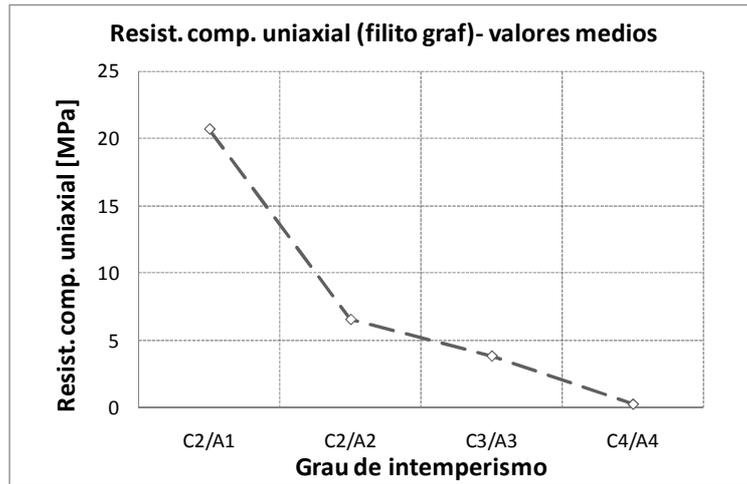


Figura 5.59 - Variação média da resistência à compressão uniaxial do filito grafitoso segundo o grau de intemperismo.

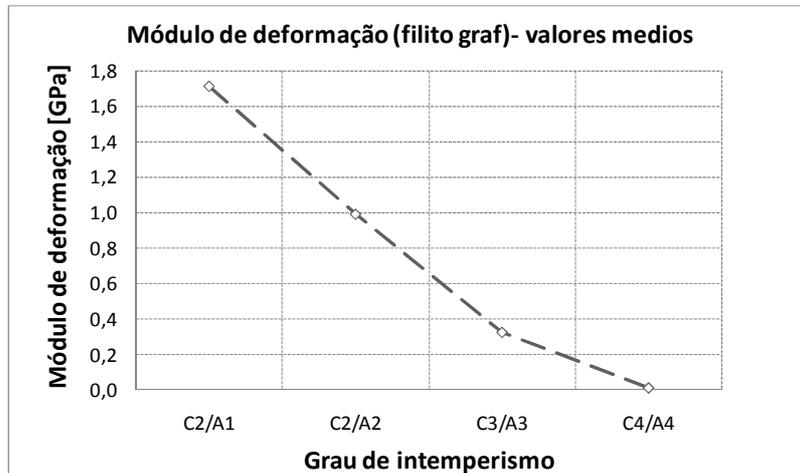


Figura 5.60 - Variação média do módulo de elasticidade secante do filito grafitoso segundo o grau de intemperismo.

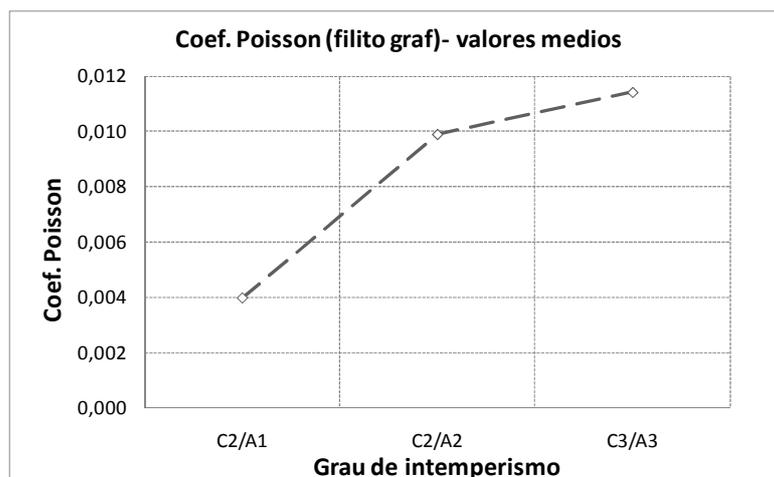


Figura 5.61 - Variação média do coeficiente de Poisson do filito grafitoso segundo o grau de intemperismo.

Dos resultados obtidos, observa-se a diminuição da resistência à compressão uniaxial e do módulo de elasticidade conforme aumenta o grau de intemperismo. Os valores de resistência à compressão uniaxial são menores aos valores apresentados por Beavis (1985), sendo que estes valores variam em média de 7-28 MPa para um filito dolomítico e de 6-40 MPa para um filito calcário, sendo estas rochas de Nova Gales do Sul na Austrália.

Já os valores do módulo de elasticidade secante são menores que os valores reportados por Beavis (1985), sendo que este calculou o módulo de elasticidade tangente. Estes valores variam entre 1,6-4,9 GPa para um filito calcário e entre 0,8-2,5 GPa para um filito dolomítico, sendo estas rochas de Nova Gales do Sul na Austrália.

O coeficiente de Poisson aumenta conforme aumenta o grau de intemperismo, porém, chamam a atenção os baixos valores obtidos neste parâmetro. Desafortunadamente, Beavis (1985) não reporta valores de Poisson para filitos. Então, foram procurados, em outras fontes, valores referência para o coeficiente de Poisson no filito e diversas fontes (Zhao, 2008 e Lopes, 2006) concordavam que este valor está em torno de 0,2, maior ao encontrado nesta pesquisa para o filito e filito grafitoso.

5.2.10.3 QUARTZITO

Para este litotipo, foi determinada a resistência à compressão uniaxial, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson. Na Tabela 5.26, resumiram-se estes resultados por meio do valor médio e desvio padrão para cada grau de intemperismo.

Tabela 5.26 - Resultados da compressão uniaxial para o quartzito.

Resistência à compressão uniaxial com instrumentação			
Propriedade	Grau de intemperismo # de dados	A1/C1	C4/A3
Resist. Comp. Uniaxial σ_c	Valor médio (MPa)	98,76	20,05
	Desvio padrão (MPa)	8,41	-
Módulo de elasticidade E_s	Valor médio (GPa)	32,96	0,74
	Desvio padrão (GPa)	1,99	-
Coeficiente de Poisson ν	Valor médio	0,106	0,200
	Desvio padrão	0,107	-

Da Figura 5.62 até a Figura 5.64, mostra-se a variação média destas propriedades segundo o grau de intemperismo.

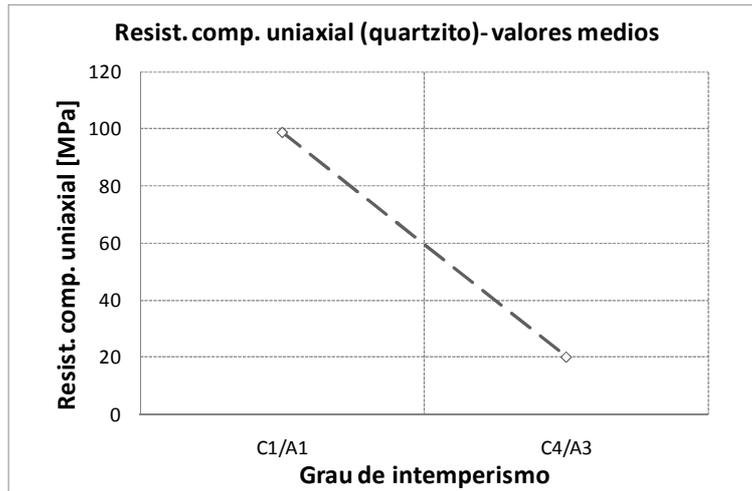


Figura 5.62 - Variação média da resistência à compressão uniaxial do quartzito segundo o grau de intemperismo.

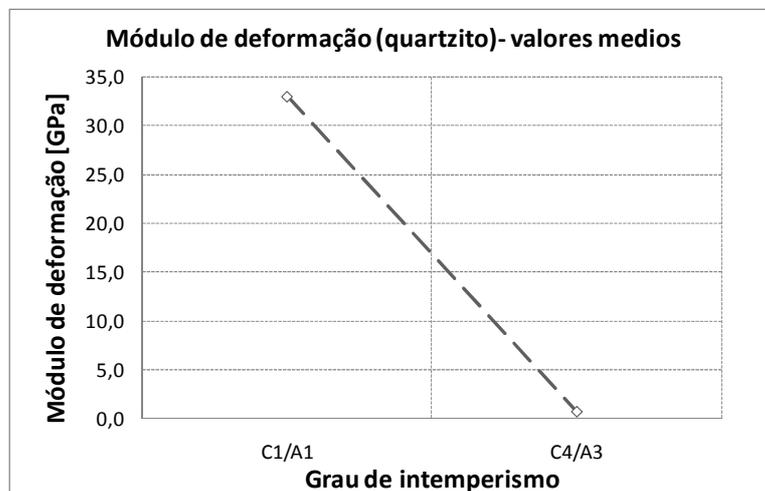


Figura 5.63 - Variação média do módulo de elasticidade secante do quartzito segundo o grau de intemperismo.

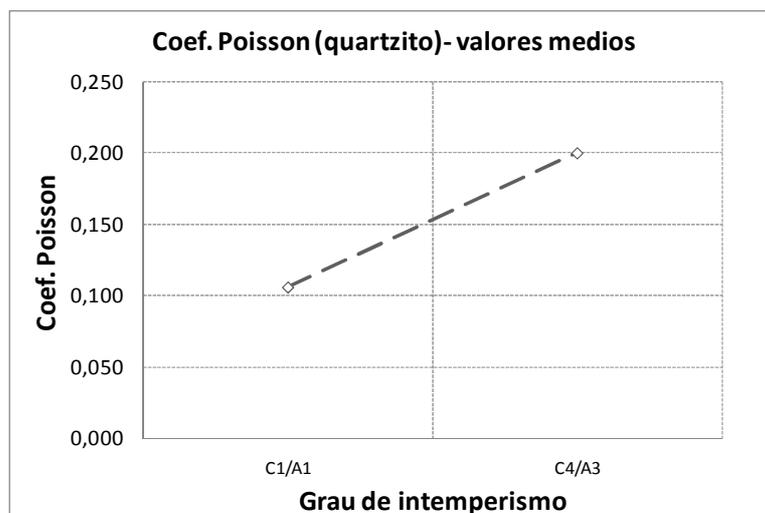


Figura 5.64 - Variação média do coeficiente de Poisson do quartzito segundo o grau de intemperismo.

Apesar de serem poucos dados, pode-se observar a grande diferença entre os parâmetros para um quartzito são C1/A1 e para um quartzito muito alterado C4/A3. Assim, é observada uma diminuição da resistência à compressão uniaxial e do módulo de elasticidade secante com o aumento no grau de intemperismo. Já para o módulo de Poisson é observado um aumento deste valor com o aumento no grau de intemperismo.

Os valores encontrados da resistência uniaxial do quartzito são menores que os valores reportados por Zhao (2008), os quais variam entre 150-300 MPa. Já os valores encontrados para o módulo de elasticidade secante do quartzito são menores que os valores reportados por Zhao (2008), os quais variam de 50-90 GPa. Finalmente, os valores encontrados do coeficiente de Poisson do quartzito são mais ou menos similares ao valor reportado por Zhao (2008), o qual está em torno de 0,17. Zhao (2008) não cita de onde provêm as rochas que ele analisou, mas, pelos resultados, poder-se-ia concluir que esses filitos e quartzitos correspondem a uma região não muito intemperizada.

5.2.11 ÍNDICE DO ESCLERÔMETRO SCHMIDT

Os ensaios de esclerometria foram realizados em campo em afloramentos de rocha, segundo os métodos sugeridos pela ISRM (2007) e com acompanhamento por geólogos de Furnas e da Projetista. O equipamento empregado foi o esclerômetro tipo ND DIGI-SCHMIDT 2 CONCRETE TESTER da companhia PROCEQ (Figura 5.65). Este equipamento conta com um *software* que permite a visualização do índice de Schmidt e a estimativa da resistência à compressão uniaxial durante a execução do ensaio. O esclerômetro capta medidas de resistência à compressão uniaxial num intervalo de 10-70 N/mm² (~15 – 200 MPa).



Figura 5.65 - Esclerômetro de Schmidt empregado.

Porém, os ensaios esclerométricos não apresentaram resultados satisfatórios devido a limitações do aparelho, visto que, para a grande maioria dos filitos ensaiados (90%), o

esclerômetro não obteve resposta, o que supõe uma resistência à compressão <15 MPa.

Isto pode ser confirmado nos ensaios de resistência à compressão uniaxial realizados para o filito na Seção 5.2.10.1. Para as amostras restantes de filito (10%), tem-se uma variação do índice de Schmidt entre 17 – 32, o que equivale a uma estimativa da resistência à compressão uniaxial que varia entre 22 - 37 MPa.

Já para os quartzitos, tem-se uma variação do índice de Schmidt entre 18 – 53, o que equivale a uma estimativa da resistência à compressão uniaxial que varia entre 25 - 140 MPa. Porém, devido ao fato de que, em campo, não foi associado o ensaio com o grau de intemperismo em termos da coerência e alteração, não foi possível observar a mudança deste parâmetro com o grau de intemperismo.

Mesmo assim, considera-se interessante apresentar os anteriores resultados, visto que deixam em evidência as limitações deste ensaio em rochas brandas, devido, em grande parte, ao equipamento empregado.

5.2.12 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA-ENSAIO BRASILEIRO

Os ensaios de tração por compressão diametral foram realizados no Laboratório de Mecânica de Rochas de Furnas, segundo os métodos sugeridos pela ISRM (2007) e orientações da ASTM D3967-05. Os corpos de prova foram moldados com forma cilíndrica de diâmetro entre 54-74 mm e altura entre 30-50 mm aproximadamente, os quais estiveram submetidos a uma saturação prévia em água por um período mínimo de 24 h antes da realização dos ensaios.

Estes ensaios foram realizados utilizando-se uma máquina hidráulica servo-controlada modelo Kratos KE30000MP, com capacidade de aplicação de 300 kN. A máquina é controlada pelo software Kratos TRC V.59A-USB. A Figura 5.66 mostra a máquina empregada para fazer o ensaio brasileiro. Os resultados de algumas amostras não foram consideradas representativas, visto que a ruptura não ocorreu paralela à direção diametral da aplicação da carga.

Assim, foram feitas determinações da resistência à tração por compressão diametral para o filito, o filito grafitoso e o quartzito, sendo os resultados agrupados segundo o tipo de litologia e grau de intemperismo (Apêndice B). A seguir, são apresentados os resultados.



Figura 5.66 - Máquina para executar o ensaio brasileiro. (Suárez-Burgoa, 2008)

5.2.12.1 FILITO

Para este litotipo, foi determinada a resistência à tração por compressão diametral. No entanto, todos os corpos de prova apresentaram ruptura em placas, fator influenciado pela xistosidade estar disposta perpendicularmente ao eixo do testemunho. Assim, estes valores não podem ser considerados como a resistência à tração direta.

Mesmo assim, na Tabela 5.27, resumiram-se os resultados obtidos por meio do valor médio e desvio padrão para cada grau de intemperismo.

Tabela 5.27 - Resultados da resistência à tração para o filito.

<i>Resistência à tração por compressão diametral σ_t</i>		
Grau de intemperismo	C1/A2	C2/A2
# de dados	2	8
Valor médio (MPa)	6,76	6,07
Desvio padrão (MPa)	3,27	2,15

Outra forma geralmente aceita para estimar indiretamente a resistência à tração é considerar que, para materiais rochosos, a resistência à tração é aproximadamente 10% da resistência à compressão uniaxial. Assim considerando $\sigma_c = 7,2$ MPa para o grau de intemperismo C2/A2 (Tabela 5.24), a resistência à tração estimada seria de 0,72 MPa.

Destes resultados, poder-se-ia concluir que deveriam ser feitas determinações diretas da resistência à tração neste tipo de material, visando verificar se a resistência à tração pode ser estimada como 10% da resistência à compressão uniaxial. Também poder-se-ia concluir que o ensaio por compressão diametral não é adequado para a determinação indireta da resistência à tração para este tipo de rocha.

5.2.12.2 FILITO GRAFITOSO

Para este litotipo, foi determinada a resistência à tração por compressão diametral. No entanto, aproximadamente 50% dos corpos de prova ensaiados apresentaram ruptura em placas, fator influenciado pela xistosidade estar disposta perpendicularmente ao eixo do testemunho.

Assim, na Tabela 5.28, resumiram-se os resultados obtidos por meio do valor médio e do desvio padrão para cada grau de intemperismo (para as amostras que tiveram sua ruptura paralela à direção diametral da aplicação da carga).

Tabela 5.28 - Resultados da resistência à tração para o filito grafitoso.

Resistência à tração por compressão diametral σ_t		
Grau de intemperismo	C1/A1	C2/A2
# de dados	1	3
Valor médio (MPa)	8,22	5,48
Desvio padrão (MPa)	-	1,89

Na Figura 5.67, mostra-se a variação média destas propriedades segundo o grau de intemperismo.

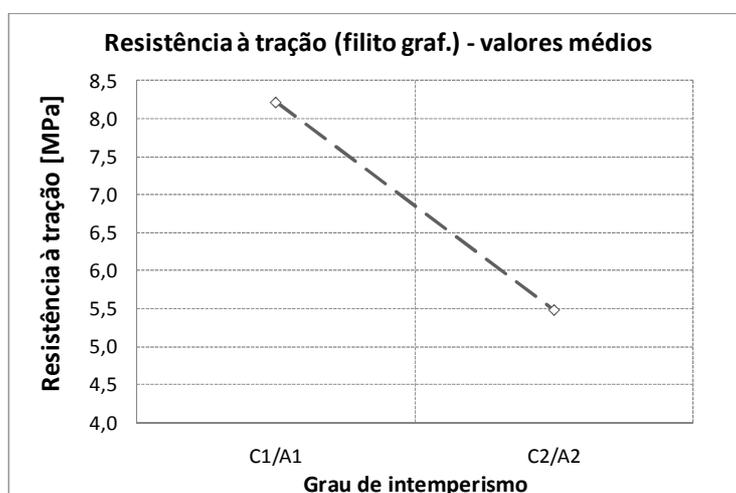


Figura 5.67 - Variação média da resistência à tração do filito grafitoso segundo o grau de intemperismo.

Estimando a resistência à tração como sendo 10% da resistência à compressão uniaxial (Tabela 5.25), tem-se que os valores médios da resistência à tração estão entre 0,65 e 2,06 MPa para os graus de intemperismo A2/C2 e A1/C1, respectivamente. Assim, observa-se uma diferença significativa entre os dois métodos empregados para estimar a resistência à tração.

5.2.12.3 QUARTZITO

Para este litotipo, foi determinada a resistência à tração por compressão diametral, sendo ensaiados dez corpos de provas, dentre os quais dois corpos de prova não tiveram a sua ruptura pela geratriz do corpo de prova.

Na Tabela 5.29, resumam-se os resultados obtidos por meio do valor médio e do desvio padrão para cada grau de intemperismo (para as amostras que tiveram sua ruptura paralela à direção diametral da aplicação da carga).

Tabela 5.29 - Resultados da resistência à tração para o quartzito.

<i>Resistência à tração por compressão diametral σ_t</i>		
Grau de intemperismo	C1/A1	C2/A1
# de dados	4	4
Valor médio (MPa)	9,09	6,59
Desvio padrão (MPa)	5,09	2,59

Na Figura 5.68, mostra-se a variação média destas propriedades segundo o grau de intemperismo.

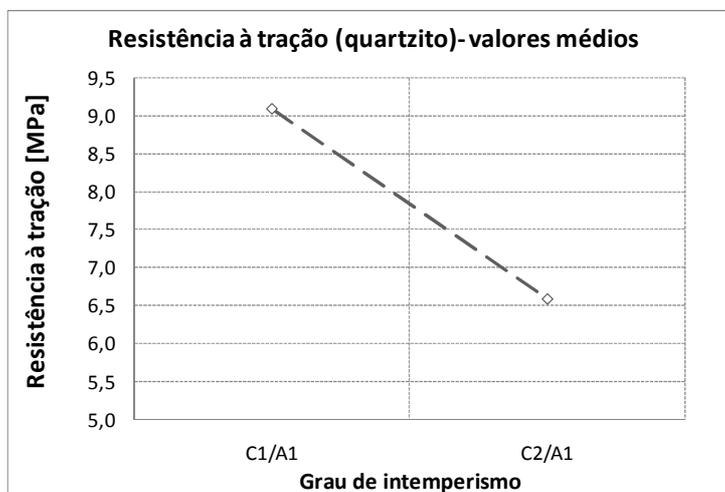


Figura 5.68 - Variação média da resistência à tração do quartzito segundo o grau de intemperismo.

Estimando a resistência à tração como sendo 10% da resistência à compressão uniaxial (Tabela 5.26), tem-se que os valores médios da resistência à tração estão entre 2,00 e 9,87 MPa para os graus de intemperismo A3/C4 e A1/C1, respectivamente. Assim, observa-se uma razoável concordância entre os dois métodos empregados para estimar a resistência à tração.

5.2.13 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO

Os ensaios de resistência ao cisalhamento direto foram realizados no Laboratório de Mecânica de Rochas de Furnas, segundo os métodos sugeridos pela ISRM (2007) e orientações da ASTM D5607.

Os ensaios foram realizados em uma prensa para cisalhamento direto, onde a carga cisalhante é aplicada por meio de um sistema hidráulico e a carga normal por meio da colocação de pesos em uma balança. Este equipamento conta com quatro LVDTs para medir o deslocamento normal e dois LVDTs para medir o deslocamento na direção da carga de cisalhamento (Figura 5.69).

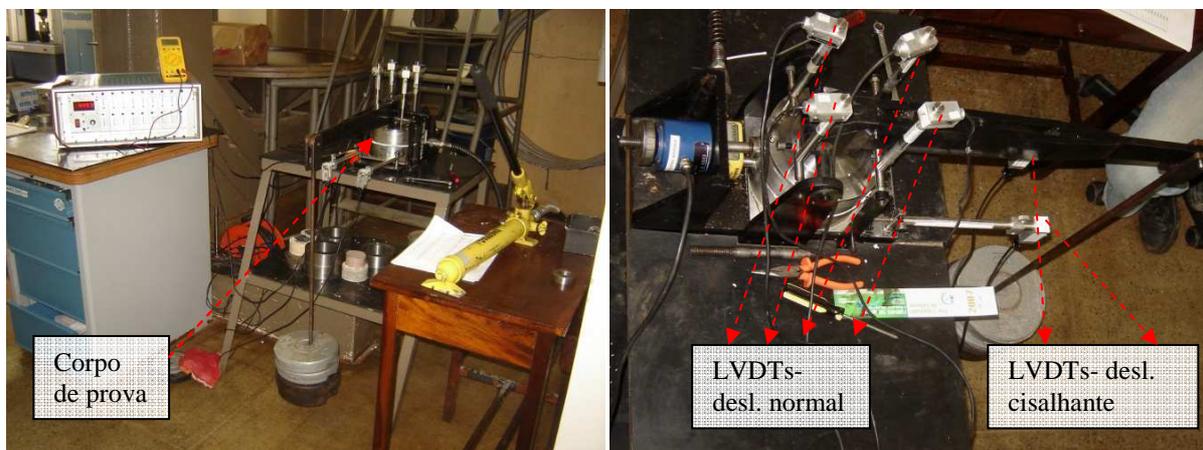


Figura 5.69 - Equipamento de cisalhamento direto em núcleos de rocha. (Furnas, 2009).

Estes ensaios foram executados unicamente em corpos de prova de rocha de filito grafitoso de aproximadamente 54 mm de diâmetro e com grau de intemperismo C2/A2. A tensão cisalhante foi aplicada em direção paralela ao plano de foliação. As tensões normais se encontram na faixa de 0,5 a 2 MPa, sendo ensaiadas varias amostras dentro desta faixa.

A preparação do corpo de prova consistiu em orientar o corpo de prova, aplicar uma calda cimentante na caixa de cisalhamento base para fixar a amostra. Posteriormente, é colocada uma divisória de isopor e, finalmente, é colocada a caixa cisalhante superior, a qual também é preenchida com calda cimentante. A Figura 5.70 mostra o procedimento de preparação dos corpos de prova para os ensaios.



Figura 5.70 - Preparação de corpo de prova para ensaio de cisalhamento direto.

Na Figura 5.71, mostra-se a envoltória de ruptura para o filito grafitoso C2/A2 definida pelos diversos ensaios de cisalhamento direto para diferentes tensões normais aplicadas.

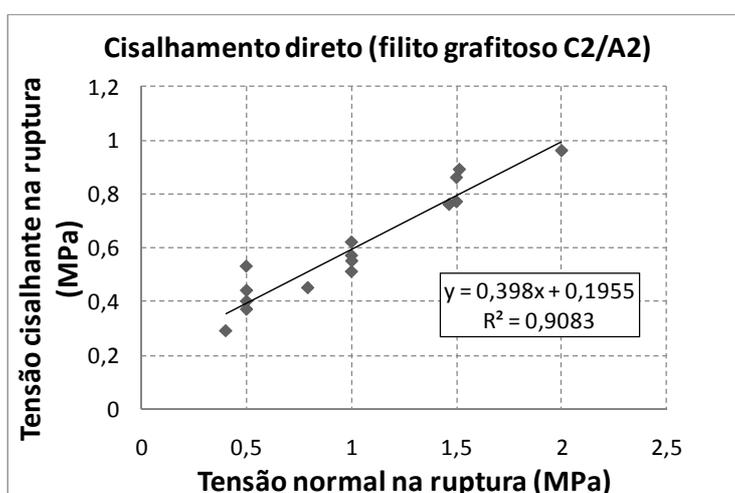


Figura 5.71 - Envoltória de resistência ao cisalhamento direto do filito grafitoso C2/A2.

Da figura anterior, pode-se definir uma coesão de 195,5 kPa e um ângulo de atrito de 21,7° para o filito grafitoso com grau de intemperismo A2/C2. Devido à falta de ensaios de cisalhamento em filitos grafitosos com diferente grau de intemperismo, não foi possível avaliar a mudança da resistência ao cisalhamento direto conforme o grau de intemperismo. Igualmente, devido à carência de ensaios, não foi possível definir a resistência ao cisalhamento para o filito e o quartzito.

5.2.14 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO TRIAXIAL

Os ensaios de resistência à compressão triaxial foram realizados no Laboratório de Mecânica de Rochas de Furnas, segundo os métodos sugeridos pela ISRM (2007). O equipamento para realizar o ensaio de compressão triaxial foi o mesmo utilizado no ensaio de compressão simples, cuja descrição se encontra na Seção 5.2.10 e na Figura 5.53. Este ensaio foi executado unicamente em três núcleos de rocha de filito grafitoso com grau de intemperismo C4/A4 e com registro 4.0052.09.

Os corpos de prova foram ensaiados com aproximadamente 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Após a montagem do corpo de prova na célula, o mesmo foi submetido ao confinamento (consolidação) por aproximadamente 24 h. A fase de cisalhamento começou logo após a estabilização das leituras de variação volumétrica da fase de confinamento.

Os ensaios foram realizados com tensões confinantes de aproximadamente 200, 400 e 600 kPa. A ruptura dos corpos de prova foi efetuada com velocidade de deformação constante de 0,067 mm/min e os ensaios foram conduzidos até uma deformação específica axial mínima da ordem de 15%. A saturação foi realizada por contra pressão de 300 kPa.

Na Figura 5.72, mostra-se a envoltória de ruptura para o filito grafitoso C4/A4 definida pelos diversos ensaios de compressão triaxial para diferentes tensões normais aplicadas.

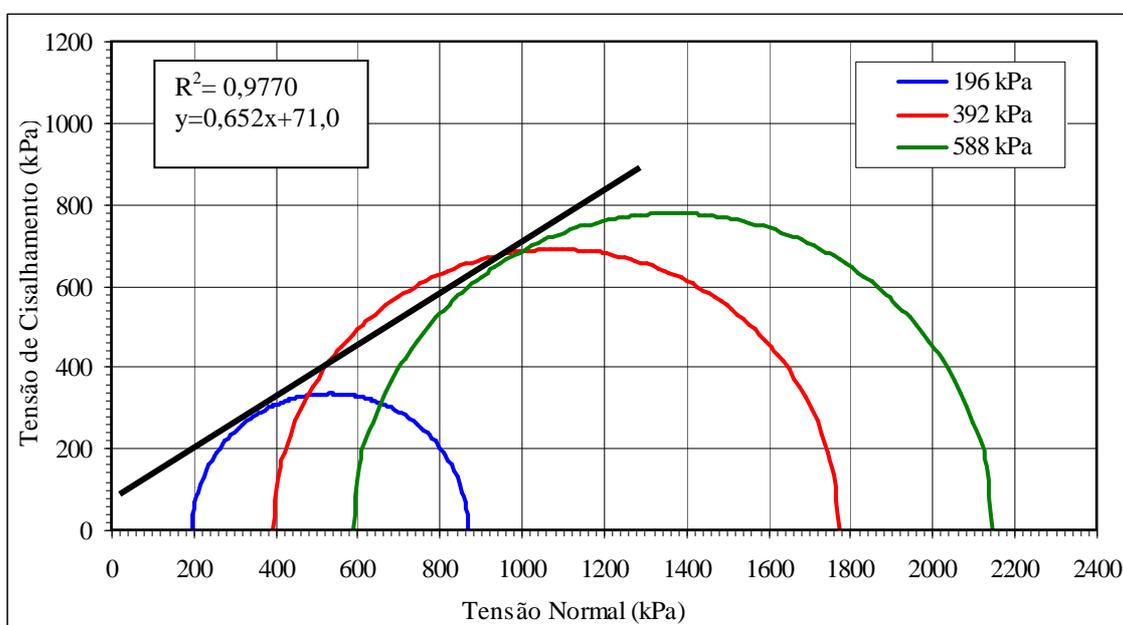


Figura 5.72 - Envoltória de resistência ao à compressão triaxial do filito grafitoso C4/A4.

Assim, o filito grafitoso C4/A4 tem uma coesão de 71 kPa e um ângulo de atrito de 33,1°. Fazendo uma comparação com os resultados do cisalhamento direto para o filito grafitoso A2/C2, pode-se observar que o filito grafitoso C2/A2 apresenta uma maior coesão (195,5 kPa), no entanto, este apresenta um menor ângulo de atrito (21,7°).

Tal como foi comentado na Seção 3.3, a determinação de σ_{ci} e de m_i pode ser feita com dados de ensaios triaxiais em rocha intacta, usando técnicas para ajustar a Equação 3.8 aos valores de σ'_3 e σ'_1 .

Assim, para o filito grafitoso C4/A4 (com registro 4.0052.09), foram estimados os parâmetros

σ_{ci} e m_i por meio do *software* RocLab da empresa Rocscience. Este programa faz o ajuste da Equação 3.8 aos valores de σ'_3 e σ'_1 usando o método de Levenberg-Marquardt (Rocscience, 2004). A Figura 5.73 mostra os resultados obtidos ao usar o RocLab.

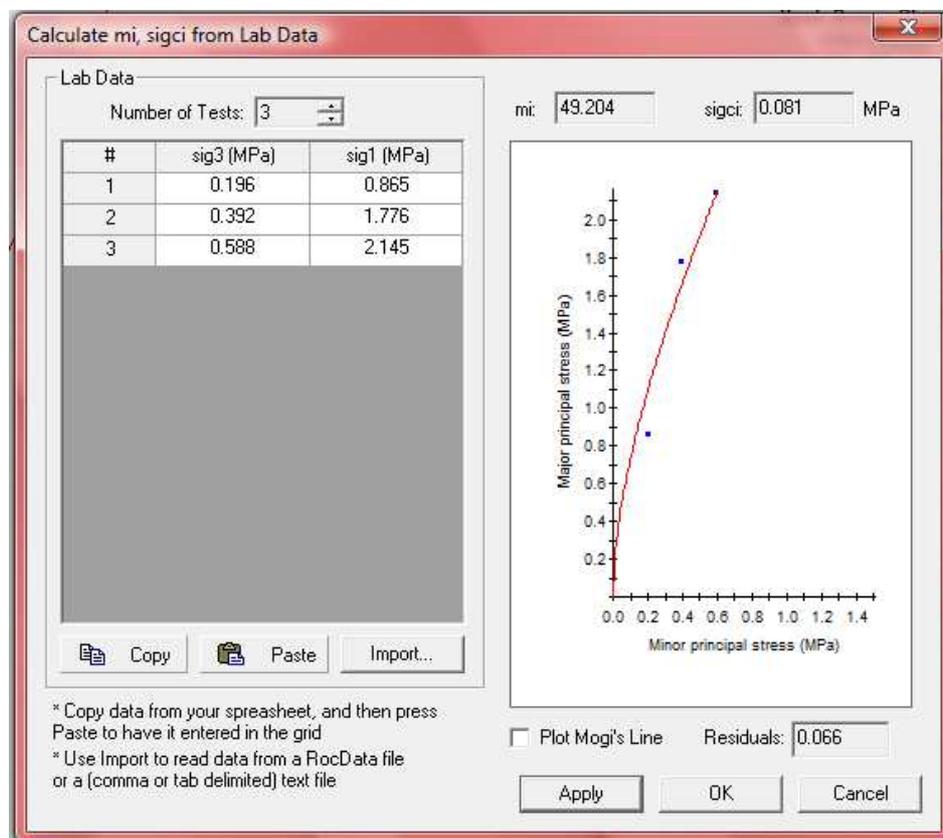


Figura 5.73 - Obtenção dos parâmetros σ_{ci} e m_i para o filito grafitoso C4/A4 a partir do ensaio de compressão triaxial e empregando o RocLab.

Obteve-se um valor de resistência à compressão uniaxial $\sigma_{ci} = 81\text{kPa}$, sendo este resultado menor que os valores encontrados para este mesmo material nos ensaios diretos de resistência uniaxial, os quais apresentaram um valor médio de 280 kPa (Tabela 5.25). Mesmo assim, considera-se que estes valores são compatíveis.

Já o valor de $m_i = 49,2$ é um resultado bem maior que os valores sugeridos por Hoek (2007) os quais estão entorno de 7 ± 3 .

5.2.15 CORRELAÇÕES ENTRE PROPRIEDADES DA ROCHA INTACTA

Nesta seção, são apresentadas as correlações entre diversas propriedades da rocha intacta para os três litotipos de estudo. Para isto, foram selecionadas as amostras onde foram determinadas mais de duas propriedades. A seguir, são apresentadas as correlações feitas:

- Massa específica seca versus porosidade
- Massa específica seca versus absorção
- Massa específica seca versus índice de vazios
- Massa específica seca versus massa específica saturada
- Velocidade de propagação da onda P versus densidade seca ao natural

5.2.15.1 FILITO

Da Figura 5.74 até a Figura 5.78, são apresentadas as correlações entre diferentes propriedades para o filito.

De forma geral, para as diferentes propriedades correlacionadas, observa-se uma variabilidade significativa dos resultados, principalmente no filito com grau de intemperismo C2/A2, fato gerado pelas limitações no critério para definir o grau de intemperismo e pela variabilidade intrínseca do material ensaiado.

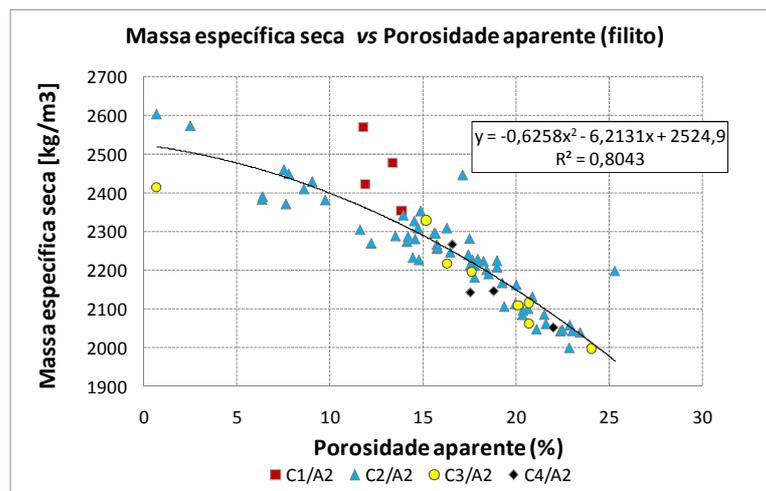


Figura 5.74 - Massa específica seca versus porosidade -filito-.

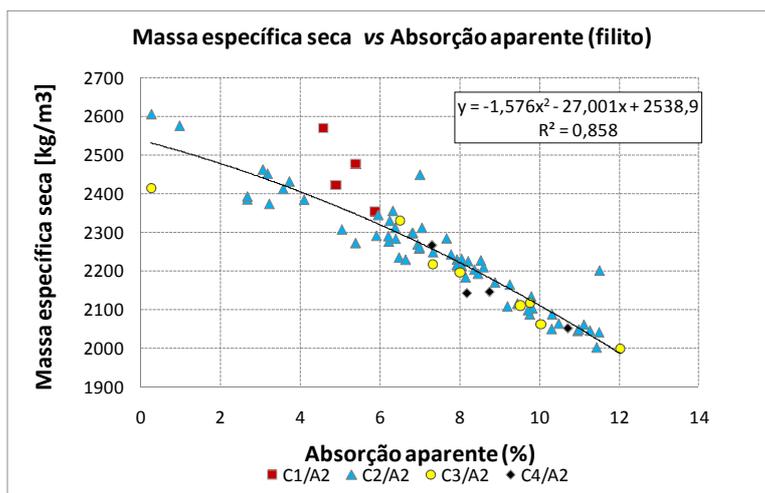


Figura 5.75 - Massa específica seca versus absorção -filito-.

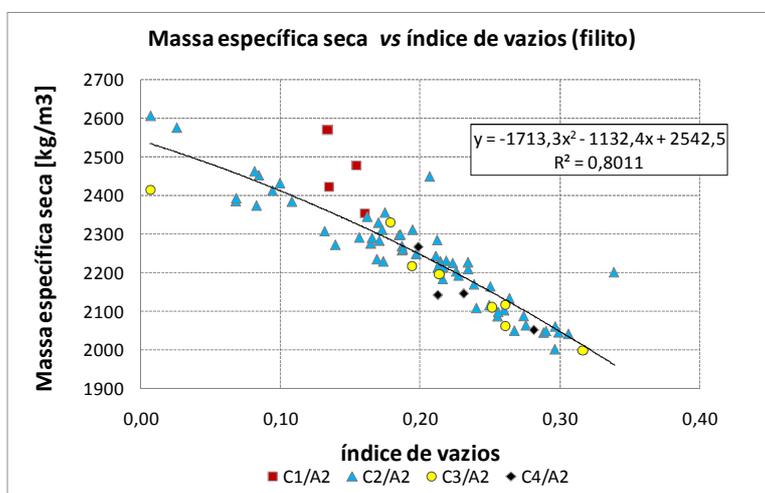


Figura 5.76 - Massa específica seca versus índice de vazios -filito-.

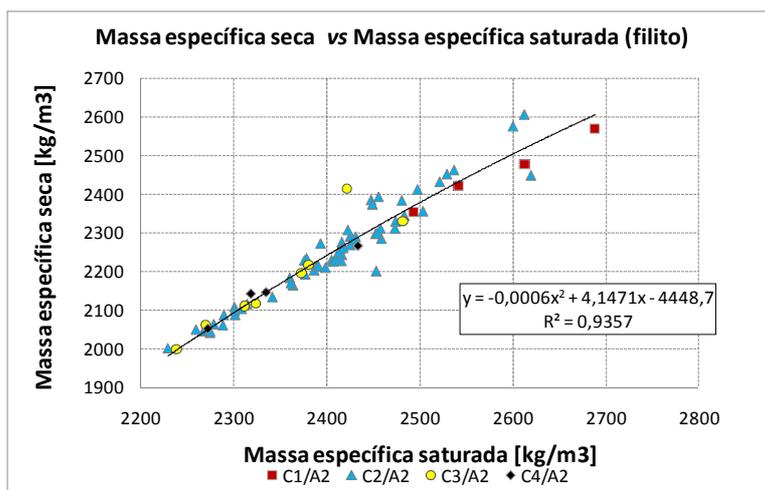


Figura 5.77 - Massa específica seca versus massa específica saturada -filito-.

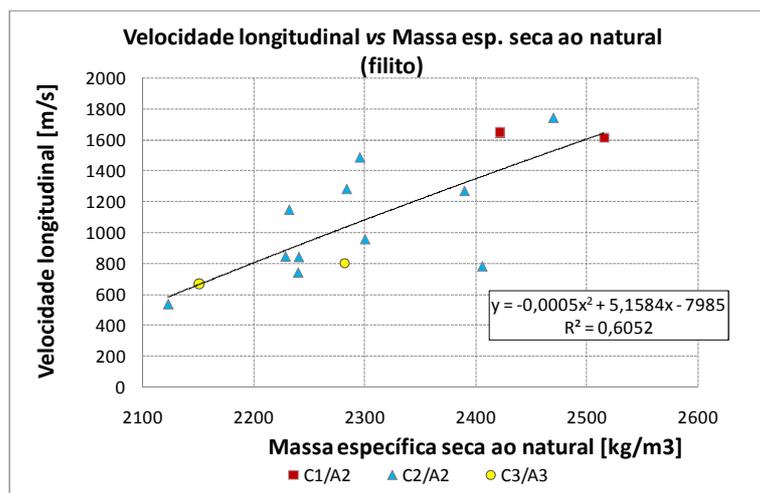


Figura 5.78 - Velocidade de propagação da onda P *versus* densidade seca ao natural -filito-.

5.2.15.2 FILITO GRAFITOSO

Da Figura 5.79 até a Figura 5.83, são apresentadas as correlações entre diferentes propriedades para o filito grafitoso. Neste caso, observa-se para a maioria das correlações feitas (com exceção da correlação da velocidade de onda P *versus* densidade seca ao natural), uma clara divisão entre os resultados das propriedades e os diferentes graus de intemperismo. Também é observada uma variabilidade pequena dos resultados obtidos entre um mesmo grau de intemperismo.

Chama a atenção que as correlações entre a massa específica seca, a porosidade aparente, a absorção e o índice de vazios apresentam uma forma semelhante. Isto é possível dado que a porosidade, a absorção e o índice de vazios foram calculados com os mesmos dados. Assim, devido à forma de cálculo, estas propriedades são combinações lineares entre si, embora tenham significado físico diferente.

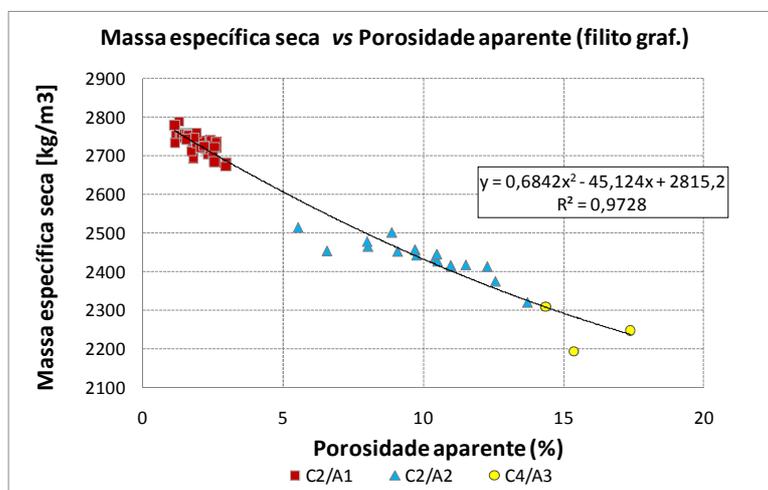


Figura 5.79 - Massa específica seca *versus* porosidade -filito grafitoso-.

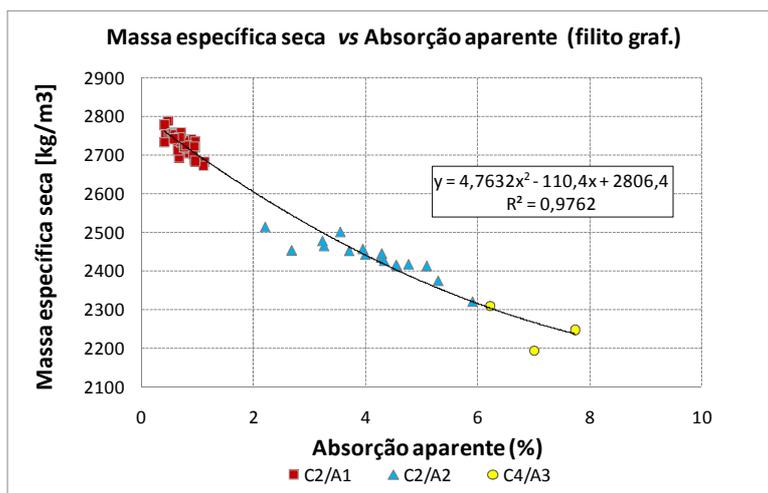
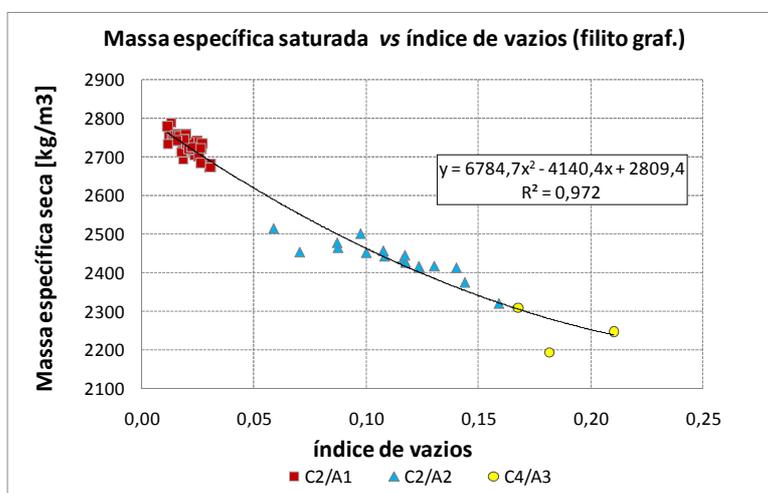


Figura 5.80 - Massa específica seca versus absorção -filito grafitoso-.



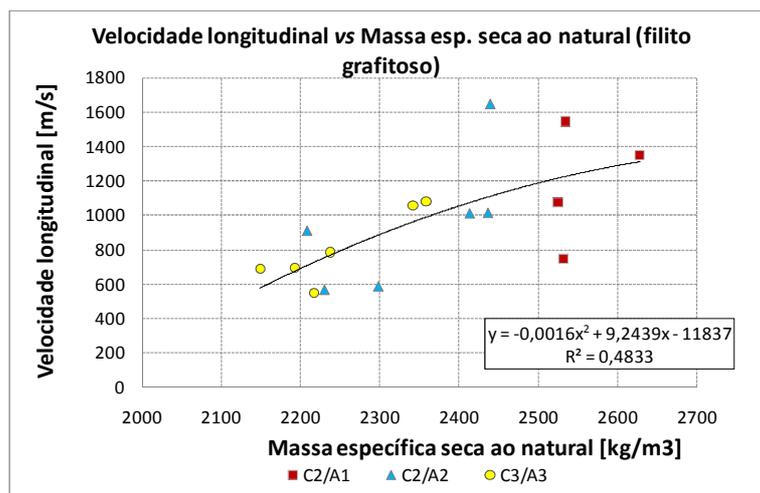


Figura 5.83 - Velocidade de propagação da onda P *versus* densidade seca ao natural -filito grafitoso-.

5.2.15.3 QUARTZITO

Da Figura 5.84 até a Figura 5.88, são apresentadas as correlações entre diferentes propriedades para quartzito.

Neste caso, observa-se, para as correlações feitas, uma clara divisão entre os resultados das propriedades e os graus de intemperismo que estão situados nos extremos (C1/A1 e C4/A3). Já para os graus de intemperismo intermediários (C1/A2 e C2/A1), esta divisão não é clara, sendo somente possível definir um valor característico por meio dos valores médios dos seus resultados.

Também é observada uma variabilidade moderada dos resultados obtidos entre um mesmo grau de intemperismo.

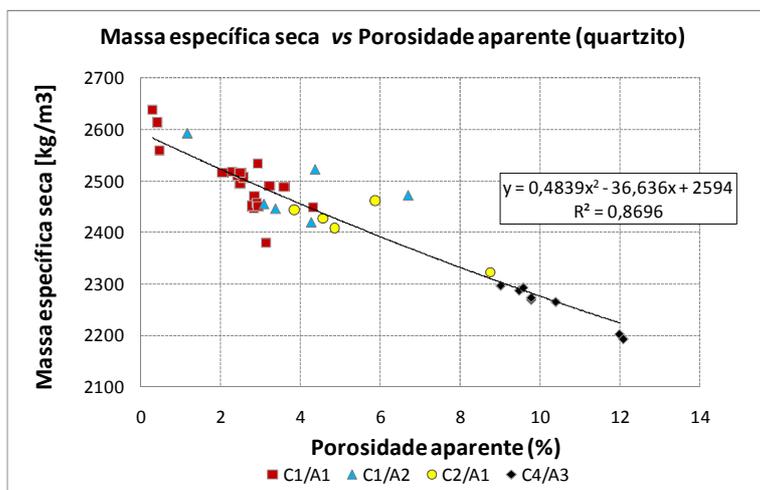


Figura 5.84 - Massa específica seca *versus* porosidade -quartzito-.

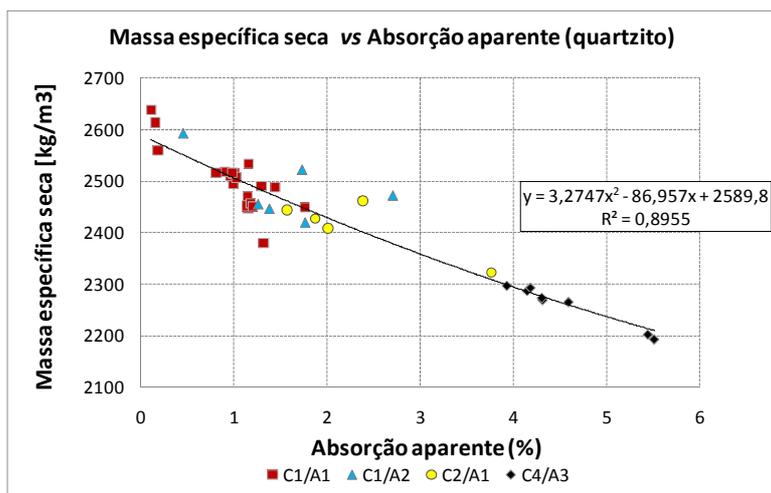


Figura 5.85 - Massa específica seca versus absorção -quartzito-.

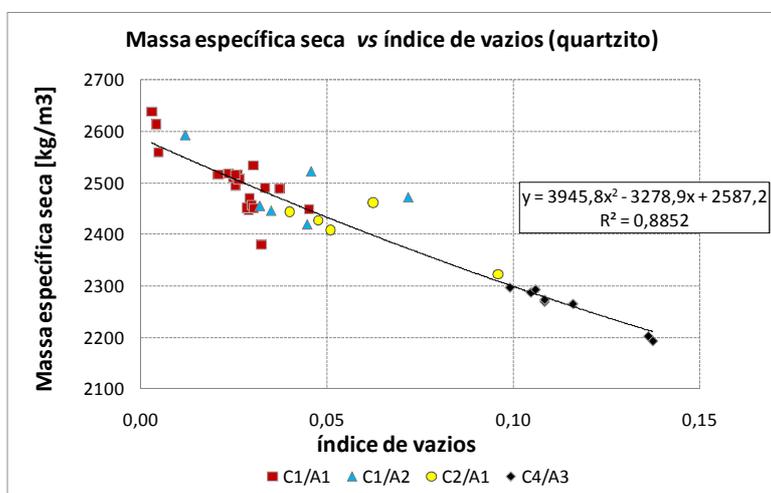


Figura 5.86 - Massa específica seca versus índice de vazios -quartzito-.

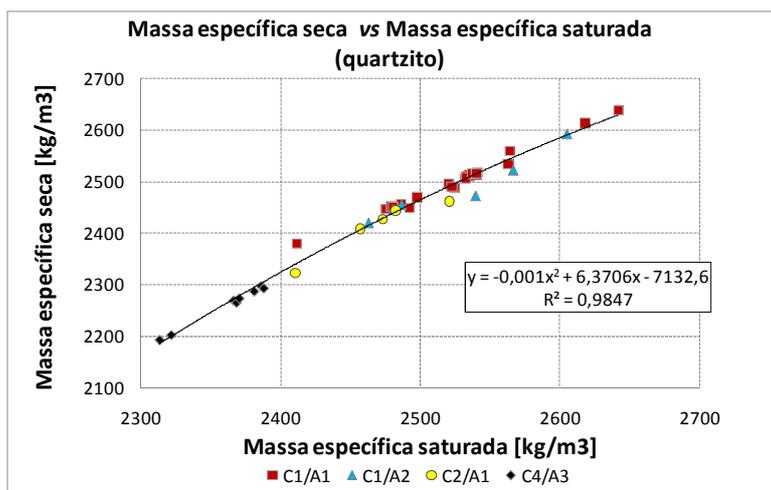


Figura 5.87 - Massa específica seca versus massa específica saturada -quartzito-.

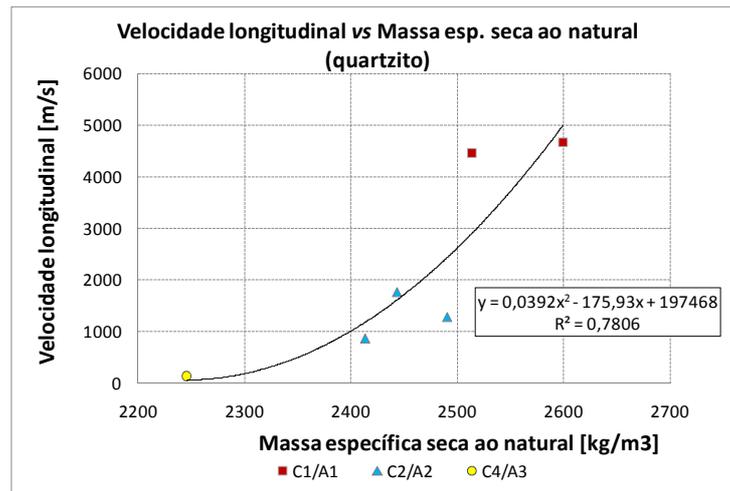


Figura 5.88 - Velocidade de propagação da onda P versus densidade seca ao natural - quartzito-.

5.3 CALIBRAÇÃO DA METODOLOGIA GSI PARA MACIÇOS ROCHOSOS INTEMPERIZADOS

Segundo o comentado na Seção 4.3, no empreendimento, o modo dominante de ruptura é dado pelo maciço e não através dos planos de xistosidade. Deste modo, a metodologia *GSI* de Hoek se torna uma ferramenta importante para estimar as propriedades de resistência do maciço rochoso neste projeto. Portanto, é importante verificar quão reais são estas estimativas.

Nesta seção, são obtidas as propriedades de resistência do maciço rochoso para um filito grafitoso com grau de intemperismo C3/A3. As propriedades são obtidas empregando duas metodologias diferentes: usando a metodologia *GSI* de Hoek e realizando ensaios de cisalhamento direto sobre grandes blocos (blocos considerados representativos do maciço rochoso).

Assim, por meio da comparação entre as duas estimativas, foi possível calibrar os parâmetros de entrada da metodologia *GSI* de Hoek, de forma que a envoltória de resistência do maciço estimada por esta metodologia ficasse mais próxima da envoltória de resistência determinada pelo ensaio de cisalhamento direto em grandes blocos.

Cabe dizer que a calibração da metodologia *GSI* de Hoek foi executada unicamente no filito grafitoso C3/A3, visto que só foi realizado o ensaio de cisalhamento em grandes blocos neste litotipo. Ressalta-se que não é possível extrapolar estes resultados para outros litotipos.

5.3.1 ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA PELA METODOLOGIA GSI DE HOEK

A estimativa indireta da resistência do maciço rochoso para o filito grafitoso C3/A3 foi feita por meio da metodologia GSI de Hoek. Para facilitar o cálculo dessas propriedades, foi utilizado o programa RocLab da Rocscience.

Ingressando os dados de entrada da metodologia GSI de Hoek, o software RocLab tem a capacidade de obter a envoltória de resistência do maciço rochoso por meio dos critérios de ruptura de Hoek & Brown e de Mohr-Coulomb equivalente, isto conforme a teoria e as equações ilustradas na Seção 3.3. Este programa também permite obter o módulo de elasticidade do maciço rochoso, fazendo uso da Equação 3.16 de Hoek & Diederichs (2006). Assim, foram fornecidos os seguintes dados ao programa:

- $\sigma_{ci} = 3,85$ MPa, este valor corresponde à média dos ensaios de compressão uniaxial realizados na rocha intacta para este litotipo (Tabela 5.25).
- $E_i = 320$ MPa; este valor corresponde à média das determinações de módulo de elasticidade secante realizados na rocha intacta para este litotipo (Tabela 5.25).
- O GSI é definido em uma faixa de valores que variam entre 20 e 40 de acordo com a Figura 3.4.
- Devido a não se possuírem valores de m_i para o filito grafitoso C3/A3, adotou-se um valor de m_i variando entre 4 e 10, isto conforme os valores de m_i recomendados para filitos por Hoek (2007).
- O fator de perturbação foi definido atendendo ao guia proposto por Hoek (2007) para taludes. Assim, foi determinado $D = 0,7$, visto que a qualidade da escavação na obra foi considerada muito boa. Este valor também foi adotado pela projetista do empreendimento.
- σ'_{3max} foi definido para dois tipos de aplicações: aplicação geral e aplicação para taludes, sendo empregadas as Equações 3.12 e 3.14, respectivamente. No caso da aplicação em taludes, foi definido adicionalmente $H = 30$ m e $\gamma = 0,024$ MN/m³. A altura selecionada pode ser considerada representativa para vários taludes presentes no empreendimento.

Assim, com as variáveis de entrada definidas, inicialmente é apresentada a variação dos parâmetros equivalentes de Mohr-Coulomb segundo a variação do GSI e do m_i . Posteriormente, é selecionada uma envoltória representativa do material. Finalmente, os

resultados são apresentados separadamente para cada tipo de aplicação (geral e taludes).

5.3.1.1 ESTIMATIVA DAS PROPRIEDADES PARA APLICAÇÕES GERAIS

Na Figura 5.89 e na Figura 5.90, apresenta-se a variação da coesão e do ângulo de atrito do critério de Mohr-Coulomb equivalente conforme variam os valores de GSI e de m_i , considerando que σ'_{3max} foi determinado para aplicações gerais.

Os resultados mostram como os parâmetros do critério equivalente de Mohr-Coulomb podem variar em função dos valores adotados de GSI e de m_i . Desta forma a coesão do maciço rochoso encontrar-se-ia aproximadamente entre 0,03 e 0,1 MPa, e o ângulo de atrito entre 7 e 19 graus.

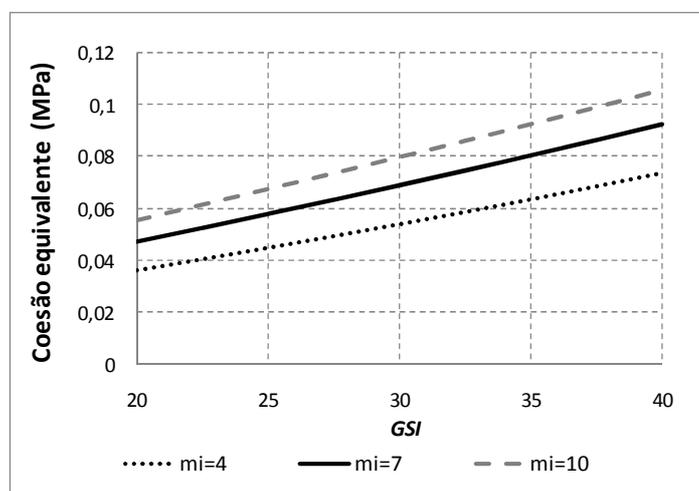


Figura 5.89 - Variação da coesão para diferentes valores do GSI e do m_i . –aplicação geral-.

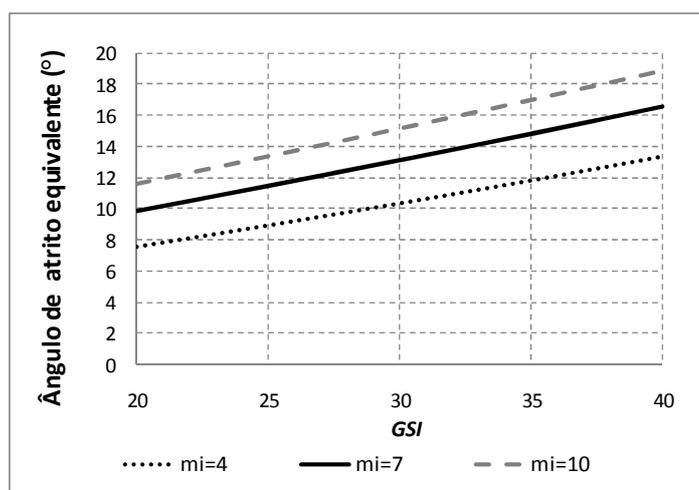


Figura 5.90 - Variação do ângulo de atrito para diferentes valores do GSI e do m_i . –aplicação geral-.

Porém, para fins de projeto de engenharia, usualmente se costumam adotar valores pontuais de resistência para cada litotipo. Desta forma, foi definida uma envoltória de resistência representativa do filito grafito C3/A3. Assim, foram escolhidos os mesmos valores de GSI e de m_i que foram adotados pelos projetistas do empreendimento para este material, sendo definidos $m_i = 10$ e $GSI = 30$.

A Tabela 5.30 compila os dados de entrada fornecidos ao RocLab e os parâmetros de resistência do maciço rochoso obtidos para este litotipo. A Figura 5.91 mostra a envoltória de resistência do maciço rochoso definido para o filito grafitoso C3/A3.

Tabela 5.30 - Parâmetros de geomecânicos do maciço rochoso estimados pela metodologia GSI de Hoek (filito grafitoso C3/A3) -aplicação geral-.

<i>Metodologia GSI Hoek- dados de entrada</i>		
Resistência à compressão da rocha intacta (MPa)	σ_{ci}	3,85
Índice de resistência geológica	GSI	30
Constante de Hoek & Brown da rocha intacta	m_i	10
Fator de perturbação do maciço	D	0,7
Módulo de elasticidade da rocha intacta (MPa)	E_i	320
<i>Parâmetros do maciço rochoso- dados de saída</i>		
Tensão principal menor máxima (MPa)	σ'_{3max}	0,96
Constante de Hoek & Brown para maciços	mb	0,21
Constante de Hoek & Brown para maciços	s	3,93E-05
Constante de Hoek & Brown para maciços	a	0,52
Coesão (MPa)	c	0,08
Ângulo de atrito (°)	ϕ	15,13
Módulo de elasticidade do maciço (MPa)	E_m	11,51

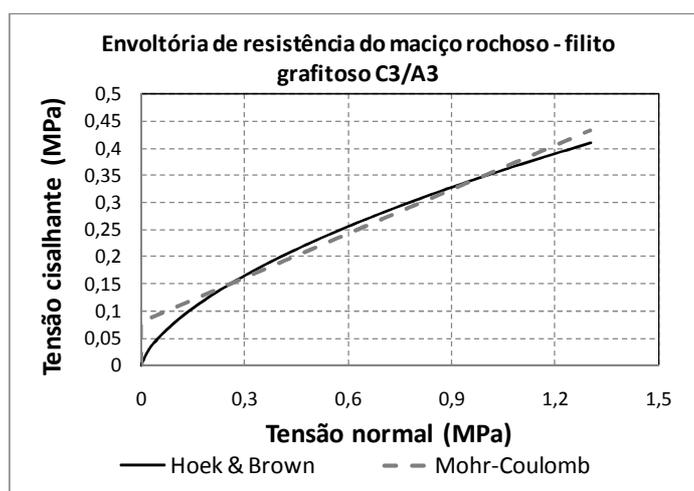


Figura 5.91 - Envoltória de resistência do maciço rochoso estimada pela metodologia GSI de Hoek -aplicação geral-.

5.3.1.2 ESTIMATIVA DAS PROPRIEDADES PARA APLICAÇÕES EM TALUDES

Na Figura 5.92 e na Figura 5.93, apresenta-se a variação da coesão e do ângulo de atrito do critério de Mohr-Coulomb equivalente conforme variam os valores de GSI e de m_i , considerando que σ'_{3max} foi determinado para aplicações em taludes.

Para os dados de entrada adotados, observa-se que a coesão do maciço rochoso encontrar-se-ia aproximadamente entre 0,02 e 0,07 MPa, e o ângulo de atrito entre 10 e 24 graus. Comparando estes resultados com os obtidos na análise para a aplicação geral, tem-se que o ângulo de atrito alcança valores maiores e a coesão varia entre valores menores.

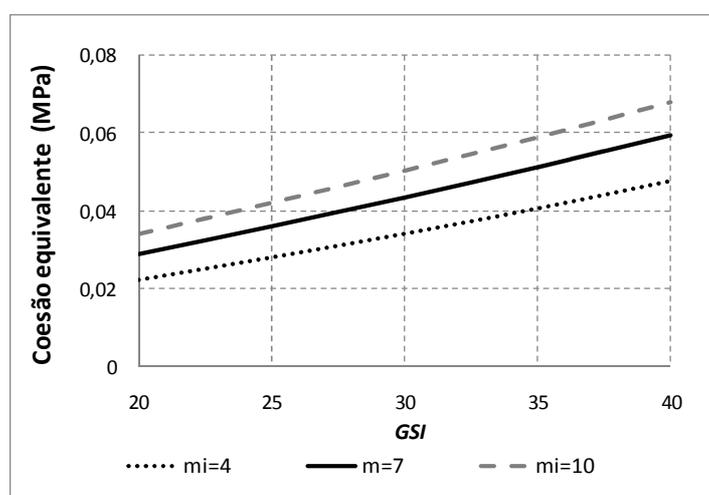


Figura 5.92 - Variação da coesão para diferentes valores do GSI e do m_i . –aplicação em taludes-.

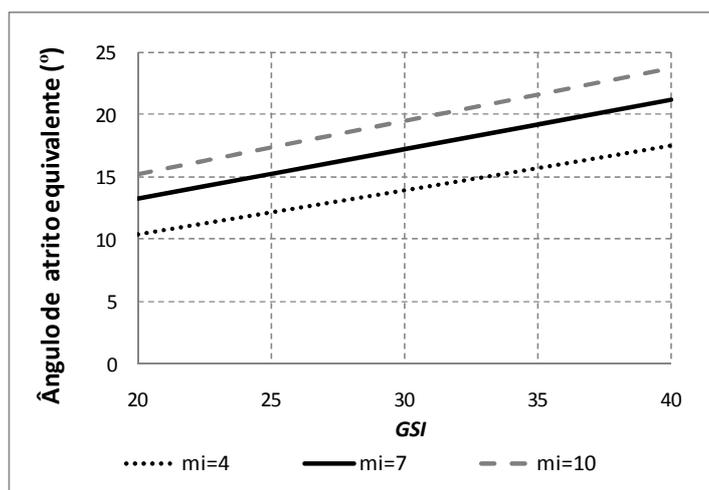


Figura 5.93 - Variação do ângulo de atrito para diferentes valores do GSI e do m_i . –aplicação em taludes-.

É definida uma envoltória representativa estabelecendo $m_i = 10$ e $GSI = 30$. A Tabela 5.31 compila os dados de entrada fornecidos ao RocLab e os parâmetros de resistência do maciço

rochoso obtidos para este litotipo. A Figura 5.94 mostra a envoltória de resistência do maciço rochoso definido para o filito grafitoso C3/A3.

Tabela 5.31 - Parâmetros de geomecânicos do maciço rochoso estimados pela metodologia GSI de Hoek (filito grafitoso C3/A3) -aplicação em taludes-.

<i>Metodologia GSI de Hoek - dados de entrada</i>		
Resistência à compressão da rocha intacta (MPa)	σ_{ci}	3,85
Índice de resistência geológica	GSI	30
Constante de Hoek & Brown da rocha intacta	m_i	10
Fator de perturbação do maciço	D	0,7
Módulo de elasticidade da rocha intacta (MPa)	E_i	320
Peso unitário (MN/m ³)	γ	0,024
Altura do talude (m)	H	30
<i>Parâmetros do maciço rochoso- dados de saída</i>		
Tensão principal menor máxima (MPa)	σ'_{3max}	0,46
Constante de Hoek & Brown para maciços	mb	0,21
Constante de Hoek & Brown para maciços	s	3,93E-05
Constante de Hoek & Brown para maciços	a	0,52
Coesão (MPa)	c	0,05
Ângulo de atrito (°)	ϕ	19,49
Módulo de elasticidade do maciço (MPa)	E_m	11,51

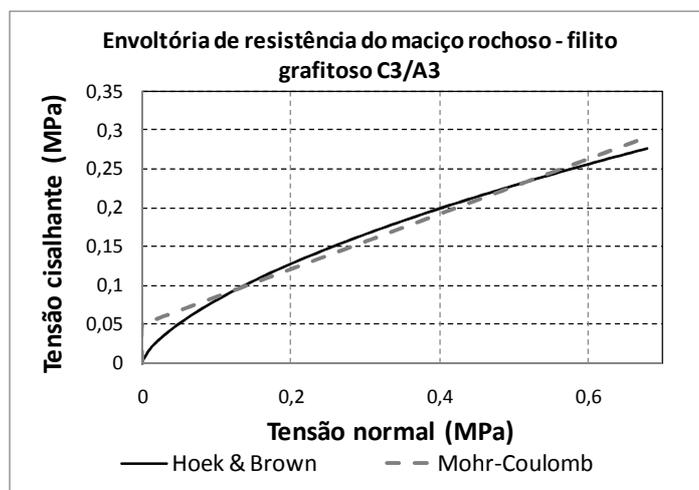


Figura 5.94 - Envoltória de resistência do maciço rochoso estimada pela metodologia GSI de Hoek -aplicação em taludes-.

5.3.2 ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA POR MEIO DE ENSAIOS EM GRANDES BLOCOS

A amostra indeformada de filito grafitoso C3/A3, com registro nº 4.0055.2009, foi submetida ao ensaio de cisalhamento direto, sendo a tensão cisalhante aplicada em direção perpendicular ao plano de foliação e a velocidade de 0,2 mm/min. As tensões normais aplicadas foram de aproximadamente 200, 400, 800 e 1600 kPa. Os corpos de prova foram submetidos à imersão em água por período mínimo de 24 h.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica de Rochas de Furnas, segundo as especificações da ASTM D5607. Para o ensaio, foi empregada uma prensa servo-controlada, com capacidade máxima de 490 kN de carga normal e 980 kN de carga cisalhante (Figura 5.95). Os blocos para ensaios de cisalhamento direto foram preparados de modo a se obterem dimensões aproximadas de 30 x 30 x 30 cm, conseguidos a partir de amostras indeformadas dos taludes escavados. Dadas as características deste litotipo e do maciço rochoso de estudo, é considerado que estas amostras têm um tamanho representativo do maciço rochoso como um todo.

Cabe dizer, que, para poder comparar a resistência obtida deste ensaio com a estimativa de resistência do maciço rochoso pela metodologia *GSI* de Hoek, era necessário que a direção da carga de cisalhamento aplicada sobre as amostras fosse diferente à direção da foliação. Em caso contrário, estar-se-ia avaliando a resistência da junta da descontinuidade, ou seja, esse valor de resistência seria adequado caso a ruptura ocorresse através da descontinuidade (no caso do empreendimento, quando a direção da foliação fosse desfavorável à estabilidade).

Assim, esse valor de resistência seria comparável só a critérios que estimam a resistência das descontinuidades (por exemplo, Barton & Choubey, 1977) e não com o critério de Hoek & Brown, visto que, como foi comentado em seções anteriores, este não é válido quando a resistência do maciço está controlada pelas descontinuidades. Considerando o anterior, a aplicação da carga cisalhante na direção perpendicular ao plano de foliação foi uma decisão adequada.



Figura 5.95 - Equipamento para ensaio de cisalhamento direto 30x30(cm). (Furnas, 2009).

Na Figura 5.96, apresentam-se as curvas de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante para cada tensão normal aplicada. Na Figura 5.97, apresenta-se a envoltória de ruptura pico e

residual ao cisalhamento. Na Figura 5.98, apresentam-se os registros fotográficos das amostras antes e após a realização dos ensaios.

Dos resultados, pode-se observar que foi obtido um ângulo de atrito de 39° e uma coesão de 485,7 kPa, sendo estes valores considerados representativos da resistência do maciço rochoso para o filito grafitoso C3/A3.

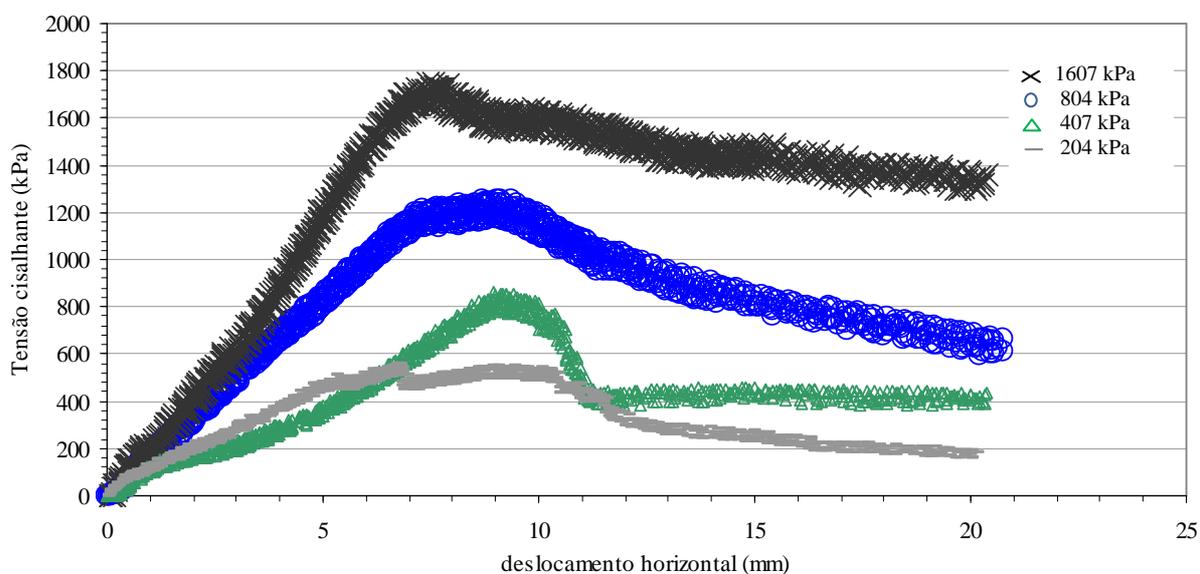


Figura 5.96 - Gráfico de deslocamento horizontal *versus* tensão cisalhante da amostra 4.0055.09 – Filito grafitoso C3/A3. (Furnas, 2009).

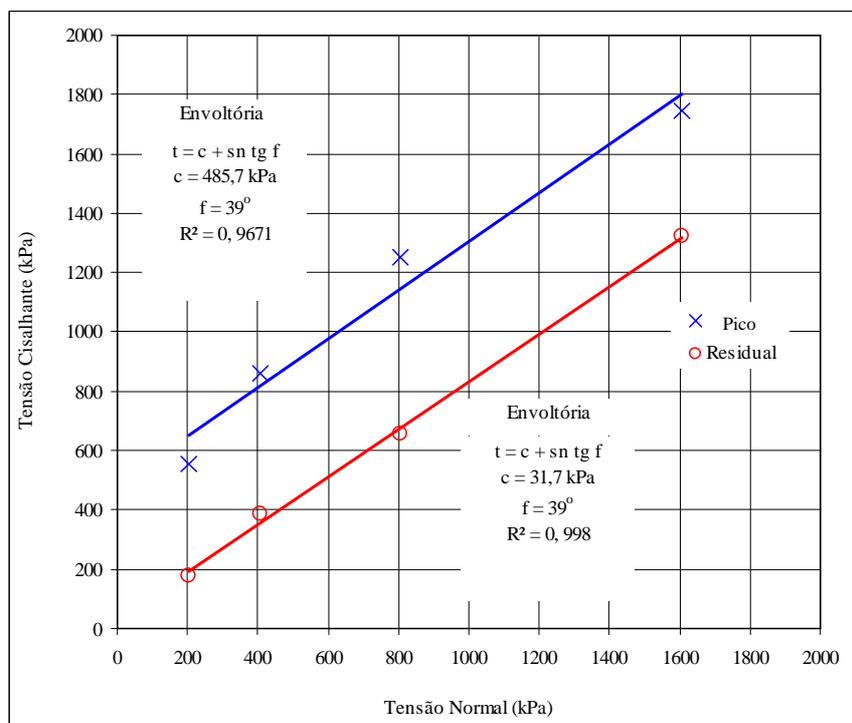


Figura 5.97 - Envoltória de ruptura e residual ao cisalhamento da amostra 4.0055.09 – Filito grafitoso C3/A3. c – coesão, f – ângulo de atrito, sn – tensão normal. (Furnas, 2009).

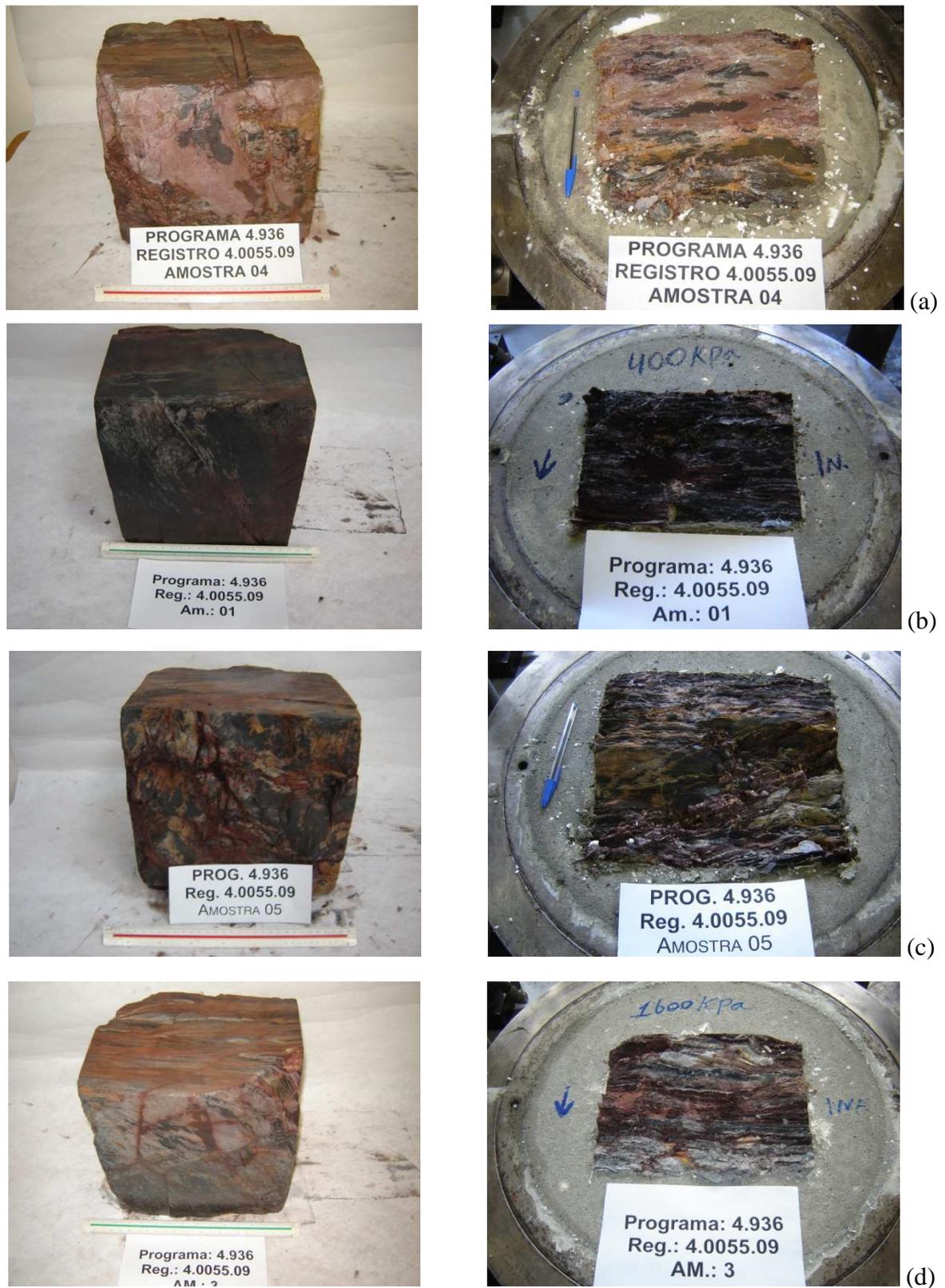


Figura 5.98 - Fotos dos ensaios de cisalhamento direto, com tensão normal de, respectivamente, (a) 204kPa, (b) 407kPa, (c) 804kPa e (d) 1607 kPa. (Furnas, 2009).

5.3.3 CALIBRAÇÃO DA METODOLOGIA GSI - APLICAÇÃO GERAL

Inicialmente, a envoltória de resistência obtida para uma aplicação geral por meio da metodologia *GSI* é comparada à envoltória de resistência obtida pelo ensaio de cisalhamento direto em grandes blocos (Figura 5.99).

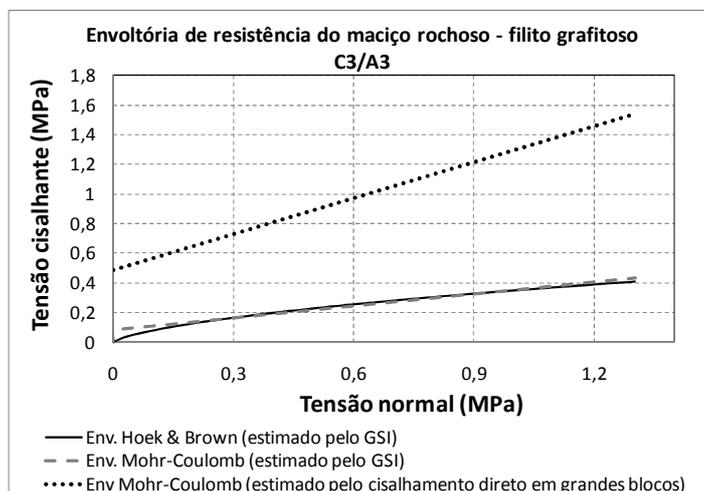


Figura 5.99 - Comparação entre as envoltórias de resistência do maciço rochoso obtida pela metodologia *GSI* (resistência para aplicações gerais) e pelo ensaio de cisalhamento direto em grandes blocos.

Observa-se que, para este caso em particular, a estimativa da resistência do maciço pela metodologia *GSI* de Hoek é conservadora em relação à resistência obtida no ensaio de cisalhamento direto em grandes blocos. A relação entre a coesão obtida pelo ensaio e pela metodologia *GSI* é de 6,1. Analogamente, a relação para o ângulo de atrito é de 2,6.

Assim, a seguir, são modificados os parâmetros de entrada (σ_{ci} , m_i , *GSI* e *D*) da metodologia *GSI* para obter uma envoltória de resistência mais próxima àquela obtida pelos ensaios de cisalhamento direto em grandes blocos.

O critério para ajustar os valores de entrada consistiu em fixar o valor de *GSI* = 30, e, por tentativa e erro, modificar as variáveis m_i , σ_{ci} e *D* para obter valores de coesão e de ângulo de atrito próximos aos valores achados no ensaio de cisalhamento. Deste modo, a Tabela 5.32 mostra os dados de entrada resultantes da calibração e os parâmetros do maciço obtidos.

A Figura 5.100 mostra a envoltória de resistência de Mohr-Coulomb estimada pela metodologia *GSI* de Hoek depois da calibração e a envoltória de Mohr-Coulomb obtida no ensaio de cisalhamento direto para o filito grafitoso C3/A3.

Tabela 5.32 - Parâmetros de geomecânicos do maciço rochoso estimados depois de calibrar a metodologia *GSI* de Hoek (aplicações gerais).

<i>Metodologia GSI de Hoek - dados de entrada</i>		
Resistência à compressão da rocha intacta (MPa)	σ_{ci}^*	8
Índice de resistência geológica	<i>GSI</i>	30
Constante de Hoek & Brown da rocha intacta	m_i^*	50
Fator de perturbação do maciço	D^*	0
Módulo de elasticidade da rocha intacta (MPa)	E_i	320
<i>Parâmetros do maciço rochoso- dados de saída</i>		
Constante de Hoek & Brown para maciços	mb	4,104
Constante de Hoek & Brown para maciços	s	4,19E-4
Constante de Hoek & Brown para maciços	a	0,522
Coesão (MPa)	c	0,486
Ângulo de atrito (°)	ϕ	38,5
Módulo de elasticidade do maciço (MPa)	E_m	26,0

* Valores obtidos na calibração.

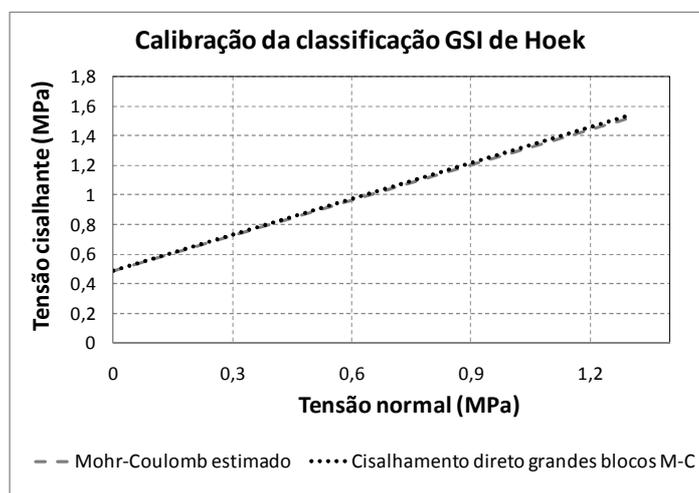


Figura 5.100 - Envoltória de resistência do maciço rochoso estimada depois de calibrar a metodologia *GSI* de Hoek (resistência para aplicações gerais).

A Tabela 5.32 mostra os novos valores (*) adotados de m_i , σ_{ci} e D depois de calibrar a metodologia *GSI* de Hoek com os resultados do cisalhamento direto em grandes blocos. Assim, os novos valores de entrada da metodologia *GSI* podem ser escritos em termos dos valores adotados inicialmente: $m_i^* = 5 \cdot m_i$; $\sigma_{ci}^* = 2,07 \cdot \sigma_{ci}$ e $D^* = 0 \cdot D$.

Chama a atenção que o parametro m_i^* é semelhante ao valor de m_i obtido no ensaio triaxial para o filito grafitoso C4/A4.

Observa-se que os parâmetros equivalentes de Mohr-Coulomb obtidos depois de calibrar a metodologia *GSI* de Hoek se aproximam bastante aos parâmetros encontrados no ensaio de cisalhamento direto.

5.3.4 CALIBRAÇÃO DA METODOLOGIA GSI - APLICAÇÃO EM TALUDES

Inicialmente, a envoltória de resistência para aplicação em taludes, obtida por meio da metodologia *GSI*, é comparada à envoltória de resistência obtida pelo ensaio de cisalhamento direto em grandes blocos (Figura 5.101).

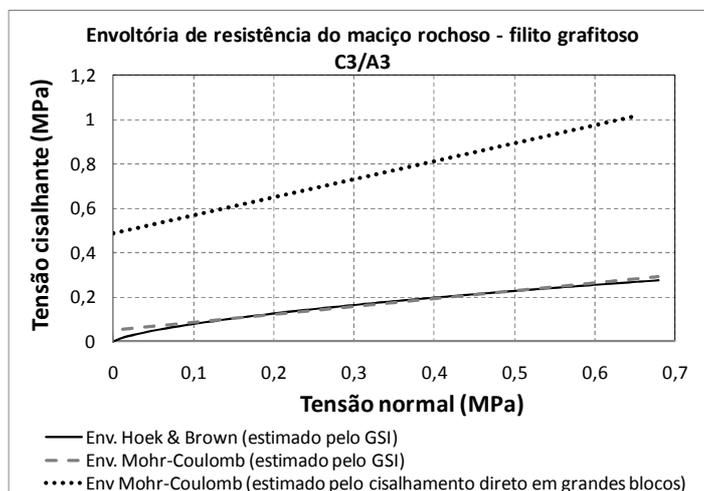


Figura 5.101 - Comparação entre as envoltórias de resistência do maciço rochoso obtida pela metodologia *GSI* (resistência para aplicações em taludes) e pelo ensaio de cisalhamento direto em grandes blocos.

Observa-se que, para este caso em particular, a estimativa da resistência do maciço pela metodologia *GSI* de Hoek é conservadora em relação à resistência obtida no ensaio de cisalhamento direto em grandes blocos. A relação entre a coesão obtida pelo ensaio e pela metodologia *GSI* é de 9,6. Analogamente, a relação para o ângulo de atrito é de 2,0.

O procedimento empregado para calibrar a metodologia *GSI* foi o mesmo utilizado na seção anterior. Assim, a Tabela 5.33 mostra os dados de entrada resultantes da calibração e os parâmetros do maciço obtidos para serem usados em taludes.

A Tabela 5.33 mostra os novos valores (*) adotados de m_i , σ_{ci} e D depois de calibrar a metodologia *GSI* com os resultados do cisalhamento direto em grandes blocos. Assim, os novos valores de entrada da metodologia *GSI* podem ser escritos em termos dos valores adotados inicialmente: $m_i^* = 0,2 \cdot m_i$; $\sigma_{ci}^* = 32,7 \cdot \sigma_{ci}$ e $D^* = 0 \cdot D$.

A Figura 5.102 mostra a envoltória de resistência de Mohr-Coulomb estimada pela metodologia *GSI* de Hoek depois da calibração e a envoltória de Mohr-Coulomb obtida no ensaio de cisalhamento direto para o filito grafitoso C3/A3.

Tabela 5.33 - Parâmetros de geomecânicos do maciço rochoso estimados depois de calibrar a metodologia *GSI* de Hoek (aplicações em taludes).

Metodologia <i>GSI</i> de Hoek - dados de entrada		
Resistência à compressão da rocha intacta (MPa)	σ_{ci}^*	126
Índice de resistência geológica	<i>GSI</i>	30
Constante de Hoek & Brown da rocha intacta	m_i^*	2
Fator de perturbação do maciço	D^*	0
Módulo de elasticidade da rocha intacta (MPa)	E_i	320
Peso unitário (MN/m ³)	γ	0,024
Altura do talude (m)	H	30

Parâmetros do maciço rochoso- dados de saída		
Tensão principal menor máxima (MPa)	σ'_{3max}	0,164
Constante de Hoek & Brown para maciços	mb	4,189E-04
Constante de Hoek & Brown para maciços	s	0,522
Constante de Hoek & Brown para maciços	a	0,629
Coesão (MPa)	c	0,484
Ângulo de atrito (°)	ϕ	38,400
Módulo de elasticidade do maciço (MPa)	E_m	26,043

* Valores obtidos na calibração.

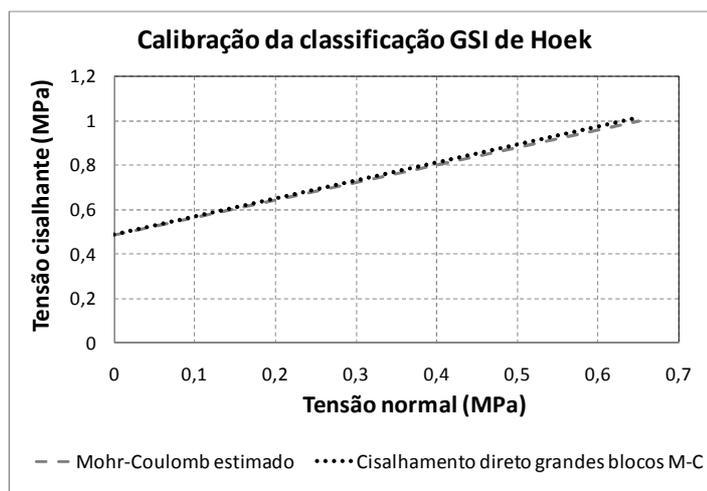


Figura 5.102 - Envoltória de resistência do maciço rochoso estimada depois de calibrar a metodologia *GSI* de Hoek (resistência para aplicações em taludes).

Diretrizes para a Caracterização de Maciços Rochosos Intemperizados

Neste capítulo, são apresentadas diretrizes gerais para abordar o problema da caracterização de maciços rochosos intemperizados. A seguir, são apresentadas as atividades que se sugere que sejam executadas:

- Realização de uma campanha de reconhecimento preliminar da região do maciço rochoso. Para isso, pode-se recorrer primeiramente às informações disponíveis da região, tais como mapas topográficos, mapas e informações geológicas regionais, informações de interesse realizadas por obras vizinhas, entre outras;
- Levantamento topográfico do maciço rochoso;
- Investigação do maciço por meio da realização de sondagens, trincheiras, poços de investigação e ensaios geofísicos;
- Definição do modelo geológico, estabelecendo os tipos litológicos presentes e sua distribuição no maciço com base à interpolação e à extrapolação da informação das sondagens e da superfície. Também caracterizar as propriedades das discontinuidades conforme a Seção 2.5 e realizar o levantamento e o mapeamento da geologia estrutural;
- Definição do perfil de intemperismo do maciço rochoso, com aplicação de um determinado critério para descrever o intemperismo na superfície rochosa e ao longo das sondagens e, finalmente, realizar interpolações e extrapolações dentro do maciço. Recomenda-se que sejam estabelecidos, pelo menos, três graus de intemperismo para cada litotipo, visto que isto pode ajudar a lidar com a variabilidade intrínseca das propriedades das rochas intemperizadas.
- Caracterizar as propriedades da rocha intacta para cada litotipo conforme a Seção 2.4 e agrupar os resultados segundo o grau de intemperismo. Deve-se, também, estabelecer e executar uma quantidade suficiente de ensaios, visando estudar a variação dos resultados para cada grau de intemperismo. O valor médio dos resultados dos ensaios realizados em

um litotipo com certo grau de intemperismo pode ser um bom índice para determinar um valor característico ou representativo;

- Com base na caracterização do maciço rochoso e das descontinuidades, são definidos os possíveis mecanismos de ruptura que podem se apresentar no maciço e nas obras escavadas. Assim, estabelecem-se os critérios para caracterizar a resistência, a depender se esta é dominada pelas descontinuidades ou pelo maciço (Figura 6.1).

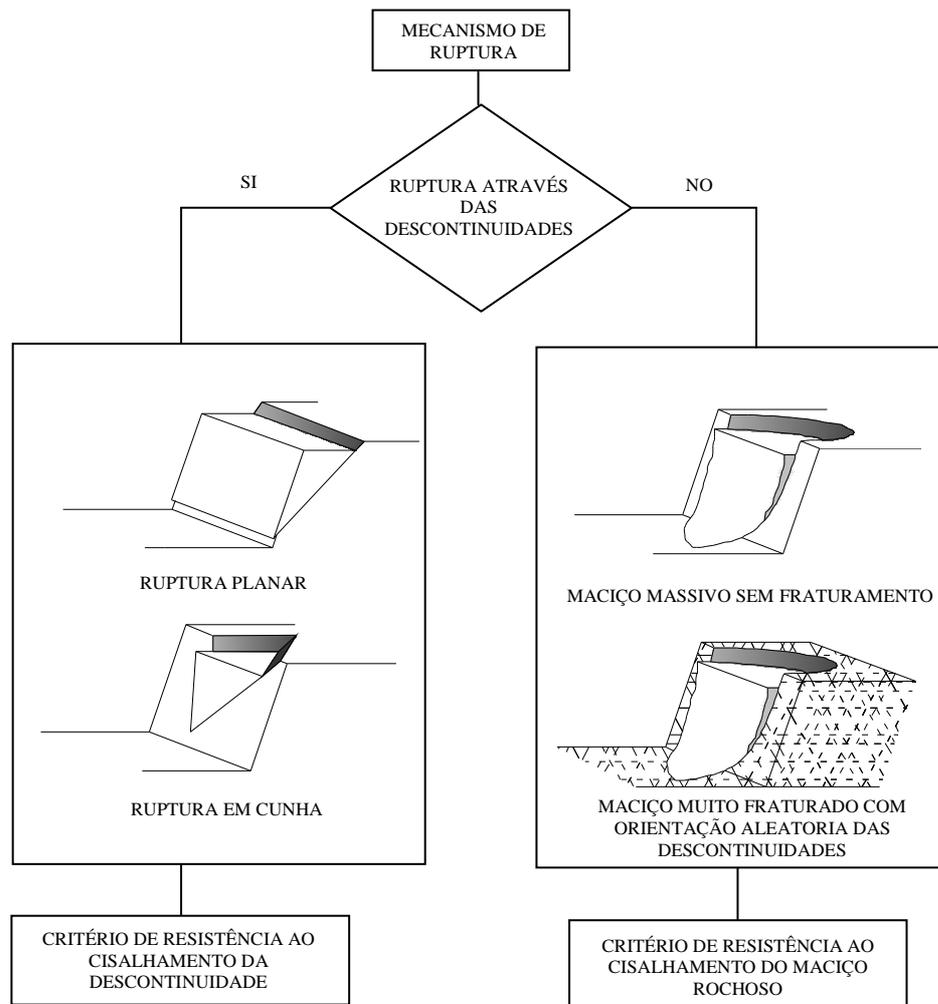


Figura 6.1 - Relação entre os mecanismos e criterios de ruptura para maciços rochosos (modificado- Wyllie & Mah, 2001).

- Caso a ruptura ocorra através do maciço rochoso, e não pelas descontinuidades, pode-se empregar a metodologia GSI de Hoek para definir a resistência e a deformabilidade do maciço rochoso. Sempre que for possível, deve-se tentar verificar as estimativas realizadas por meio de ensaios que sejam representativos do maciço rochoso, sendo estes ensaios realizados para cada litotipo e cada grau de intemperismo. Isto é importante para constatar se as estimativas realizadas são conservadoras, contra a segurança ou próximas dos

resultados dos ensaios diretos, por meio de um processo de calibração.

- Os parâmetros resultantes da caracterização geomecânica do maciço rochoso podem ser introduzidos em programas de análises numéricas que permitam modelar o comportamento tensão versus deformação de obras diante às solicitações do maciço, tais como os estágios de escavação. Para o caso de maciços brandos de baixa qualidade, Hoek (2007) sugere adotar um modelo elástico perfeitamente plástico para relacionar a tensão e a deformação.
- Com base nos resultados da modelagem, definir o sistema de suporte requerido para garantir a estabilidade da obra;
- Finalmente, e se for possível, comparar os resultados obtidos da modelagem numérica com os dados da instrumentação da obra, sendo necessária a instalação e o monitoramento da instrumentação antes de começar o processo de escavação.

Conclusões

A ação do intemperismo sobre as propriedades da rocha é de importância significativa em engenharia. Dependendo das condições de entorno do projeto, o intemperismo pode assumir uma importância primordial. Portanto, é essencial, nesses casos, que sejam executados trabalhos e estudos que visem identificar: os graus de intemperismo na rocha, o perfil de intemperismo no maciço e os efeitos do intemperismo sobre as propriedades de engenharia.

As diversas características do maciço de estudo o definem como um caso complexo do ponto de vista da geologia e da engenharia. Dentre essas características, destaca-se a forte ação intempélica, a qual se apresenta em um padrão irregular dentro do maciço, seguindo, principalmente, caminhos preferenciais criados pelo fraturamento e por planos de xistosidade. Isso origina uma grande variabilidade nos valores das propriedades obtidas em um mesmo litotipo.

O critério aplicado para classificar o intemperismo teve resultados aceitáveis para caracterizar a mudança média das propriedades segundo o grau de intemperismo. Porém, foi encontrada uma significativa dispersão dos dados, particularmente nos filitos. Mesmo assim, considera-se que esta metodologia ajuda a diminuir as incertezas relacionadas à grande variabilidade dos parâmetros geomecânicos, sendo possível definir valores representativos para cada classe de intemperismo.

As análises mineralógicas mostraram que há mudanças mineralógicas nos estágios mais avançados de intemperismo para o filito e para o filito grafitoso, sendo caracterizadas, principalmente, pelo aparecimento de argilominerais, tais como montmorilonita, caulinita e illita. As análises efetuadas no quartzito não detectaram mudanças na composição mineralógica ao avançar o grau de intemperismo.

Ao caracterizar a absorção, a porosidade e o índice de vazios, foi possível observar que os valores médios destas propriedades para cada grau de intemperismo apresentam uma tendência a aumentar conforme o avanço do intemperismo, sendo significativa a diferença entre o valor de uma propriedade obtida para uma amostra sã e para uma amostra muito

intemperizada. A massa específica seca e a saturada apresentaram, em média, uma tendência a diminuir conforme há avanço no intemperismo.

As diversas mudanças que ocorrem nas propriedades mecânicas da matriz rochosa são resultado direto do aumento da porosidade e da degradação mineralógica produzido pelo intemperismo. O aumento da porosidade é dado pelo aumento das microfissuras, assim é de se esperar, então, que as mudanças das propriedades no maciço rochoso sejam mais dramáticas em comparação às mudanças da matriz rochosa, visto que, neste caso, deve-se incluir o efeito das fraturas abertas presentes no maciço.

A velocidade de transmissão da onda P apresentou, em média, uma diminuição conforme o avanço no grau de intemperismo para os litotipos ensaiados, sendo observada uma grande dispersão dos resultados. Isto ocorre devido às dificuldades na preparação da amostra, tais como a fragmentação e a absorção do gel. Entre os resultados obtidos, destaca-se a grande diferença observada no valor desta propriedade entre a rocha sã e intemperizada do quartzito. Também foi observado que os valores do módulo de elasticidade dinâmico são moderadamente maiores que os valores de módulo de elasticidade obtidos nos ensaios de compressão uniaxial, sendo isto válido para os três litotipos analisados.

Os ensaios para caracterizar a resistência de rocha, tais como compressão puntiforme, resistência à compressão uniaxial e resistência à tração, mostraram uma diminuição de suas propriedades conforme o avanço do intemperismo.

Os ensaios de carregamento puntiforme e compressão uniaxial mostraram que o quartzito se configura como um material mais resistente em comparação ao filito e ao filito grafitoso. Também foi possível observar que a resistência à compressão puntiforme é maior quando o material é carregado perpendicularmente ao plano de foliação em relação à resistência obtida quando o material é carregado na direção do plano de foliação.

O índice de anisotropia definido para o ensaio de carregamento puntiforme permitiu verificar para o filito e para o filito grafitoso que o grau de anisotropia tende a diminuir conforme aumenta o grau de intemperismo, sendo que, no caso do filito grafitoso, este tende a ser isotrópico nos estágios mais avançados do intemperismo. No quartzito, foi observado o caso contrário devido à presença de finas passagens de filitos. Estes resultados são importantes, visto que, dependendo do grau de intemperismo que apresente cada tipo de material na obra, podem ser feitas conjeturas sobre seu possível comportamento, mecanismos de ruptura e

critérios para avaliar sua resistência.

Dos ensaios de compressão simples, observa-se que foram encontrados valores muito baixos do coeficiente de Poisson para os filitos em relação aos valores reportados na literatura.

O ensaio de índice de Schmidt não apresentou resultados satisfatórios nos filitos, devido ao equipamento não possuir a sensibilidade suficiente para marcar registros em rochas brandas. Neste caso, conclui-se que o equipamento empregado não é adequado para realizar este ensaio. O equipamento, porém, teve resultados aceitáveis para caracterizar a resistência do quartzito, tendo resultados compatíveis com aqueles reportados nos ensaios de resistência à compressão uniaxial.

O ensaio para estimar a resistência à tração mostrou dificuldades de execução, visto que a ruptura se apresentava em placas, fator influenciado pela xistosidade das diferentes amostras. Assim, métodos alternativos devem ser revisados para obter a resistência à tração de materiais que apresentem xistosidade, particularmente nos filitos.

Não foi possível estabelecer claramente a variação da resistência ao cisalhamento conforme o avanço do intemperismo no filito grafitoso devido à pouca quantidade de ensaios disponíveis.

As correlações obtidas entre a massa específica seca, a porosidade aparente, a absorção e o índice de vazios apresentaram tendências claras, particularmente no caso do filito grafitoso. Onde foi possível, inclusive, observar uma clara divisão entre os resultados das propriedades e os diferentes graus de intemperismo para este litotipo. É importante esclarecer que as correlações entre a massa específica, a porosidade e absorção tem certo grau de dependência devido a que foram calculadas usando alguns dados em comum.

Observa-se que, para este caso em particular, a estimativa da resistência do maciço pela metodologia *GSI* de Hoek é conservadora em relação à resistência obtida no ensaio de cisalhamento direto em grandes blocos de filito grafitoso. Neste sentido, foi possível ajustar os parâmetros de entrada da metodologia *GSI* para obter uma envoltória de resistência próxima àquela obtida pelo ensaio de cisalhamento em grandes blocos.

Consequentemente, é aconselhável realizar ensaios em grande escala (sempre que for possível) para determinar com maior precisão as propriedades de resistência dos maciço intemperizados. Isto pode trazer vantagens em termos de economia e de segurança, uma vez que os parâmetros de resistência definem fortemente o tipo de reforço necessário na obra. Isto

também pode contribuir para a verificação e a calibração dos modelos que estimam os parâmetros de resistência de forma indireta, ajudando, desta forma, ao enriquecimento destes métodos.

Para futuras pesquisas neste tema, recomenda-se:

- Aplicação ou desenvolvimento de técnicas quantitativas e expeditas para classificar os graus de intemperismo no maciço rochoso;
- Estudar a variação quantitativa e qualitativa dos minerais que compõem um litotipo conforme o avanço do intemperismo;
- Estudar a variação do parâmetro m_i de Hoek & Brown conforme o grau de intemperismo, para isto recomenda-se a realização de uma campanha de ensaios triaxiais.
- Estudar de forma aprofundada a relação entre o ensaio de carregamento puntiforme e o ensaio de compressão uniaxial para rochas intemperizadas, e verificar quais valores adota a constante de correlação C . Neste caso recomenda-se prestar especial atenção no ângulo formado pelo plano de foliação e pela direção de aplicação do carregamento para ambos os ensaios.
- Estudar a transição da envoltória de resistência ao cisalhamento na rocha intacta conforme a variação no grau de intemperismo;
- Revisar ou desenvolver metodologias que permitam migrar das propriedades de resistência da matriz rochosa intemperizada para as propriedades do maciço rochoso intemperizado;
- Aplicar as propriedades do maciço rochoso intemperizado em programas de simulação numérica e comparar estes resultados com dados de instrumentação.

Referências Bibliográficas

- ABGE. (1998). Geologia de engenharia. Associação brasileira de geologia de engenharia, M.S. Santos, & N.A. Alves (Eds.), São Paulo, Brasil, pp. 211-226.
- Assis, A.P. (2003). Mecânica e engenharia de rochas. curso avançado. Publicação: G.AP-AA002/03. Universidade de Brasília – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / FT – Geotecnia.
- Azevedo, H. H. (2008). Ensaio realizados e metodologia de execução, programas 865 da área mr – AHE Batalha. Relatório do Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A Goiânia, 25 de julho de 2008.
- Barton, N. & Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, 10: 1-54.
- Barton, N., Lien, R., Lunde, J. (1974), Engineering classification of rock masses for the design of tunnels support. *Rock Mechanics*, v. 6, n. 4, pp. 183- 236.
- Beavis, F.C (1985). *Engineering geology*. 230p. Blackwell Scientific Publications.
- Bieniawski, Z.T. (1978). Determining Rock Mass Deformability: Experience from Case Histories. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 15, pp. 237-248.
- Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering rock mass classifications*. John Wiley & Sons, New York, USA, 251 p.
- Broch, E. & Franklin, J. A. (1972). The point load strength test: *International journal of rock mechanics and mineral sciences*, v. 9, p. 669-697.
- Deere, D.U. & Patton, F.D. (1971). Slope stability in residual soils. Fourth panamerican conference on soil mechanics and foundation engineering, American society of civil engineers, pp. 87-170.
- Durand, A, F. (1995). Estudo de estabilidade de taludes em mineração a partir de classificação geomecânica. Dissertação de mestrado, Publicação G.DM-0231/95. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 192 p.
- Franklin, J.A. & Chandra, A. (1972). The slake durability test: *International journal of rock mechanics and mineral sciences*: v. 9, p. 325–341.
- Fourmaintraux, D. (1976). *Characterization of rock; laboratory test*, Chapter IV.
- Furnas (2006). AHE Batalha, Projeto básico. Apendice A. Estudos geológico-geotécnicos. Doc. PJ0606-B-G00-GR-RL-001-0. Dezembro 2006. Período de abril a setembro de 2002.
- Furnas (2007). AHE Batalha, Caracterização de rochas: ensaios Geomecânicos, Índices Físicos e Caracterização por Difração de Raios-X. Relatório DCT.C.04.003.2007-R0, Julho/2007.

- Furnas (2009). UHE Batalha, Ensaios de laboratório em amostras de rocha e areia/cascalho resultados. Relatório DCT.C.MR.0XX.2009-R0, Julho/2009.
- Furnas (2010). Web site, http://www.furnas.com.br/negocios_novos_projetos_17.asp. Web site disponível o dia: 10 de junho de 2010.
- Gamble, J.C. (1971). Durability-plasticity classification of shales and other argillaceous rocks, Ph.D. Thesis, University of Illinois, p. 161.
- Geological Society Engineering Working Party Report. (1995). The description and classification of weathered rocks for engineering: Quarterly Journal of Engineering Geology, v. 28, p. 207-242.
- Goodman, R.E. (1989). Introduction to rock mechanics. John Wiley & Sons, New York, USA, 562 p.
- Grimstad, E. & Barton, N. (1993). Updating of the Q-system for NMT. International symposium on sprayed concrete-modern use of wet mix sprayed concrete for underground support, Kompen, Psahl & Berg (eds), Fagernes, Norway, pp. 1-21.
- Guidicini, G. *et al.* 1972. Um método de classificação geotécnica preliminar de maciços rochosos. In: Semana Paulista de Geologia Aplicada. 4.1972, São Paulo. Anais...São Paulo: ABGE. v.3, p.285-331.
- Hidalgo, C.A. (2002). Classificação Geomecânica e Simulação Numérica de Estruturas Subterrâneas de Barragens. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 200 p.
- Hoek, E. & Bray, J. (1981). Rock slope engineering. Institution of mining and metallurgy, London, UK, 358 p.
- Hoek, E. & Brown, E.T. (1980a). Underground excavations in rock. London: Institution of mining and metallurgy.
- Hoek E. & Brown, E.T. (1980b). Empirical strength criterion for rock masses. J. Geotech. Engng Div., ASCE 106(GT9), pp. 1013-1035.
- Hoek, E. (1983). Strength of jointed rock masses. 23rd. Rankine Lecture. Géotechnique. 33 (3), pp. 187-223.
- Hoek, E., Wood, D. & Shah, S. (1992). A modified Hoek & Brown criterion for jointed rock masses. Proc. rock characterization, Symp. Int. Soc. Rock Mech.: Eurock '92, Hudson J.A. (Ed.), London, Brit. Geotech. Soc, pp. 209-214.
- Hoek E. (1994). Strength of rock and rock masses. ISRM News Journal, 2(2), 4-16.
- Hoek E. & Brown, E.T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. International journal of rock mechanics and mining sciences, Vol 34, No 8, pp 1165-1186.
- Hoek, E. & Brown E.T. (1988). The Hoek & Brown failure criterion - a 1988 update. Proc. 15th Canadian Rock Mech. Symp. Toronto: Civil Engineering Dept., University of Toronto, J.H. Curran (Ed.), pp. 31-38.
- Hoek, E., Marinos, P., & Benissi, M. (1998). Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation. Bull. Engg. Geol. Env. 57(2), 151-160.

- Hoek, E. (1999). Putting numbers to Geology – an Engineer’s Viewpoint. (1999). The Second Glossop Lecture, Quarterly Journal of Engineering Geology, 32, No. 1, pp. 1-19.
- Hoek E., Carranza-Torres C. & Corkum B. (2002). Hoek-Brown criterion – 2002 edition. Proc. NARMS-TAC Conference, Toronto, 2002, 1, 267-273.
- Hoek, E., Carranza-Torres. & Corkum B (2004). El criterio de rotura de Hoek & Brown. Edición 2002. Carlos López Jimeno (Ed.), Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Minas. IngeoTÚNELES, Capítulo 1, Libro 7, 2003, pp. 35- 47.
- Hoek, E. & Diederichs, M.S. (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. International journal of rock mechanics and mining sciences, 43, pp. 203–215.
- Hoek, E. (2007). Practical rock engineering. 313 p.
- Hudson J. A. & Harrison J. P. (1997). Engineering rock mechanics. An introduction to the principles. Imperial College of Science, Technology and Medicine. University of London, UK.
- ISRM. (2007). The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. R. Ulusay & J.A. Hudson (Eds).628 p.
- Lopes, M. C. (2006). Comportamento geotécnico e mecanismos de ruptura em rochas brandas Mina de Córrego do Sítio. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto.
- Maia, J.A.C. (2003). Métodos probabilísticos aplicados à estabilidade de taludes e cavidades em rocha. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-099A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 196 p.
- Maia, J.A.C. (2007). Modelagem probabilística da zona plástica de obras subterrâneas em meios rochosos. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-040/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 161 p.
- Malafaia, A, L. (2007). Sistemas de classificação geomecânica aplicados aos maciços rochosos da UHE Batalha [Rio de Janeiro] 2007 XX, 270 p, 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 2007) Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.
- Marinos, P. & Hoek, E. (2000). *GSI* – A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. Proc. GeoEng2000 Conference, Melbourne, pp. 1422-1442.
- Marinos, P. & Hoek, E. (2001). Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. Bulletin of the Engineering Geology & the Environment (IAEG), 60, pp. 85-92.
- Marinos, V., Marinos, P. & Hoek, E. (2005). The geological Strength index: applications and limitations. Bull. Eng. Geol. Environ., 64, pp. 55-65.
- Ojima, L.M. (1981). Metodologia de classificação de maciços rochosos aplicável a túneis. Síntese de tese, 1, ABGE, São Paulo, Brasil, 100 p.
- Resende, M. *et al.* (2005). Mineralogia dos solos brasileiros: interpretação e aplicações. Editora: UFLA, 2005.
- Rocscience Inc. (2004). RocLab. Guia de usuario. Análisis de la resistencia del macizo rocoso mediante el criterio de rotura de Hoek-Brown.

- Saroglou, H., Marinos, P. & Tsiambaos, G. (2004). Applicability of the Hoek & Brown failure criterion and the effect of the anisotropy on intact rock samples from Athens Schist. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, pp. 209-216.
- Serafim, J.L. & Pereira, J. P. (1983). Considerations on the geomechanics classification of Bieniawski". In: *Proc. Int. Symp. Eng. Geo. And Underground Construction I*, Lisbon, v. 1, pp. II 31-II 42.
- Silva F.H.F. 1991. Enquadramento litoestratigráfico e estrutural do depósito de Ouro de Morro do Ouro, Paracatu - MG. Instituto de geociência, Universidade de Brasília, Brasília, MSc. Dissertação, 151 p.
- Silva F.H.F. 1996. Metalogênese do depósito do Morro do Ouro, Paracatu, MG. Instituto de geociência, Universidade de Brasília, Brasília, Ph.D. Tese, 337 p.
- Suárez-Burgoa, L.O. (2008). Rock mass mechanical behavior assessment at the Porco III underground hydropower central, Colombia - South America. Master's Degree Thesis in Geotechnical Engineering. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas-Escuela de Ingeniería Civil. Medellín- Colombia. 400 p.
- Wyllie, D.C. & Mah, C.W (2001). *Rock slope engineering. Civil and mining. 4TH edition.*
- Zhao. J. (2008). *Rock mechanics for civil engineers. School of architecture, civil and environmental engineering Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland.*

Apêndice A – Perfis de Sondagem

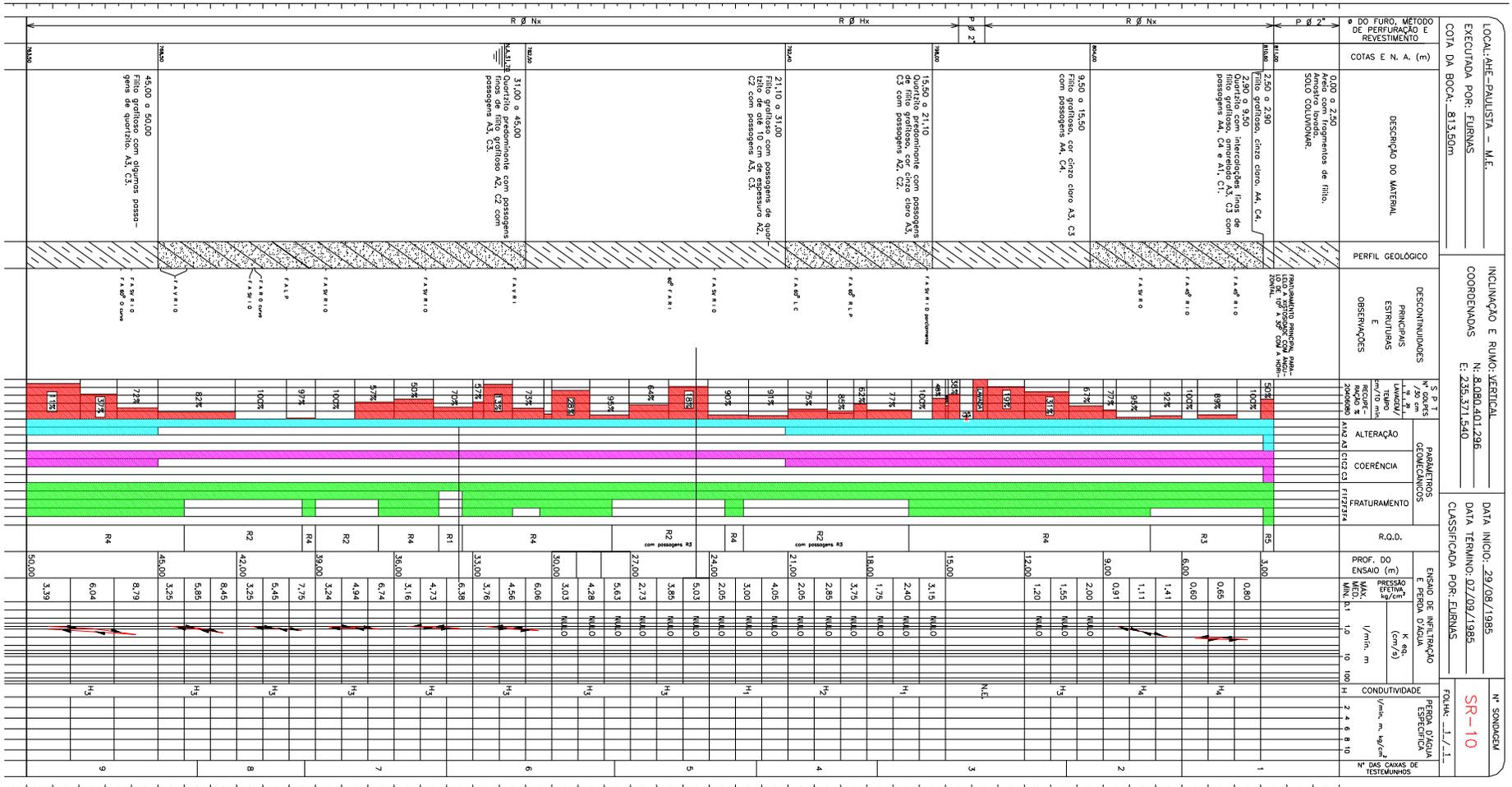


Figura A.3 - Perfil de sondagem SR-10 (Furnas, 2006).

Caracterização Geomecânica de Maciços Rochosos Intemperizados

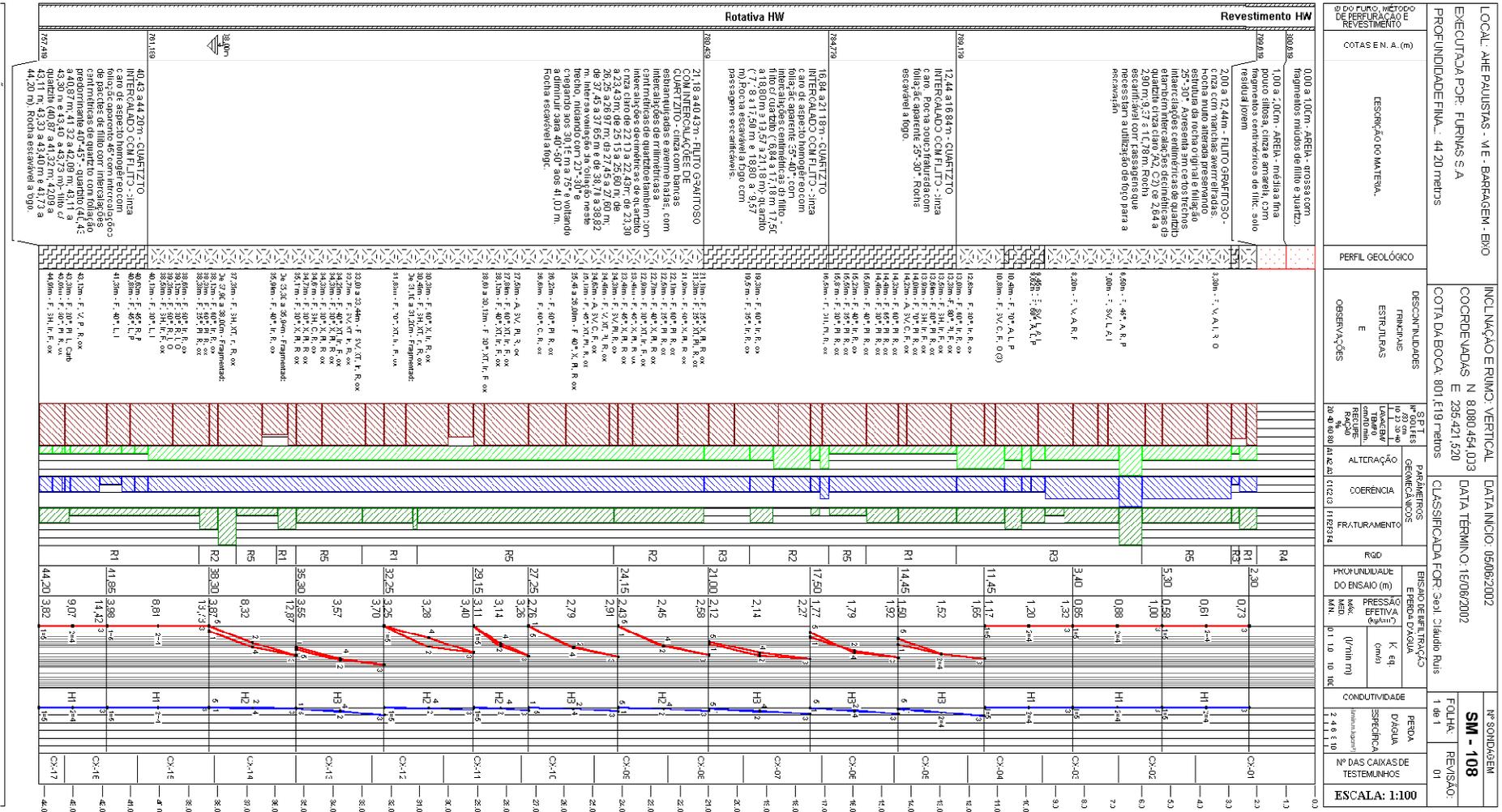


Figura A.4 - Perfil de sondagem SM-108 (Furnas, 2006).

Apêndice A – Perfis de Sondagem

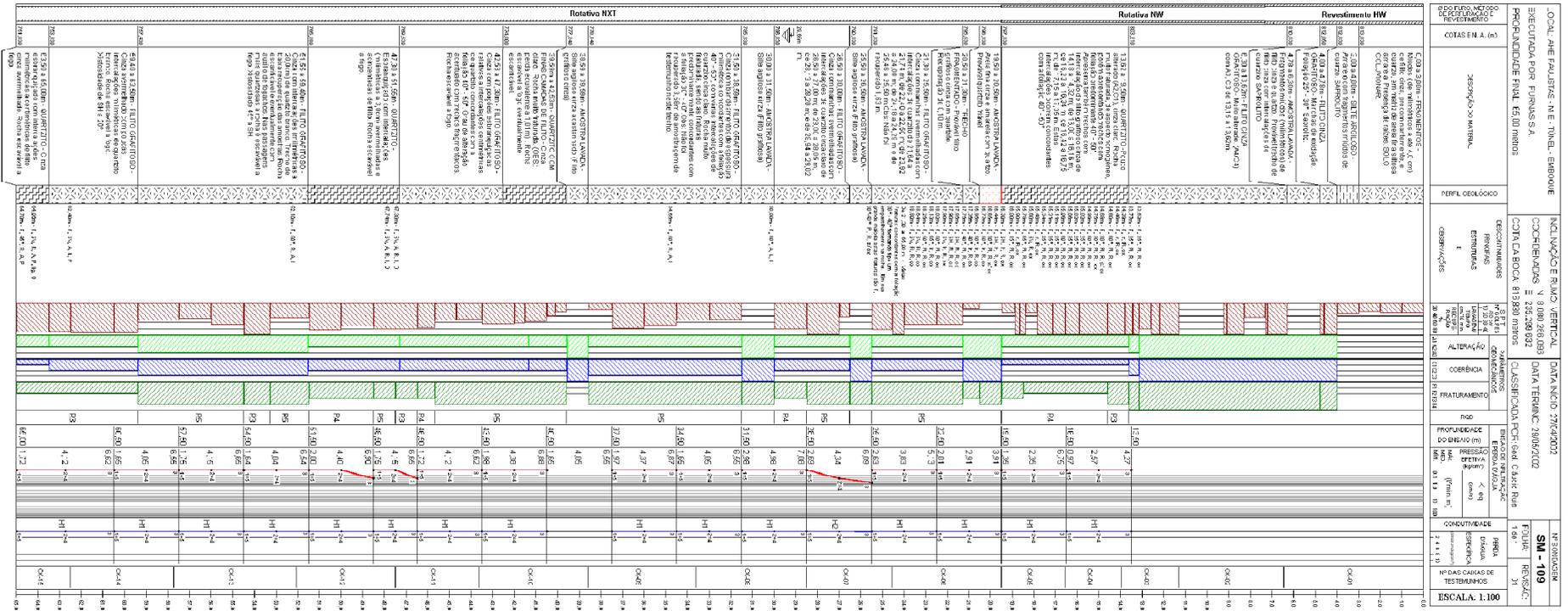


Figura A.5 - Perfil de sondagem SM-109 (Furnas, 2006).

Caracterização Geomecânica de Maciços Rochosos Intemperizados

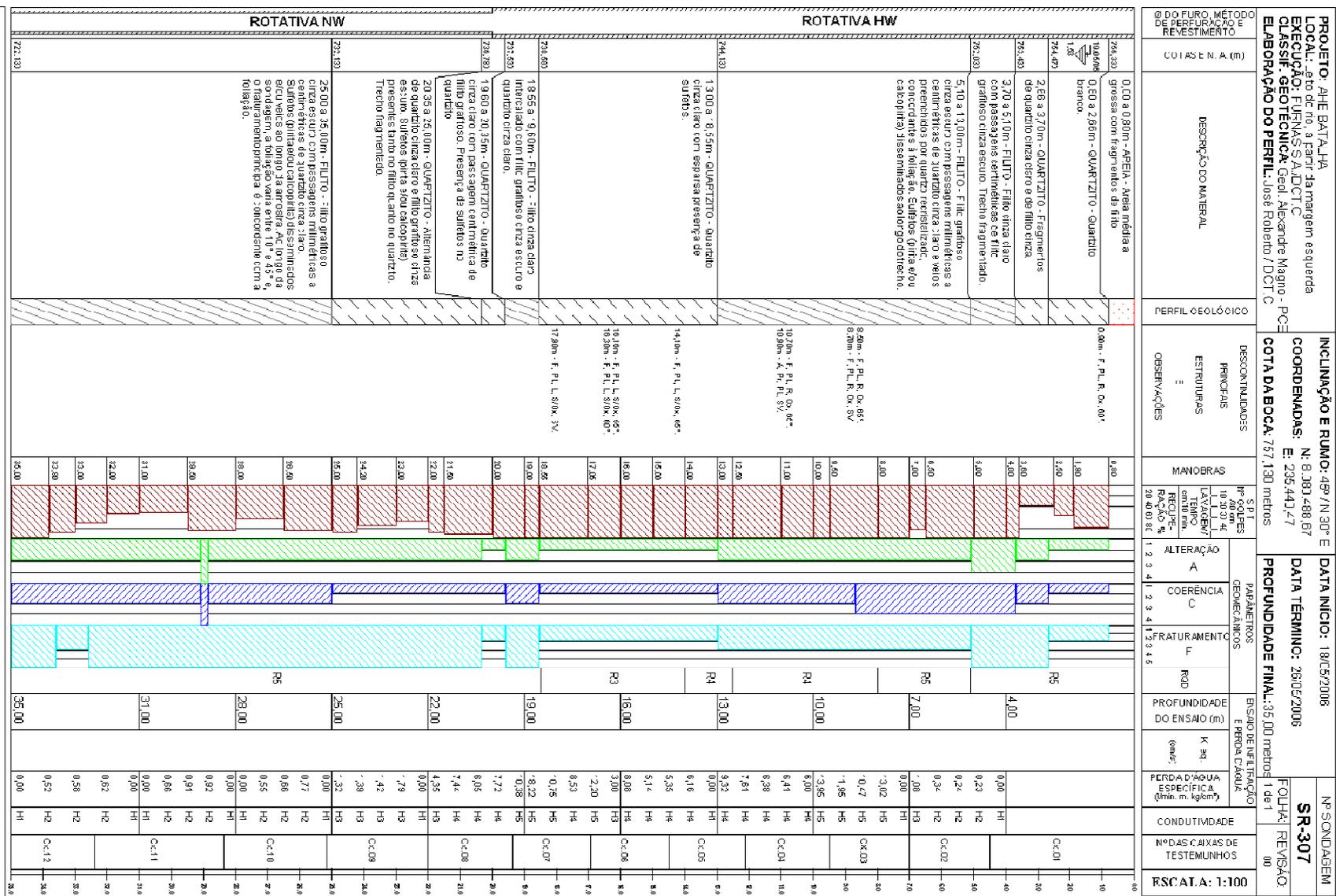


Figura A.14 - Perfil de sondagem SM-307 (Furnas, 2006).

Apêndice B. Registro de Ensaios

Tabela B.1 - Resultados de massa específica, porosidade, absorção e índice de vazios –filito-.

Registro	Furo	Prof. (m)	Coerência	Alteração	$\rho_{a \text{ sec}}$ (kg/m ³)	$\rho_{a \text{ sat}}$ (kg/m ³)	η_a (%)	α_a (%)	Índice de vazios
402.472.006	SM-116	13,30 a 13,48	1	2	2354,55	2492,95	13,84	5,88	0,161
402.472.006	SM-116	13,30 a 13,48	1	2	2422,55	2541,43	11,89	4,91	0,135
402.482.006	SM-116	13,48 a 13,66	1	2	2478,66	2612,40	13,37	5,40	0,154
402.482.006	SM-116	13,48 a 13,66	1	2	2570,08	2688,02	11,79	4,59	0,134
4.0003.07/12	SM-302	17,16 a 17,35	2	2	2102,09	2308,66	20,66	9,83	0,260
4.0005.07/11	SM-302	33,70 a 33,98	2	2	2182,64	2360,52	17,79	8,15	0,216
4.0102.07//13	SM-301	28,64 a 28,89	2	2	2343,87	2483,45	13,96	5,96	0,162
4.0102.07/05	SM-301	28,64 a 28,89	2	2	2212,78	2389,19	17,64	7,97	0,214
4.0103.07/04	SM-301	29,19 a 29,39	2	2	2202,37	2386,71	18,43	8,37	0,226
4.0103.07/15	SM-301	29,19 a 29,39	2	2	2191,75	2377,18	18,54	8,46	0,228
4.0105.07/18	SM-116	12,47 a 12,65	2	2	2208,81	2398,82	19,00	8,60	0,235
4.0105.07/25	SM-116	12,47 a 12,65	2	2	2059,71	2288,71	22,90	11,12	0,297
4.0106.07/04	SM-116	42,70 a 42,82	2	2	2289,98	2425,37	13,54	5,91	0,157
4.0106.07/10	SM-116	42,70 a 42,82	2	2	2233,84	2378,57	14,47	6,48	0,169
4.0112.07/01	SM-302	33,20 a 33,87	2	2	2448,07	2619,57	17,15	7,01	0,207
4.0112.07/01	SM-302	33,20 a 33,87	2	2	2384,19	2447,93	6,37	2,67	0,068
4.0112.07/03	SM-302	33,20 a 33,87	2	2	2575,12	2600,29	2,52	0,98	0,026
4.0112.07/08	SM-302	33,20 a 33,87	2	2	2086,55	2301,86	21,53	10,32	0,274
4.0112.07/09	SM-302	33,20 a 33,87	2	2	2605,37	2612,37	0,70	0,27	0,007
4.0112.07/20	SM-302	33,20 a 33,87	2	2	2226,08	2416,02	18,99	8,53	0,234
4.0112.07/22	SM-302	33,20 a 33,87	2	2	2114,78	2314,63	19,99	9,45	0,250
4.0112.07/30	SM-302	33,20 a 33,87	2	2	2228,68	2405,44	17,68	7,93	0,215
4.0112.07/31	SM-302	33,20 a 33,87	2	2	2228,13	2376,15	14,80	6,64	0,174
4.0113.07/02	SM-302	35,10 a 35,68	2	2	2214,30	2389,82	17,55	7,93	0,213
4.0113.07/03	SM-302	35,10 a 35,68	2	2	2224,46	2407,14	18,27	8,21	0,224
4.0113.07/16	SM-302	35,10 a 35,68	2	2	2241,94	2416,48	17,45	7,78	0,211
4.0113.07/27	SM-302	35,10 a 35,68	2	2	2354,74	2503,67	14,89	6,32	0,175
4.0113.07/28	SM-302	35,10 a 35,68	2	2	2283,73	2458,91	17,52	7,67	0,212
4.0115.07/03	SM-116	33,90 a 34,67	2	2	2107,28	2301,13	19,39	9,20	0,240
4.0115.07/05	SM-116	33,90 a 34,67	2	2	2043,80	2267,79	22,40	10,96	0,289
4.0115.07/06	SM-116	33,90 a 34,67	2	2	2047,74	2272,78	22,50	10,99	0,290
4.0115.07/07	SM-116	33,90 a 34,67	2	2	2000,76	2229,55	22,88	11,44	0,297
4.0115.07/08	SM-116	33,90 a 34,67	2	2	2040,23	2274,82	23,46	11,50	0,306
4.0115.07/09	SM-116	33,90 a 34,67	2	2	2086,11	2289,72	20,36	9,76	0,256
4.0115.07/09	SM-116	33,90 a 34,67	2	2	2062,58	2278,86	21,63	10,49	0,276
4.0115.07/10	SM-116	33,90 a 34,67	2	2	2200,08	2453,27	25,32	11,51	0,339
4.0115.07/14	SM-116	33,90 a 34,67	2	2	2044,45	2274,87	23,04	11,27	0,299
4.0115.07/23	SM-116	33,90 a 34,67	2	2	2097,47	2301,34	20,39	9,72	0,256
4.0115.07/26	SM-116	33,90 a 34,67	2	2	2048,59	2259,78	21,12	10,31	0,268
402.422.006	SM-302	21,40 a 21,70	2	2	2451,35	2529,37	7,80	3,18	0,085
402.422.006	SM-302	21,40 a 21,70	2	2	2306,49	2422,90	11,64	5,05	0,132
402.422.006	SM-302	21,40 a 21,70	2	2	2383,11	2480,82	9,77	4,10	0,108
402.422.006	SM-302	21,40 a 21,70	2	2	2430,87	2521,53	9,07	3,73	0,100
402.432.006	SM-302	22,50 a 22,80	2	2	2274,90	2416,42	14,15	6,22	0,165
402.432.006	SM-302	22,50 a 22,80	2	2	2163,55	2363,87	20,03	9,26	0,250
402.432.006	SM-302	22,50 a 22,80	2	2	2213,09	2391,20	17,81	8,05	0,217
402.432.006	SM-302	22,50 a 22,80	2	2	2271,26	2393,65	12,24	5,39	0,139
402.442.006	SM-302	35,70 a 36,00	2	2	2296,52	2452,66	15,61	6,80	0,185
402.442.006	SM-302	35,70 a 36,00	2	2	2267,81	2425,43	15,76	6,95	0,187
402.442.006	SM-302	35,70 a 36,00	2	2	2328,69	2474,20	14,55	6,25	0,170
402.442.006	SM-302	35,70 a 36,00	2	2	2289,03	2431,20	14,22	6,21	0,166
402.442.006	SM-302	35,70 a 36,00	2	2	2282,32	2428,29	14,60	6,40	0,171
402.462.006	SM-116	29,54 a 29,70	2	2	2257,25	2414,90	15,76	6,98	0,187
402.462.006	SM-116	29,54 a 29,70	2	2	2310,41	2457,86	14,74	6,38	0,173
402.462.006	SM-116	29,54 a 29,70	2	2	2260,05	2418,11	15,81	6,99	0,188

Caracterização Geomecânica de Maciços Rochosos Intemperizados

Registro	Furo	Prof. (m)	Coerência	Alteração	$\rho_{a \text{ sec}}$ (kg/m ³)	$\rho_{a \text{ sat}}$ (kg/m ³)	η_a (%)	α (%)	Índice de vazios
402.462.006	SM-116	29,54 a 29,70	2	2	2247,68	2412,50	16,48	7,33	0,197
402.462.006	SM-116	29,54 a 29,70	2	2	2297,45	2454,27	15,68	6,83	0,186
402.462.006	SM-116	29,54 a 29,70	2	2	2168,86	2361,61	19,28	8,89	0,239
402.532.006	SM-301	14,50 a 14,90	2	2	2372,78	2449,34	7,66	3,23	0,083
402.532.006	SM-301	14,50 a 14,90	2	2	2411,52	2497,75	8,62	3,58	0,094
402.532.006	SM-301	14,50 a 14,90	2	2	2461,55	2536,98	7,54	3,06	0,082
402.532.006	SM-301	14,50 a 14,90	2	2	2391,96	2455,94	6,40	2,67	0,068
402.552.006	SM-305	17,15 a 17,55	2	2	2230,33	2409,90	17,96	8,05	0,219
402.552.006	SM-305	17,15 a 17,55	2	2	2310,54	2473,54	16,30	7,05	0,195
402.552.006	SM-305	17,15 a 17,55	2	2	2132,88	2341,83	20,90	9,80	0,264
4.0099.07/06	SR-307	7,20 a 7,42	3	2	2217,68	2380,41	16,27	7,34	0,194
4.0099.07/08	SR-307	7,20 a 7,42	3	2	2414,67	2421,44	0,68	0,28	0,007
4.0099.07/12	SR-307	7,20 a 7,42	3	2	2111,00	2312,03	20,10	9,52	0,252
4.0099.07/17	SR-307	7,20 a 7,42	3	2	2117,16	2324,06	20,69	9,77	0,261
4.0100.07/11	SR-307	6,85 a 7,00	3	2	2062,76	2269,76	20,70	10,04	0,261
4.0100.07/24	SR-307	6,85 a 7,00	3	2	1998,39	2238,71	24,03	12,03	0,316
4.0101.07/19	SM-302	15,00 a 15,20	3	2	2196,95	2372,96	17,60	8,01	0,214
4.0101.07/29	SM-302	15,00 a 15,20	3	2	2330,22	2481,89	15,17	6,51	0,179
4.0104.07/07	SM-301	37,55 a 37,75	4	2	2147,19	2335,01	18,78	8,75	0,231
4.0104.07/13	SM-301	37,55 a 37,75	4	2	2143,43	2318,73	17,53	8,18	0,213
4.0104.07/21	SM-301	37,55 a 37,75	4	2	2052,91	2272,73	21,98	10,71	0,282
402.542.006	SM-301	24,22 a 24,40	4	2	2267,69	2433,32	16,56	7,30	0,199

Tabela B.2 - Resultados de massa específica, porosidade, absorção e índice de vazios –filito grafitoso-.

Registro	Furo	Prof. (m)	Coerência	Alteração	$\rho_{a \text{ sec}}$ (kg/m ³)	$\rho_{a \text{ sat}}$ (kg/m ³)	η_a (%)	α (%)	Índice de vazios
4.0017.07/10	SM-113	30,12 a 30,24	2	1	2749,18	2765,48	1,63	0,59	0,017
4.0017.07/10	SM-113	30,12 a 30,24	2	1	2719,91	2746,02	2,61	0,96	0,027
4.0098.07/09	SM-113	37,89 a 38,30	2	1	2753,61	2765,52	1,19	0,43	0,012
4.0098.07/12	SM-113	37,89 a 38,30	2	1	2746,99	2760,25	1,33	0,48	0,013
4.0098.07/21	SM-113	37,89 a 38,30	2	1	2759,74	2773,30	1,36	0,49	0,014
4.0098.07/24	SM-113	37,89 a 38,30	2	1	2787,69	2800,63	1,29	0,46	0,013
4.0098.07/27	SM-113	37,89 a 38,30	2	1	2778,85	2790,18	1,13	0,41	0,011
4.0098.07/32	SM-113	37,89 a 38,30	2	1	2746,94	2760,85	1,39	0,51	0,014
4.0114.07/01	SM-113	36,60 a 37,33	2	1	2683,03	2712,93	2,99	1,11	0,031
4.0114.07/08	SM-113	36,60 a 37,33	2	1	2728,77	2746,73	1,80	0,66	0,018
4.0114.07/09	SM-113	36,60 a 37,33	2	1	2705,66	2728,82	2,32	0,86	0,024
4.0114.07/11	SM-113	36,60 a 37,33	2	1	2757,85	2775,41	1,76	0,64	0,018
4.0114.07/12	SM-113	36,60 a 37,33	2	1	2695,40	2713,57	1,82	0,67	0,019
4.0114.07/14	SM-113	36,60 a 37,33	2	1	2718,10	2740,77	2,27	0,83	0,023
4.0114.07/22	SM-113	36,60 a 37,33	2	1	2731,61	2751,87	2,03	0,74	0,021
4.0114.07/25	SM-113	36,60 a 37,33	2	1	2740,73	2765,03	2,43	0,89	0,025
4.0114.07/31	SM-113	36,60 a 37,33	2	1	2686,43	2711,98	2,56	0,95	0,026
4.0117.07/05	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	2757,55	2772,40	1,48	0,54	0,015
4.0117.07/06	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	2756,94	2772,44	1,55	0,56	0,016
4.0117.07/07	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	2700,69	2725,63	2,49	0,92	0,026
4.0117.07/07	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	2753,80	2770,09	1,63	0,59	0,017
4.0117.07/08	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	2737,05	2754,91	1,79	0,65	0,018
4.0117.07/11	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	2712,17	2729,63	1,75	0,64	0,018
4.0117.07/13	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	2733,78	2754,40	2,06	0,75	0,021
4.0117.07/16	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	2732,54	2751,94	1,94	0,71	0,020
4.0117.07/17	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	2737,68	2758,46	2,08	0,76	0,021
4.0117.07/18	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	2720,64	2741,24	2,06	0,76	0,021
4.0117.07/19	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	2734,84	2761,08	2,62	0,96	0,027
4.0117.07/20	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	2673,37	2703,05	2,97	1,11	0,031
4.0117.07/23	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	2725,49	2747,49	2,20	0,81	0,022
4.0117.07/26	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	2757,70	2777,01	1,93	0,70	0,020
4.0117.07/28	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	2733,49	2744,93	1,14	0,42	0,012

Apêndice B – Registro de Ensaios

Registro	Furo	Prof. (m)	Coerência	Alteração	$\rho_{a \text{ sec}}$ (kg/m ³)	$\rho_{a \text{ sat}}$ (kg/m ³)	η_a (%)	α_a (%)	Índice de vazios
4.0117.07/29	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	2745,72	2764,25	1,85	0,67	0,019
4.0117.07/30	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	2684,88	2710,51	2,56	0,95	0,026
4.0117.07/33	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	2723,28	2748,82	2,55	0,94	0,026
4.0117.07/34	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	2741,96	2757,64	1,57	0,57	0,016
4.0011.07/15	SM-309	14,54 a 14,72	2	2	2375,73	2501,47	12,57	5,29	0,144
4.0019.07/02	SM-309	14,54 a 14,78	2	2	2514,45	2570,06	5,56	2,21	0,059
4.0019.07/11	SM-309	14,54 a 14,78	2	2	2454,00	2519,83	6,58	2,68	0,070
4.0019.07/13	SM-309	14,54 a 14,78	2	2	2413,68	2536,54	12,29	5,09	0,140
4.0019.07/29	SM-309	14,54 a 14,78	2	2	2465,33	2545,73	8,04	3,26	0,087
4.0095.07/03	SR-307	12,00 a 12,15	2	2	2442,87	2540,53	9,77	4,00	0,108
4.0095.07/14	SR-307	12,00 a 12,15	2	2	2452,52	2543,46	9,09	3,71	0,100
4.0110.07/01	SR-307	11,90 a 12,17	2	2	2501,58	2590,44	8,89	3,55	0,098
4.0110.07/16	SR-307	11,90 a 12,17	2	2	2457,34	2554,49	9,71	3,95	0,108
4.0110.07/18	SR-307	11,90 a 12,17	2	2	2478,32	2558,45	8,01	3,23	0,087
4.0111.07/04	SR-307	12,40 a 12,65	2	2	2413,41	2523,45	11,00	4,56	0,124
4.0111.07/05	SR-307	12,40 a 12,65	2	2	2435,85	2540,05	10,42	4,28	0,116
402.592.006	SM-309	12,38 a 12,58	2	2	2417,99	2533,22	11,52	4,77	0,130
402.602.006	SM-309	14,14 a 14,40	2	2	2416,85	2526,69	10,98	4,54	0,123
402.602.006	SM-309	14,14 a 14,40	2	2	2427,14	2532,28	10,51	4,33	0,117
402.602.006	SM-309	14,14 a 14,40	2	2	2321,59	2458,74	13,72	5,91	0,159
402.632.006	SR-307	27,43 a 27,56	2	2	2445,77	2550,69	10,49	4,29	0,117
4.0096.07/02	SR-309	8,50 a 8,80	4	3	2309,75	2453,37	14,36	6,22	0,168
4.0096.07/02	SR-309	8,50 a 8,80	4	3	2247,48	2421,25	17,38	7,73	0,210
4.0096.07/17	SR-309	8,50 a 8,80	4	3	2193,18	2346,82	15,36	7,01	0,182

Tabela B.3 - Resultados de massa específica, porosidade, absorção e índice de vazios – quartzito.

Registro	Furo	Prof. (m)	Coerência	Alteração	$\rho_{a \text{ sec}}$ (kg/m ³)	$\rho_{a \text{ sat}}$ (kg/m ³)	η_a (%)	α_a (%)	Índice de vazios
4.0092.07/06	SR-10	42,43 a 42,53	1	1	2488,43	2524,29	3,59	1,44	0,037
4.0107.07/09	SR-10	39,00 a 39,47	1	1	2533,65	2562,97	2,93	1,16	0,030
4.0107.07/25	SR-10	39,00 a 39,47	1	1	2449,11	2492,30	4,32	1,76	0,045
4.0118.07/05	SR-10	43,15 a 43,48	1	1	2469,36	2497,72	2,84	1,15	0,029
4.0118.07/15	SR-10	43,15 a 43,48	1	1	2447,57	2475,75	2,82	1,15	0,029
4.0118.07/17	SR-10	43,15 a 43,48	1	1	2451,73	2479,51	2,78	1,13	0,029
4.0118.07/24	SR-10	43,15 a 43,48	1	1	2457,24	2486,19	2,90	1,18	0,030
4.0118.07/28	SR-10	43,15 a 43,48	1	1	2451,01	2480,43	2,94	1,20	0,030
4.0119.07/04	SR-10	40,00 a 40,32	1	1	2506,38	2531,91	2,55	1,02	0,026
4.0119.07/04	SR-10	40,00 a 40,32	1	1	2495,11	2519,94	2,48	1,00	0,025
4.0119.07/13	SR-10	40,00 a 40,32	1	1	2509,45	2533,93	2,45	0,98	0,025
4.0119.07/31	SR-10	40,00 a 40,32	1	1	2510,90	2535,10	2,42	0,96	0,025
4.0119.07/32	SR-10	40,00 a 40,32	1	1	2515,17	2540,29	2,51	1,00	0,026
4.0245.06/05	SR-10	33,40 a 33,60	1	1	2506,82	2532,50	2,57	1,02	0,026
4.0262.06/01	SM-105	11,03 a 11,21	1	1	2490,44	2522,67	3,22	1,29	0,033
402.452.006	SR-10	33,40 a 33,60	1	1	2518,08	2540,92	2,28	0,91	0,023
402.452.006	SR-10	33,40 a 33,60	1	1	2516,56	2537,02	2,05	0,81	0,021
402.452.006	SR-10	33,40 a 33,60	1	1	2515,51	2540,29	2,48	0,99	0,025
402.622.006	SM-105	11,03 a 11,21	1	1	2613,88	2618,00	0,41	0,16	0,004
402.622.006	SM-105	11,03 a 11,21	1	1	2559,65	2564,33	0,47	0,18	0,005
402.622.006	SM-105	11,03 a 11,21	1	1	2638,86	2641,77	0,29	0,11	0,003
4.0090.07/16	SR-307	19,70 a 20,00	1	1	2380,34	2411,74	3,14	1,32	0,032
4.0016.07/02	SM-109	15,81 a 16,20	1	2	2447,08	2480,81	3,37	1,38	0,035
4.0016.07/06	SM-109	15,81 a 16,20	1	2	2456,09	2486,97	3,09	1,26	0,032
4.0016.07/11	SM-109	15,81 a 16,20	1	2	2420,61	2463,30	4,27	1,76	0,045
4.0093.07/10	SM-116	56,37 a 56,67	1	2	2472,98	2539,89	6,69	2,71	0,072
4.0093.07/19	SM-116	56,37 a 56,67	1	2	2593,58	2605,30	1,17	0,45	0,012
4.0093.07/08	SM-116	56,37 a 56,67	1	2	2523,18	2566,83	4,37	1,73	0,046
4.0014.07/07	SM-108	14,70 a 15,00	2	1	2443,92	2482,29	3,84	1,57	0,040
4.0014.07/10	SM-108	14,70 a 15,00	2	1	2408,49	2456,94	4,85	2,01	0,051
4.0014.07/26	SM-108	14,70 a 15,00	2	1	2427,69	2473,24	4,55	1,88	0,048

Caracterização Geomecânica de Maciços Rochosos Intemperizados

Registro	Furo	Prof. (m)	Coerência	Alteração	$\rho_{a \text{ sec}}$ (kg/m ³)	$\rho_{a \text{ sat}}$ (kg/m ³)	n_a (%)	α_a (%)	Índice de vazios
4.0094.07/14	SM-108	12,40 a 12,62	2	1	2323,12	2410,61	8,75	3,77	0,096
4.0094.07/22	SM-108	12,40 a 12,62	2	1	2461,94	2520,64	5,87	2,38	0,062
4.0109.07/12	SM-105	3,70 a 4,12	4	3	2268,84	2366,61	9,78	4,31	0,108
4.0109.07/13	SM-105	3,70 a 4,12	4	3	2296,44	2386,58	9,01	3,93	0,099
4.0109.07/14	SM-105	3,70 a 4,12	4	3	2286,70	2381,46	9,48	4,14	0,105
4.0109.07/21	SM-105	3,70 a 4,12	4	3	2264,80	2368,73	10,39	4,59	0,116
4.0109.07/23	SM-105	3,70 a 4,12	4	3	2292,54	2388,34	9,58	4,18	0,106
4.0261.07/12	SM-105	06,17 a 06,43	4	3	2272,90	2370,68	9,78	4,30	0,108
402.612.006	SM-105	06,17 a 06,43	4	3	2201,87	2321,78	11,99	5,45	0,136
402.612.006	SM-105	06,17 a 06,43	4	3	2192,51	2313,37	12,09	5,51	0,137

Tabela B.4 - Resultados da velocidade de onda P, densidade seca ao natural e módulo de Young dinâmico –filito-.

Registro	Furo	Prof. (m)	Coerência	Alteração	Velocidade média (m/s)	Densidade $\rho=(\text{kg/m}^3)$	Módulo dinâmico (GPa)
402.482.006	SM-116	13,48 a 13,66	1	2	1615,35	2515,62	6,56
402.472.006	SM-116	13,30 a 13,48	1	2	1650,29	2421,97	6,60
402.432.006	SM-302	22,50 a 22,80	2	2	839,40	2240,65	1,58
402.442.006	SM-302	35,70 a 36,00	2	2	955,56	2300,36	2,10
402.462.006	SM-116	29,54 a 29,70	2	2	1485,76	2295,63	5,07
402.552.006	SM-305	17,15 a 17,55	2	2	1281,32	2283,83	3,75
402.422.006	SM-302	21,40 a 21,70	2	2	778,79	2406,04	1,46
402.532.006	SM-301	14,50 a 14,90	2	2	1267,82	2389,89	3,84
4.0001.07	SM-204	39,88 a 40,00	2	2	1743,27	2470,02	7,51
4.0002.07	SM-305	24,50 a 24,75	2	2	842,78	2228,61	1,58
401.122.008	SM 203	23,95 a 24,18	2	2	1145,94	2232,00	2,93
401.142.008	SM 306	5,14 a 5,34	2	2	533,42	2123,00	0,60
401.152.008	SM 306	14,80 a 15,01	2	2	738,85	2240,00	1,22
401.112.008	SM 115	55,46 a 55,60	3	3	802,79	2282,00	1,47
401.132.008	SM 306	4,50 a 4,66	3	3	669,33	2151,00	0,96

Tabela B.5 - Resultados da velocidade de onda P, densidade seca ao natural e módulo de Young dinâmico –filito grafitoso-.

Registro	Furo	Prof. (m)	Coerência	Alteração	Velocidade média (m/s)	Densidade $\rho=(\text{kg/m}^3)$	Módulo dinâmico (GPa)
402.492.006	SM-113	21,13 a 21,36	2	1	1076,80	2524,88	2,93
402.522.006	SM-113	28,04 a 28,18	2	1	1351,87	2627,78	4,80
402.502.006	SM-113	22,00 a 22,19	2	1	1545,64	2534,01	6,05
402.512.006	SM-113	25,37 a 25,55	2	1	746,65	2531,56	1,41
402572006	SM-305	28,80 a 29,00	2	2	566,42	2229,83	0,72
402.632.006	SR-307	27,43 a 27,56	2	2	1646,44	2439,56	6,61
402.592.006	SM-309	12,38 a 12,58	2	2	586,25	2297,99	0,79
402.602.006	SM-309	14,14 a 14,40	2	2	1013,12	2436,68	2,50
402.582.006	SM-309	10,70 a 10,90	2	2	909,45	2207,92	1,83
402.562.006	SM-305	29,25 a 29,55	2	2	1010,52	2413,52	2,46
4.0055.09/am01	Amostras obtidas de grandes blocos	-	3	3	1055,72	2341,80	2,61
4.0055.09/am02		-	3	3	1080,19	2358,50	2,75
4.0055.09/am03		-	3	3	786,23	2237,40	1,38
4.0055.09/am04		-	3	3	696,37	2193,08	1,06
4.0055.09/am05		-	3	3	687,57	2149,26	1,02
4.0055.09/am06		-	3	3	548,15	2216,95	0,67

Tabela B.6 - Resultados da velocidade de onda P, densidade seca ao natural e módulo de Young dinâmico –quartzito-.

Registro	Furo	Prof. (m)	Coerência	Alteração	Velocidade média (m/s)	Densidade $\rho=(\text{kg/m}^3)$	Módulo dinâmico (GPa)
402.452.006	SR-10	33,40 a 33,60	1	1	4466,50	2513,18	50,14
402.622.006	SM-105	11,03 a 11,21	1	1	4672,91	2598,99	56,75
401.162.008	SM 302	38,70 a 40,00	2	2	1763,89	2443,00	7,60
401.172.008	SM 305	40,20 a 40,40	2	2	856,4	2413,00	1,77
401.182.008	SM 305	44,38 a 44,60	2	2	1276,92	2490,00	4,06
402.612.006	SM-105	06,17 a 06,43	4	3	136,81	2245,42	0,04

Tabela B.7 - Resultado do índice de resistência puntiforme (carga paralela à foliação) – filito-.

Registro	Amostra	Furo	Prof. (m)	Coerência	Alteração	$I_{s//}$ (MPa)	$I_{s50//}$ (MPa)
4.0112.07	20	SM-302	33,20 a 33,87	2	2	0,05	0,05
	30			2	2	0,05	0,06
4.0113.07	2	SM-302	35,10 a 35,68	2	2	0,07	0,09
	27			2	2	0,07	0,08
	28			2	2	0,06	0,08
4.0099.07	6	SR-307	7,20 a 7,42	3	2	0,07	0,09
	12			3	2	0,02	0,02
4.0100.07	11	SR-307	6,85 a 7,00	3	2	0,06	0,07
	24			3	2	0,02	0,02
4.0101.07	19	SM-302	15,00 a 15,20	3	2	0,02	0,02
	29			3	2	0,1	0,12

Tabela B.8 - Resultado do índice de resistência puntiforme (carga perpendicular à foliação) – filito-.

Registro	Amostra	Furo	Prof. (m)	Coerência	Alteração	$I_{\perp L}$ (MPa)	$I_{s50\perp L}$ (MPa)
4.0246.06	2	SM-116	29,54 a 29,70	2	2	0,27	0,28
4.0003.07	12	SM-302	17,16 a 17,35	2	2	0,26	0,28
4.0005.07	11	SM-302	33,70 a 33,98	2	2	0,37	0,37
4.0106.07	4	SM-116	42,70 a 42,82	2	2	1,18	1,1
4.0112.07	1	SM-302	33,20 a 33,87	2	2	0,23	0,23
4.0115.07	3	SM-116	33,90 a 34,67	2	2	0,13	0,14
4.0115.07	5	SM-116	33,90 a 34,67	2	2	0,11	0,12
4.0115.07	6	SM-116	33,90 a 34,67	2	2	0,18	0,18
4.0115.07	7	SM-116	33,90 a 34,67	2	2	0,15	0,15
4.0115.07	8	SM-116	33,90 a 34,67	2	2	0,06	0,06
4.0115.07	9	SM-116	33,90 a 34,67	2	2	0,09	0,1
4.0115.07	10	SM-116	33,90 a 34,67	2	2	0,06	0,06
4.0104.07	13	SM-301	37,55 a 37,75	4	2	0,18	0,18



Figura B.1 - Registro fotográfico do ensaio de resistência puntiforme –filito-. a) dir. paralela b) dir perpendicular. (Furnas, 2009).

Tabela B.9 - Resultado do índice de resistência puntiforme (carga paralela à foliação) – filito grafitoso-.

Registro	Amostra	Furo	Prof. (m)	Coerência	Alteração	$I_{s//}$ (MPa)	$I_{s50//}$ (MPa)
4.0097.07	15	SR-10	40,34 a 40,44	1	1	0,71	0,74
4.0098.07	9	SM-113	37,89 a 38,30	2	1	0,93	0,96
4.0098.07	32	SM-113	37,89 a 38,30	2	1	0,82	0,83
4.0114.07	8	SM-113	36,60 a 37,33	2	1	0,69	0,7
4.0114.07	11	SM-113	36,60 a 37,33	2	1	0,8	0,82
4.0114.07	25	SM-113	36,60 a 37,33	2	1	0,62	0,64
4.0114.07	31	SM-113	36,60 a 37,33	2	1	0,71	0,72
4.0117.07	6	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	0,85	0,87
4.0117.07	7	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	0,5	0,51
4.0117.07	10	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	0,47	0,49
4.0117.07	13	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	0,67	0,68
4.0117.07	17	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	0,28	0,29
4.0117.07	18	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	0,41	0,42
4.0117.07	19	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	0,49	0,5
4.0117.07	20	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	0,62	0,63
4.0117.07	23	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	0,64	0,66
4.0117.07	26	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	0,49	0,51
4.0117.07	28	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	0,6	0,62
4.0117.07	29	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	0,52	0,53
4.0117.07	30	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	0,42	0,43
4.0117.07	33	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	0,35	0,36
4.0110.07	1	SR-307	11,90 a 12,17	2	2	0,29	0,35
4.0111.07	5	SR-307	12,40 a 12,65	2	2	0,23	0,28
4.0096.07	2	SM-309	8,50 a 8,80	4	3	0,23	0,28

Tabela B.10- Resultado do índice de resistência puntiforme (carga perpendicular à foliação) – filito grafitoso-.

Registro	Amostra	Furo	Prof. (m)	Coerência	Alteração	$I_{s\perp}$ (MPa)	$I_{s50\perp}$ (MPa)
4.0009.07	4	SR-10	24,50 a 24,65	1	1	1,48	1,3
4.0114.07	9	SM-113	36,60 a 37,33	2	1	0,68	0,67
4.0114.07	12	SM-113	36,60 a 37,33	2	1	0,8	0,82
4.0117.07	10	SM-113	35,60 a 36,60	2	1	1,74	1,64
4.0011.07	15	SM-309	14,54 a 14,72	2	2	0,23	0,25
4.0019.07	13	SM-309	14,54 a 14,78	2	2	0,14	0,14
4.0095.07	14	SR-307	12,00 a 12,15	2	2	0,74	0,79
4.0096.07	17	SM-309	8,50 a 8,80	4	3	0,81	0,84



a) b)

Figura B.2 - Registro fotográfico do ensaio de resistência puntiforme –filito grafitoso-. a) dir. paralela b) dir perpendicular. (Furnas, 2009).

Tabela B.11 - Resultado do índice de resistência puntiforme (carga paralela à foliação) – quartzito-.

Registro	Amostra	Furo	Prof. (m)	Coerência	Alteração	I _{50//} (MPa)	I _{500//} (MPa)
4.0090.07	8	SR-307	19,70 a 20,00	1	1	6,78	8,18
4.0090.07	16	SR-307	19,70 a 20,00	1	1	4,04	4,88
4.0090.07	18	SR-307	19,70 a 20,00	1	1	1,13	1,36
4.0107.07	7	SR-10	39,00 a 39,47	1	1	0,06	0,07
4.0107.07	9	SR-10	39,00 a 39,47	1	1	0,33	0,35
4.0107.07	25	SR-10	39,00 a 39,47	1	1	0,44	0,47
4.0107.07	27	SR-10	39,00 a 39,47	1	1	5,83	5,88
4.0107.07	30	SR-10	39,00 a 39,47	1	1	0,52	0,55
4.0118.07	5	SR-10	43,15 a 43,48	1	1	6,67	7,07
4.0118.07	15	SR-10	43,15 a 43,48	1	1	7,54	8
4.0118.07	17	SR-10	43,15 a 43,48	1	1	6,97	7,4
4.0118.07	24	SR-10	43,15 a 43,48	1	1	7,28	7,72
4.0118.07	28	SR-10	43,15 a 43,48	1	1	7,12	7,56
4.0119.07	4	SR-10	40,00 a 40,32	1	1	2,26	2,39
4.0119.07	13	SR-10	40,00 a 40,32	1	1	14,56	13,02
4.0119.07	31	SR-10	40,00 a 40,32	1	1	8,16	8,65
4.0016.07	2	SM-109	15,81 a 16,20	1	2	0,59	0,71
4.0016.07	6	SM-109	15,81 a 16,20	1	2	1,58	1,91
4.0093.07	3	SM-116	56,37 a 56,67	1	2	0,29	0,35
4.0093.07	10	SM-116	56,37 a 56,67	1	2	0,58	0,71
4.0093.07	19	SM-116	56,37 a 56,67	1	2	1,13	1,36
4.0014.07	26	SM-108	14,70 a 15,00	2	1	0,24	0,29
4.0094.07	14	SM-108	12,40 a 12,62	2	1	0,15	0,18
4.0094.07	22	SM-108	12,40 a 12,62	2	1	0,59	0,71
4.0094.07	23	SM-108	12,40 a 12,62	2	1	0,09	0,09
4.0109.07	12	SM-105	3,70 a 4,12	4	3	0,05	0,05
4.0109.07	21	SM-105	3,70 a 4,12	4	3	0,03	0,04

Tabela B.12 - Resultado do índice de resistência puntiforme (carga perpendicular à foliação) – quartzito-.

Registro	Amostra	Furo	Prof. (m)	Coerência	Alteração	I _{5⊥} (MPa)	I _{50⊥} (MPa)
4.0245.06	5	SR-10	33,40 a 33,60	1	1	3,22	3,27
4.0262.06	1	SM-105	11,03 a 11,21	1	1	3,74	3,72
4.0092.06	6	SR-10	42,43 a 42,53	1	1	5,21	5,08
4.0119.07	4	SR-10	40,00 a 40,32	1	1	10,86	10,53
4.0016.07	11	SM-109	15,81 a 16,20	1	2	2,29	2,39
4.0014.07	7	SM-108	14,70 a 15,00	2	1	1,13	1,26
4.0014.07	10	SM-108	14,70 a 15,00	2	1	0,6	0,7
4.0109.07	13	SM-105	3,70 a 4,12	4	3	0,74	0,76
4.0109.07	14	SM-105	3,70 a 4,12	4	3	0,6	0,62



a) b)

Figura B.3 - Registro fotográfico do ensaio de resistência puntiforme - quartzito-. a) dir. paralela b) dir perpendicular. (Furnas, 2009).

Tabela B.13 - Resultado da resistência uniaxial, coeficiente de Poisson e módulo de Young – filito-.

Registro Nº	Furo	Prof. (m)	Relação h/f	Coerência	Alteração	Resistência à compressão (MPa)	Poisson	Módulo de deformabilidade (Gpa)
4.0001.07	SM-204	39,88 a 40,00	2,18	2	2	12,52	0,017	2,61
4.0002.07	SM-305	24,50 a 24,75	2,4	2	2	7,97	0,038	0,95
4.0244.06	SM-302	35,70 a 36,00	2,27	2	2	4,04	0,009	0,25
4.0246.06	SM-116	29,54 a 29,70	2,37	2	2	3,79	0,011	0,39
4.0112.2008	SM 203	23,95 a 24,18	2,4	2	2	7,7	0,027	1,42
4.0114.2008	SM 306	5,14 a 5,34	1,7	2	2	9,2	0,037	0,40
4.0115.2008	SM 306	14,80 a 15,01	1,3	2	2	5,3	0,055	0,51
4.0254.06	SM-302	24,22 a 24,40	2,11	3	2	1,78	0,030	0,45
4.0247.06	SM-113	13,30 a 13,48	2,35	3	2	3,25	0,035	0,85
4.0248.06	SM-301	13,48 a 13,66	2,3	3	2	7,04	0,073	1,25

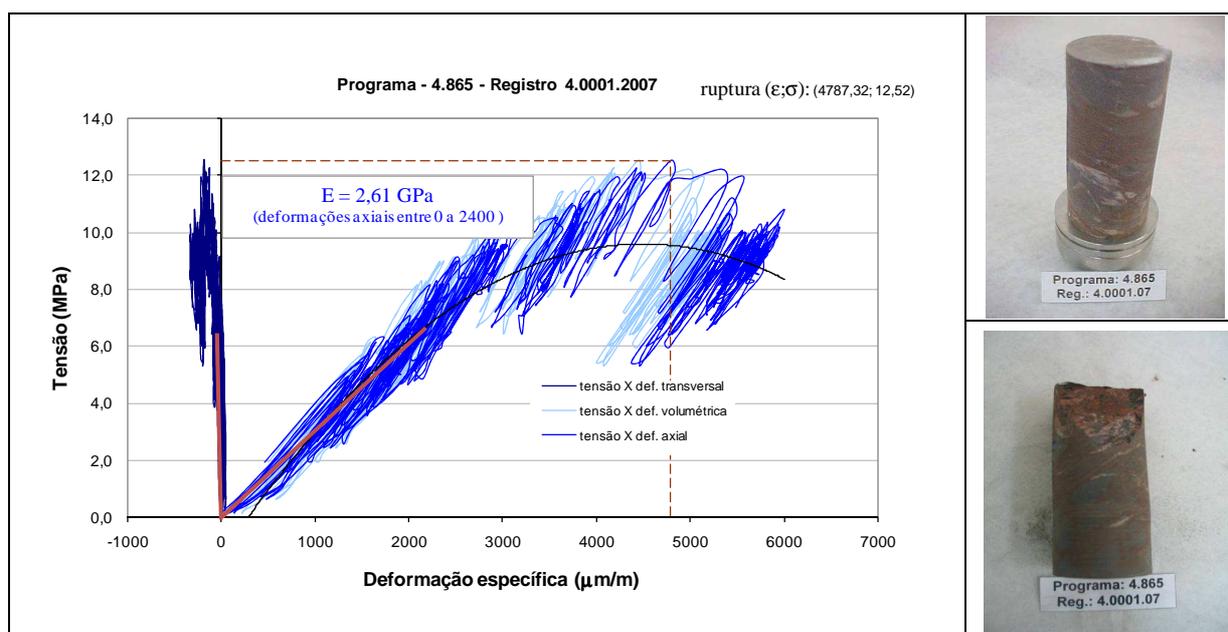


Figura B.4 - Compressão uniaxial, registro 4.0001.2007 – filito-. (Furnas, 2009).

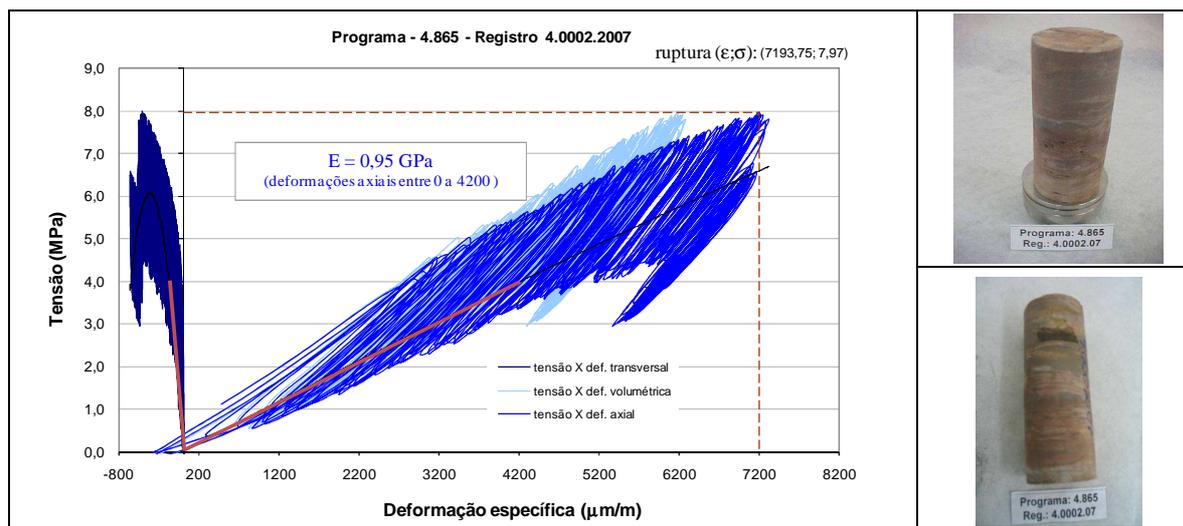


Figura B.5 - Compressão uniaxial, registro 4.0002.2007 – filito-. (Furnas, 2009).

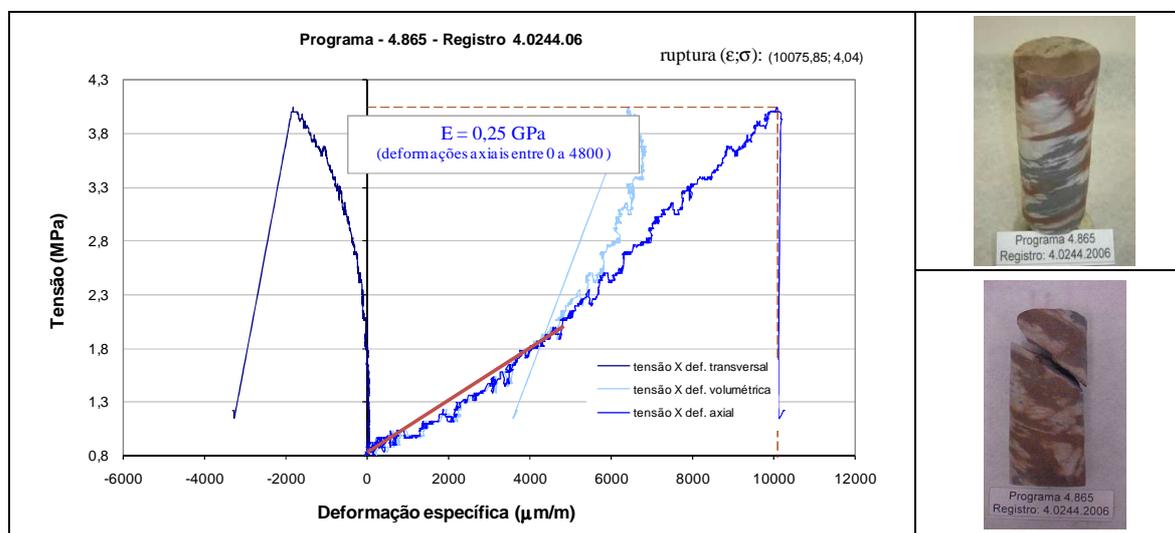


Figura B.6 - Compressão uniaxial, registro 4.0244.06 – filito-. (Furnas, 2009).

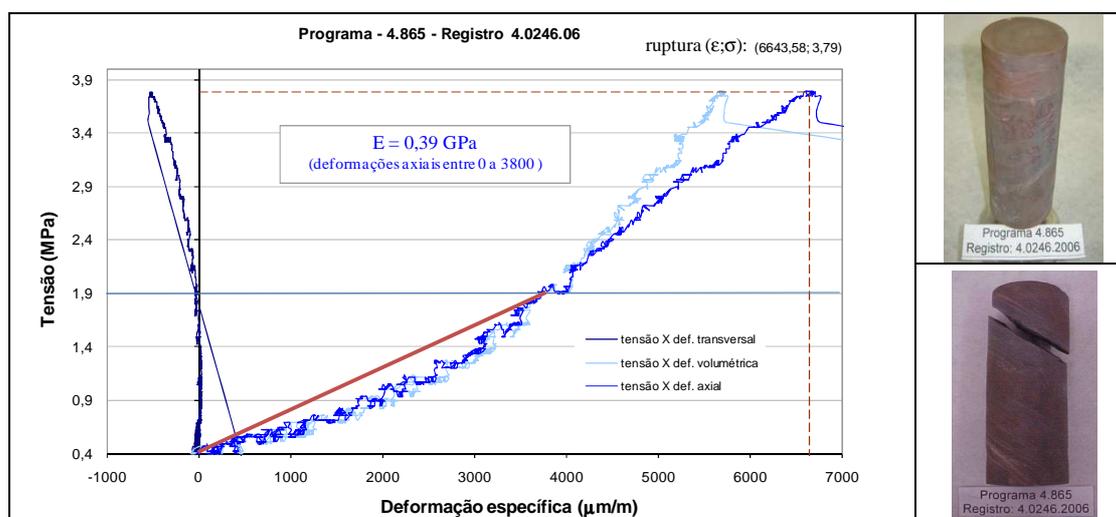


Figura B.7 - Compressão uniaxial, registro 4.0246.06 – filito-. (Furnas, 2009).

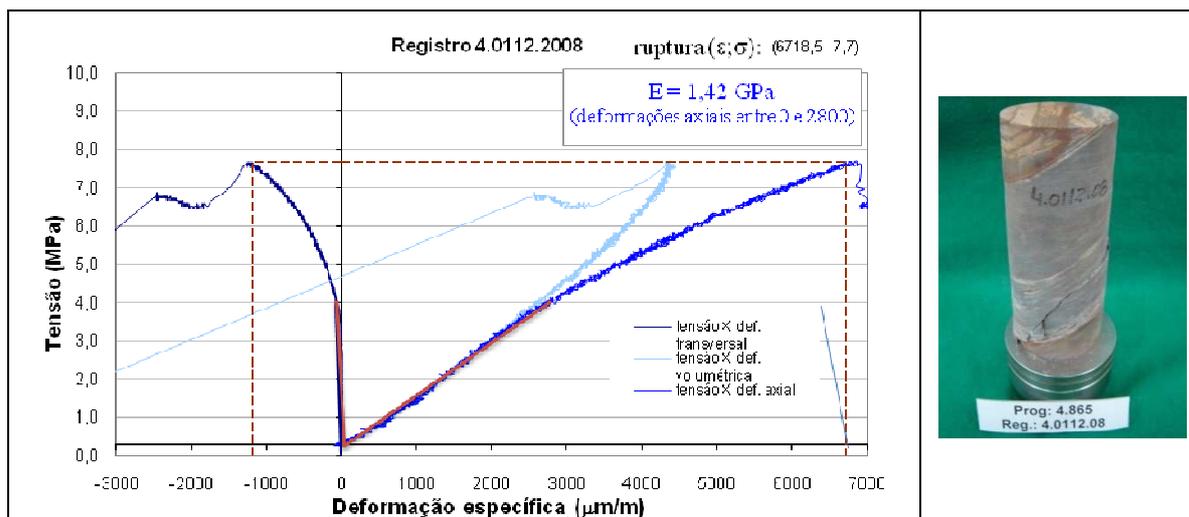


Figura B.8 - Compressão uniaxial, registro 4.0112.2008 – filito-. (Furnas, 2009).

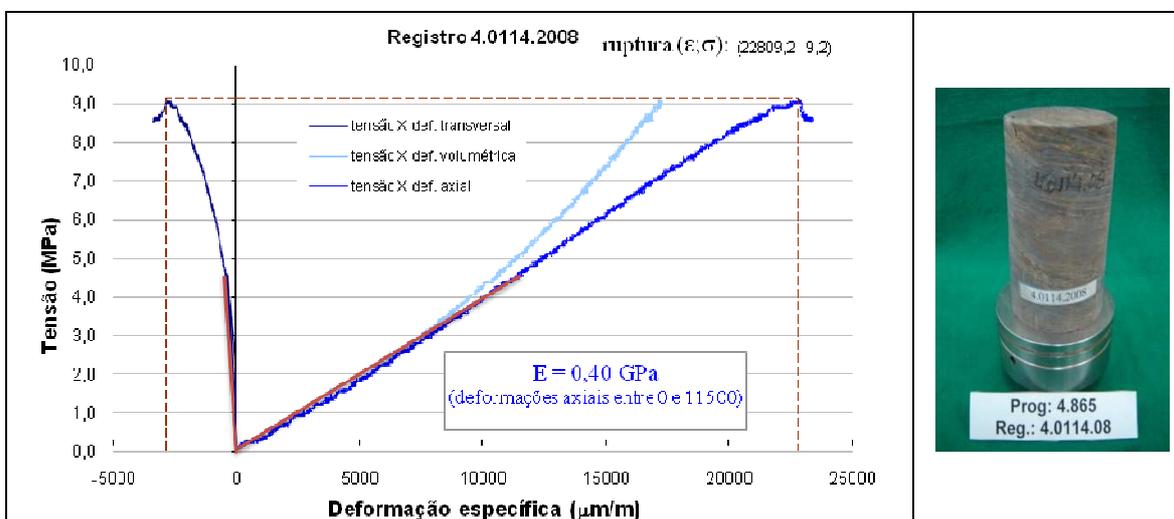


Figura B.9 - Compressão uniaxial, registro 4.0114.2008 – filito-. (Furnas, 2009).

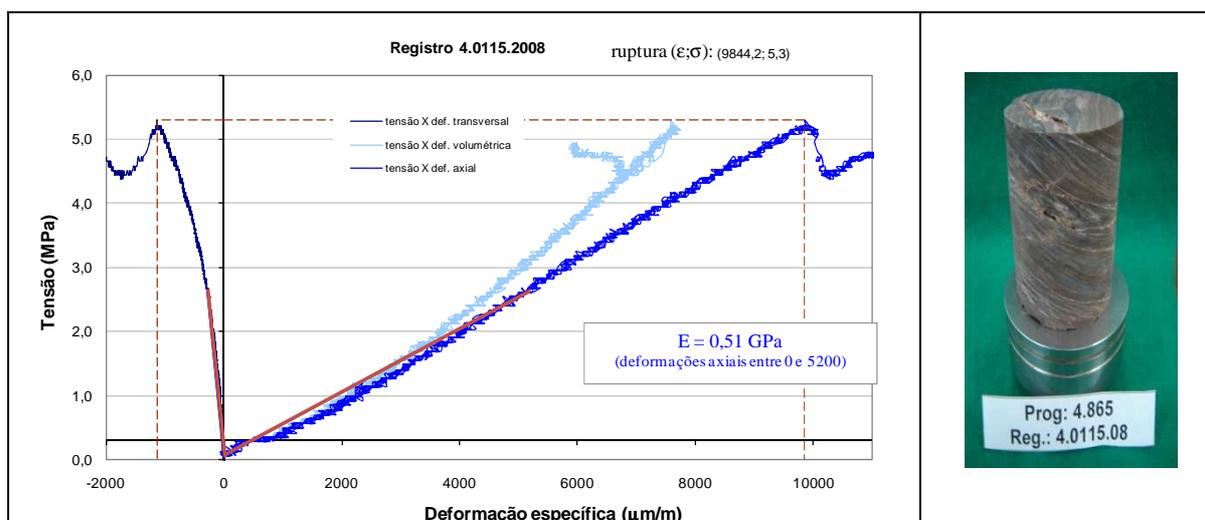


Figura B.10 - Compressão uniaxial, registro 4.0115.2008 – filito-. (Furnas, 2009).

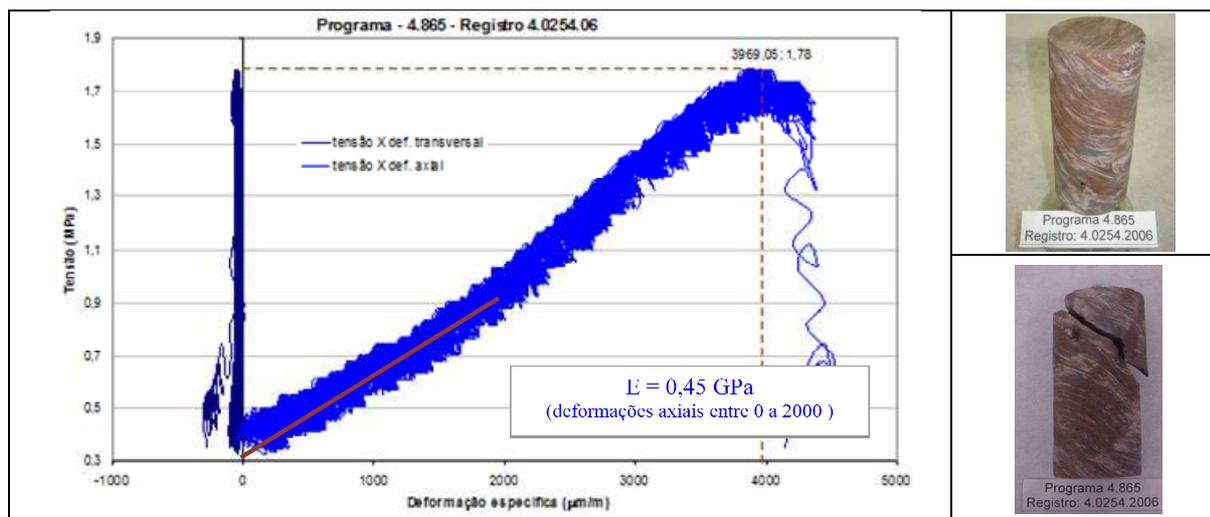


Figura B.11 - Compressão uniaxial, registro 4.0254.06 – filito-. (Furnas, 2009).

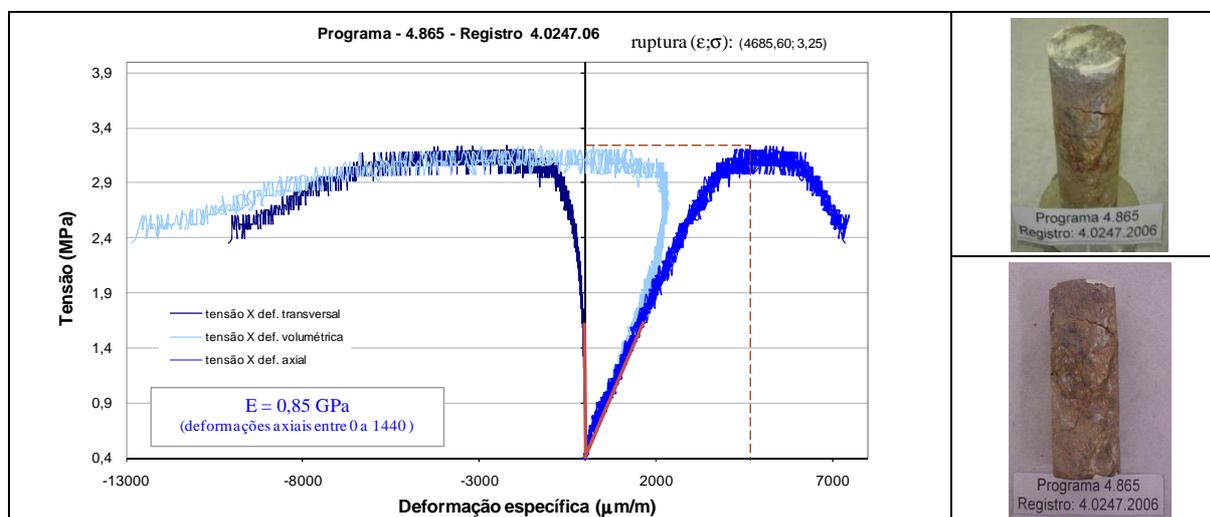


Figura B.12 - Compressão uniaxial, registro 4.0247.06 – filito-. (Furnas, 2009).

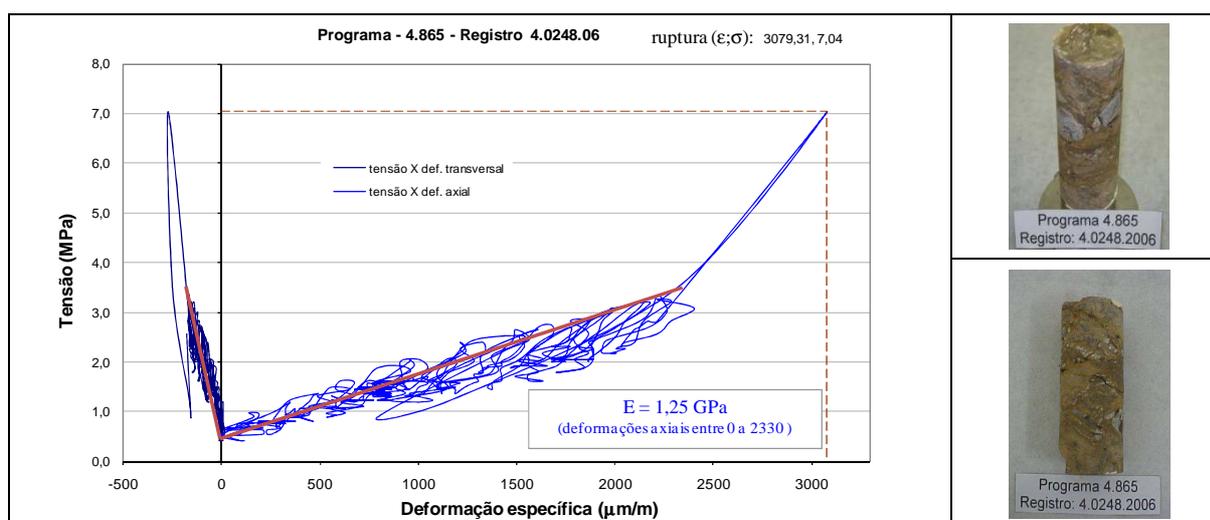


Figura B.13 - Compressão uniaxial, registro 4.0248.06 – filito-. (Furnas, 2009).

Tabela B.14 - Resultado da resistência uniaxial, coeficiente de Poisson e módulo de Young – filito grafitoso-.

Registro Nº	Furo	Prof. (m)	Relação h/f	Coerênc.	Alteraç.	Resistência à compressão (MPa)	Poisson	Módulo de deformabilidade (Gpa)
4.0249.06	SM-113	21,13 a 21,36	2,46	2	1	1,33	0,093	0,53
4.0250.06		22,00 a 22,19	2,46	2	1	6,46	NA	1,01
4.0251.06		25,37 a 25,55	2,46	2	1	2,87	0,016	0,34
4.0252.06		28,04 a 28,18	2,45	2	1	20,67	0,004	1,71
4.0258.06	SM-309	12,38 a 12,58	2,13	2	2	2,91	0,033	0,31
4.0260.06		14,14 a 14,40	2,17	2	2	2,80	0,002	0,21
4.0263.06	SR-307	27,43 a 27,56	2,03	2	2	6,56	0,010	0,99
4.0055.09-01	Amostras obtidas de grandes blocos	Superficial	-	3	3	5,20	0,012	0,42
4.0055.09-02		Superficial	-	3	3	4,10	NA	0,33
4.0055.09-03		Superficial	-	3	3	2,60	0,007	0,23
4.0055.09-04		Superficial	-	3	3	3,50	0,016	0,34
4.0052.09-01		Superficial	-	4	4	0,37	sem instrume ntação	0,02
4.0052.09-02		Superficial	-	4	4	0,21		0,01
4.0052.09-03		Superficial	-	4	4	0,27		0,02

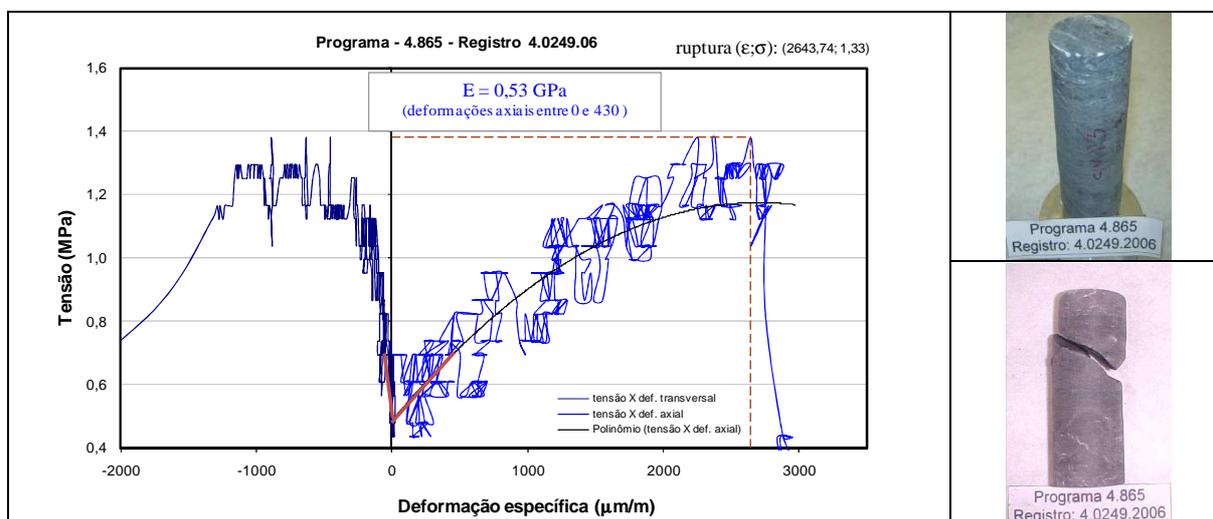


Figura B.14 - Compressão uniaxial, registro 4.0249.06 – filito grafitoso-. (Furnas, 2009).

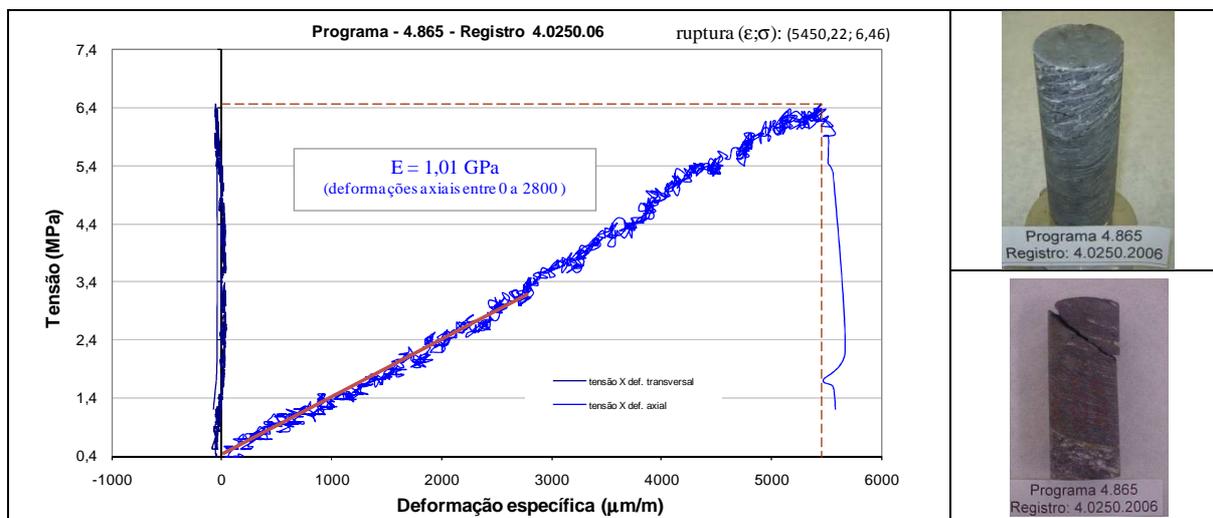


Figura B.15 - Compressão uniaxial, registro 4.0250.06 – filito grafitoso-. (Furnas, 2009).

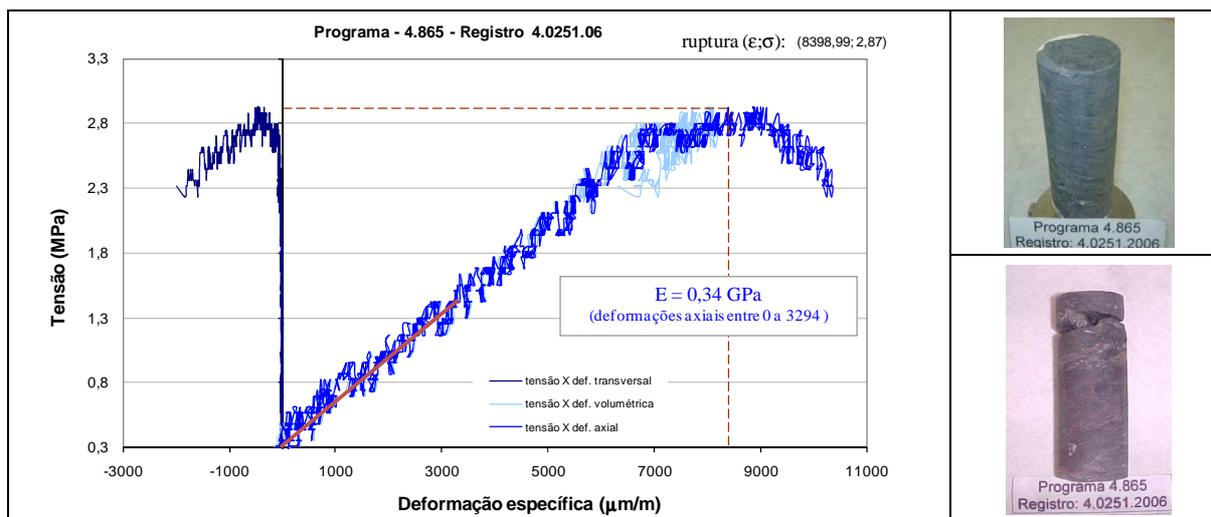


Figura B.16 - Compressão uniaxial, registro 4.0251.06 – filito grafítico-. (Furnas, 2009).

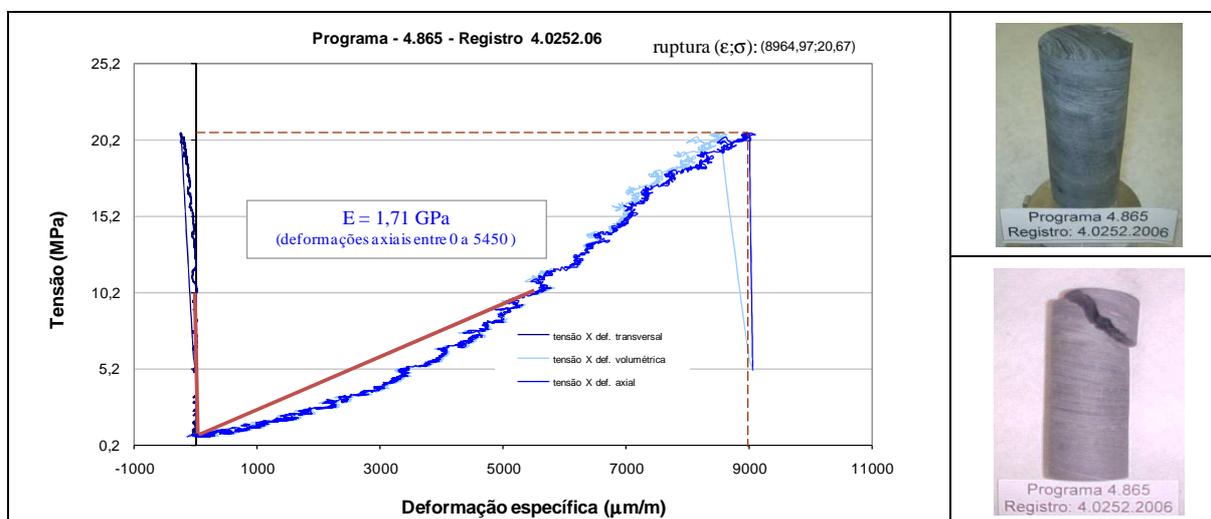


Figura B.17 - Compressão uniaxial, registro 4.0252.06 – filito grafítico-. (Furnas, 2009).

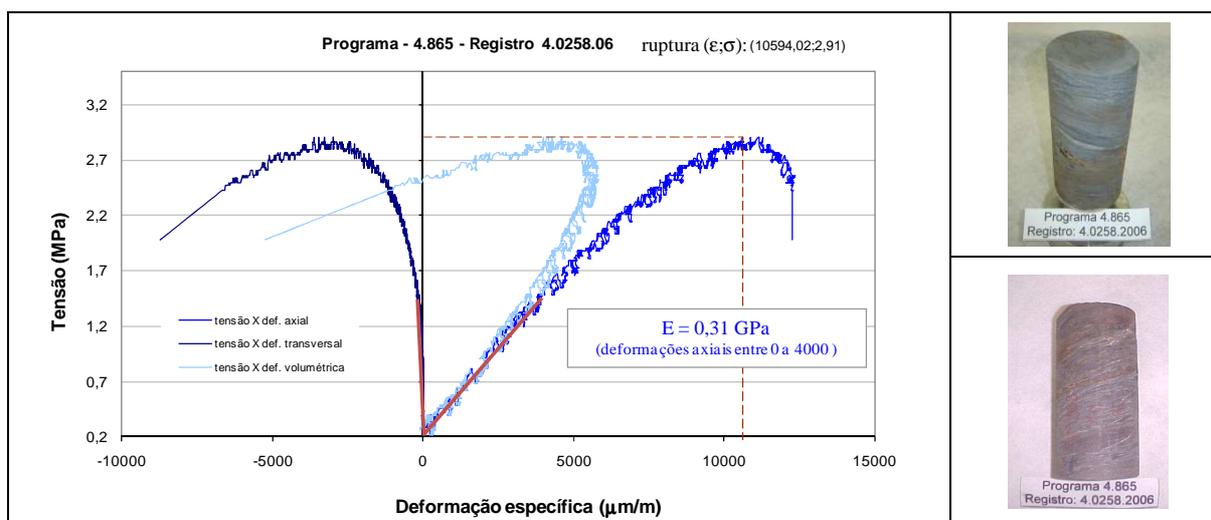


Figura B.18 - Compressão uniaxial, registro 4.0258.06 – filito grafítico-. (Furnas, 2009).

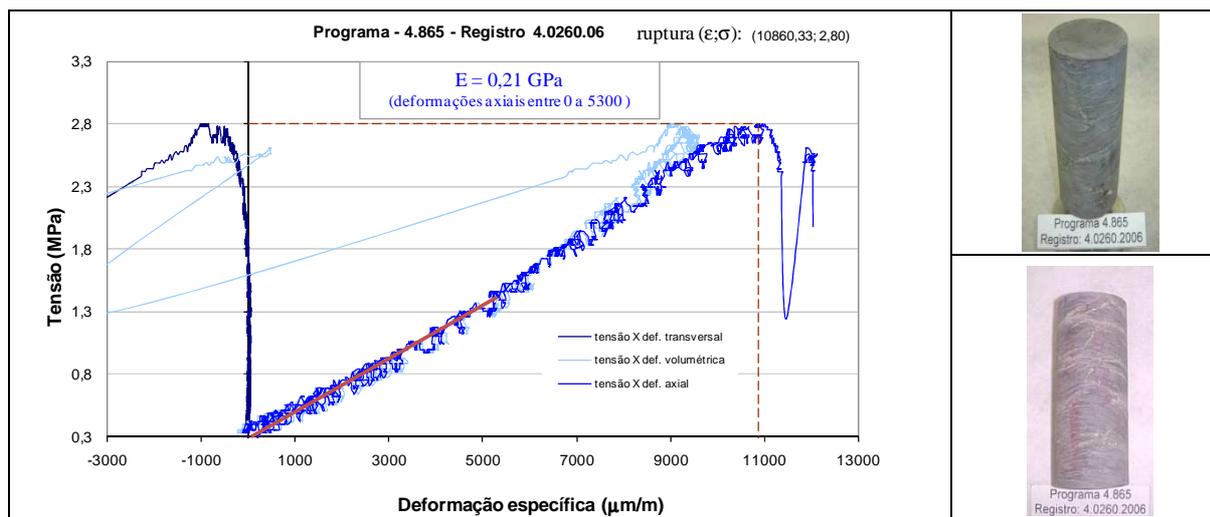


Figura B.19 - Compressão uniaxial, registro 4.0260.06 – filito grafitoso-. (Furnas, 2009).

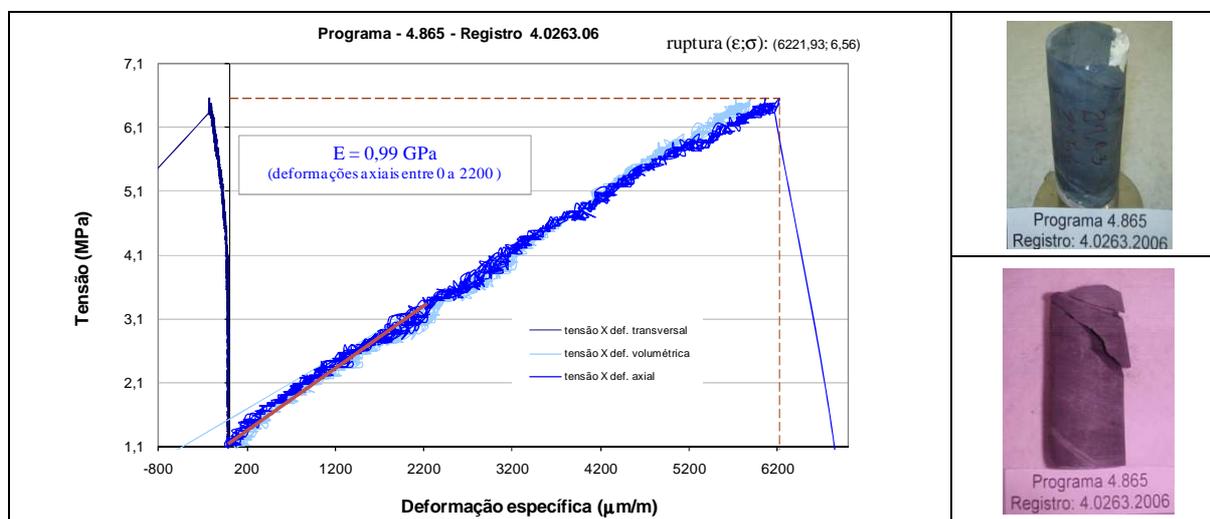


Figura B.20 - Compressão uniaxial, registro 4.0263.06 – filito grafitoso-. (Furnas, 2009).

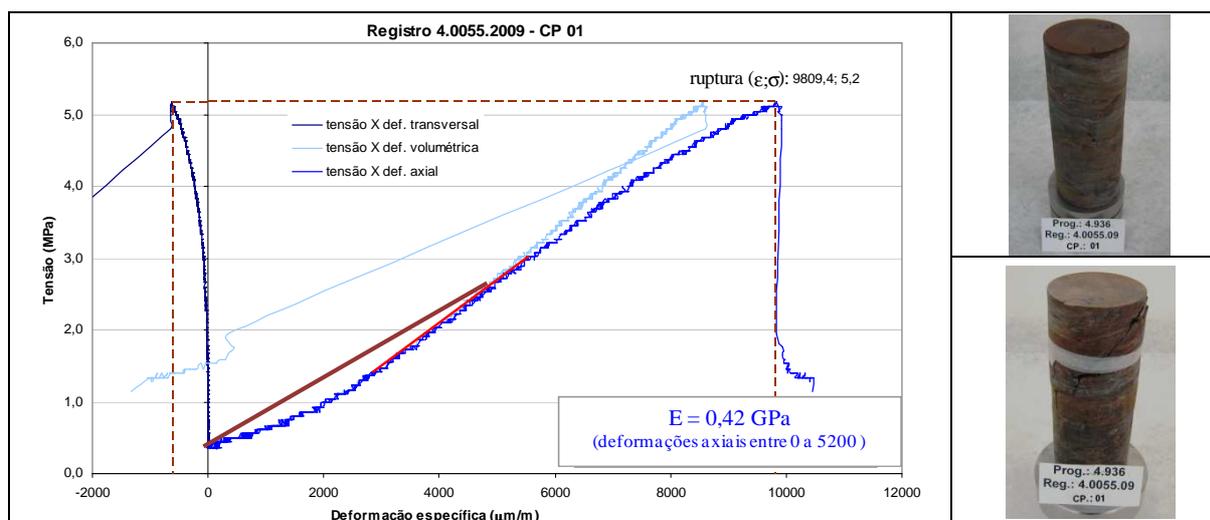


Figura B.21 - Compressão uniaxial, registro 4.0055.09-01 – filito grafitoso-. (Furnas, 2009).

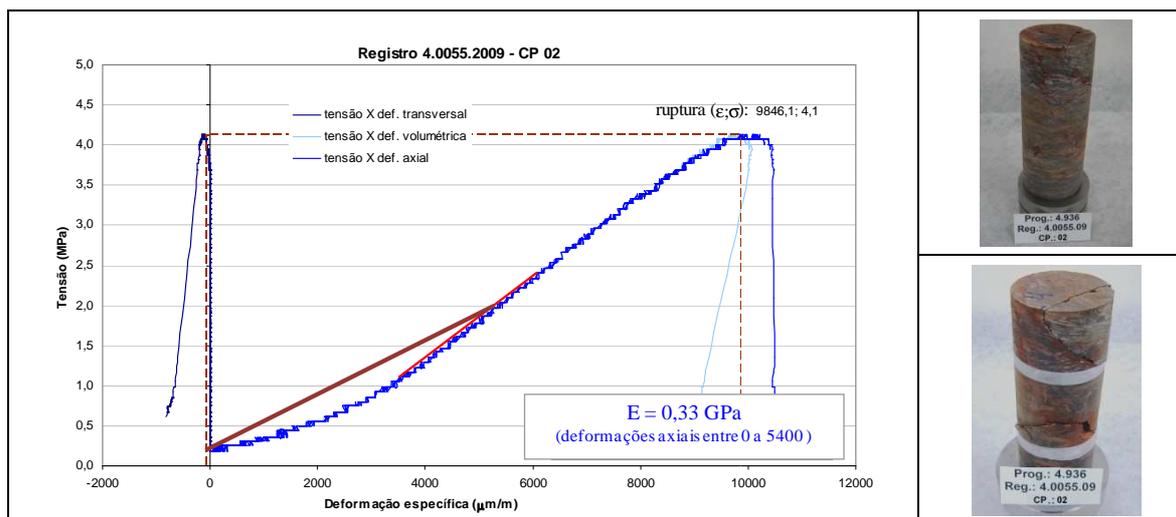


Figura B.22 - Compressão uniaxial, reg. 4.0055.09.02 – filito grafitoso-. (Furnas, 2009).

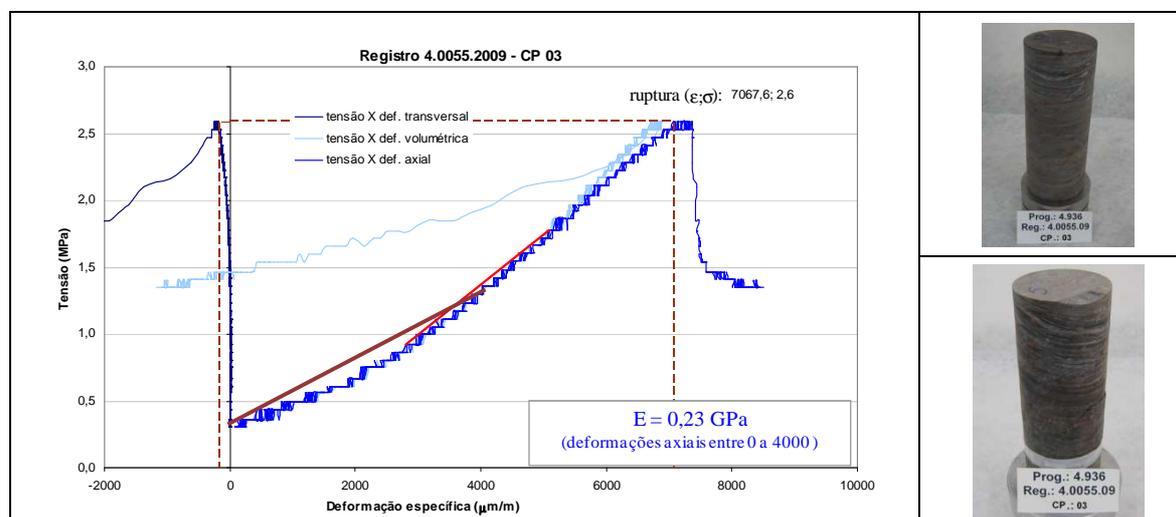


Figura B.23 - Compressão uniaxial, reg. 4.0055.09-03 – filito grafitoso-. (Furnas, 2009).

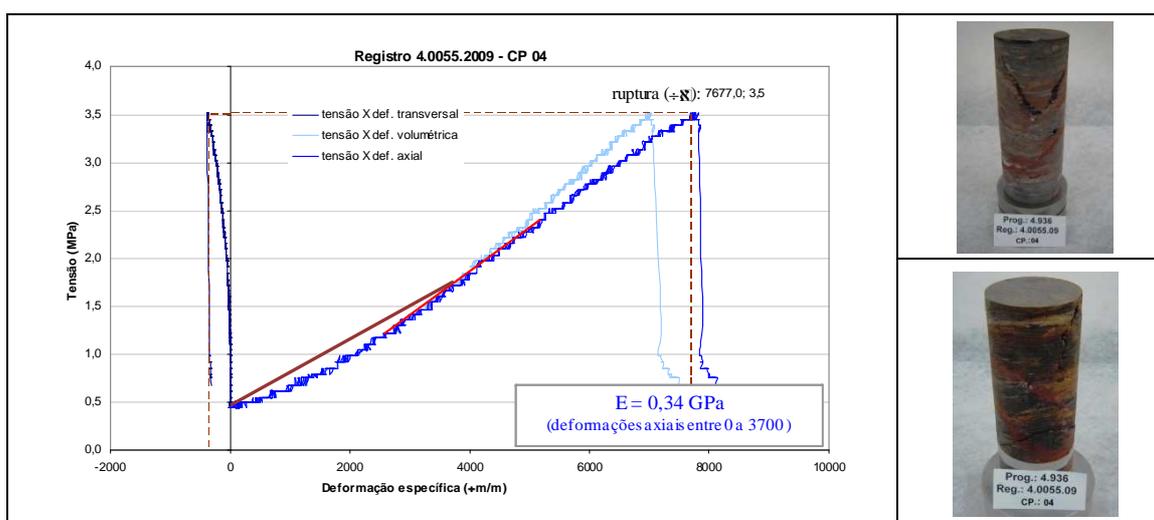


Figura B.24 - Compressão uniaxial, reg. 4.0055.09-04 – filito grafitoso-. (Furnas, 2009).

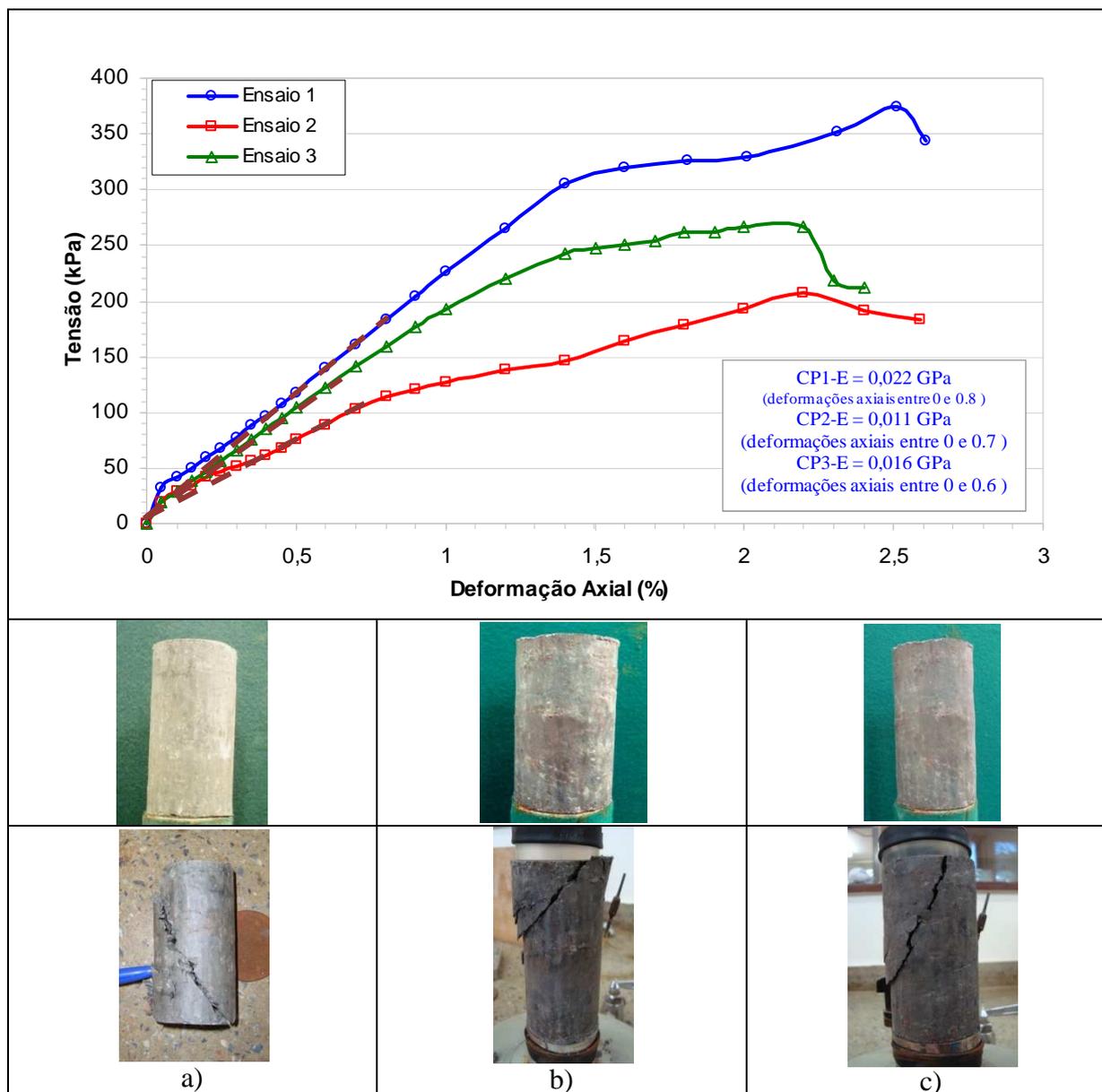


Figura B.25 - Compressão uniaxial – filito grafitoso-. a) Registro 4.0052.09-01; b) Registro 4.0052.09-02; c) Registro 4.0052.09-03. (Furnas, 2009).

Tabela B.15 - Resultado da resistência uniaxial, coeficiente de Poisson e módulo de Young – quartzito-.

Registro Nº	Furo	Prof. (m)	Relação h/f	Coerência	Alteração	Resistência à compressão (MPa)	Poisson	Módulo de deformabilidade (Gpa)
4.0245.06	SR-10	33,40 a 33,60	2,17	1	1	92,81	0,18	34,37
4.0261.06	SM-105	06,17 a 06,43	2,27	4	3	20,05	0,20	0,75
4.0262.06	SM-105	11,03 a 11,21	2,13	1	1	104,71	0,03	31,55

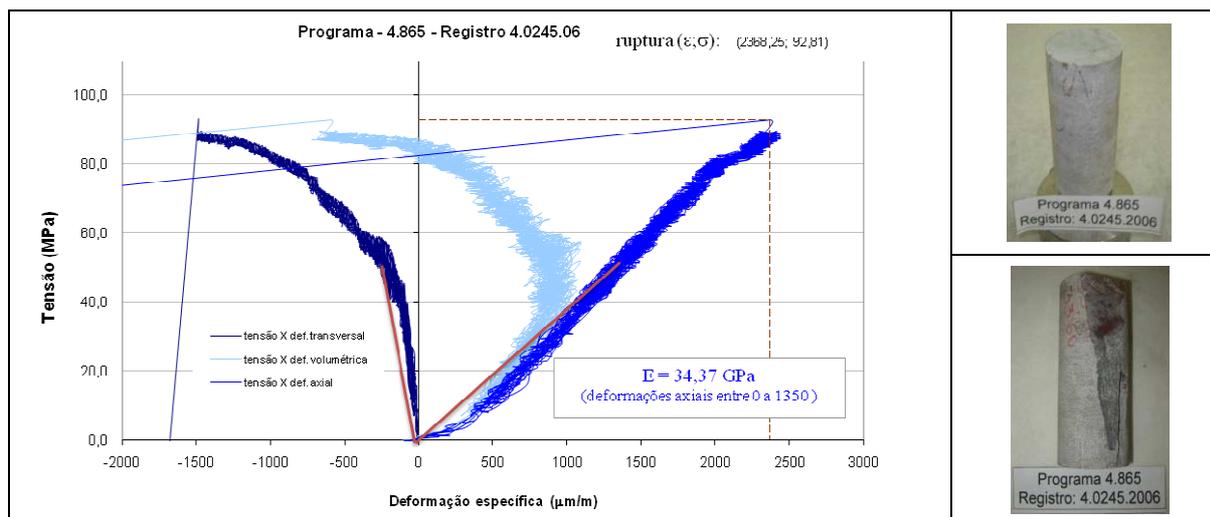


Figura B.26 - Compressão uniaxial, registro 4.0245.06 – quartzito-. (Furnas, 2009).

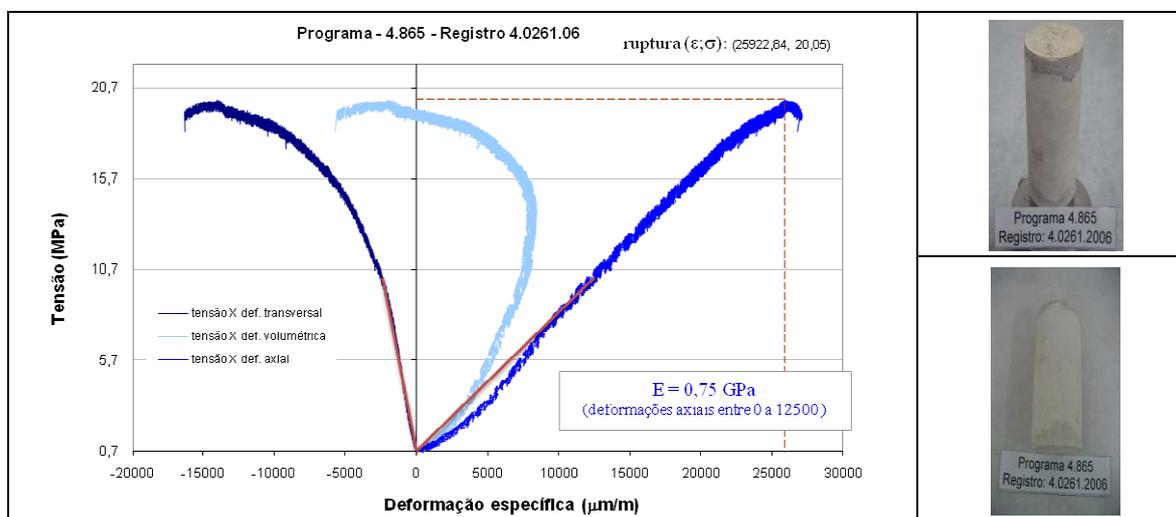


Figura B.27 - Compressão uniaxial, registro 4.0261.06 – quartzito-. (Furnas, 2009).

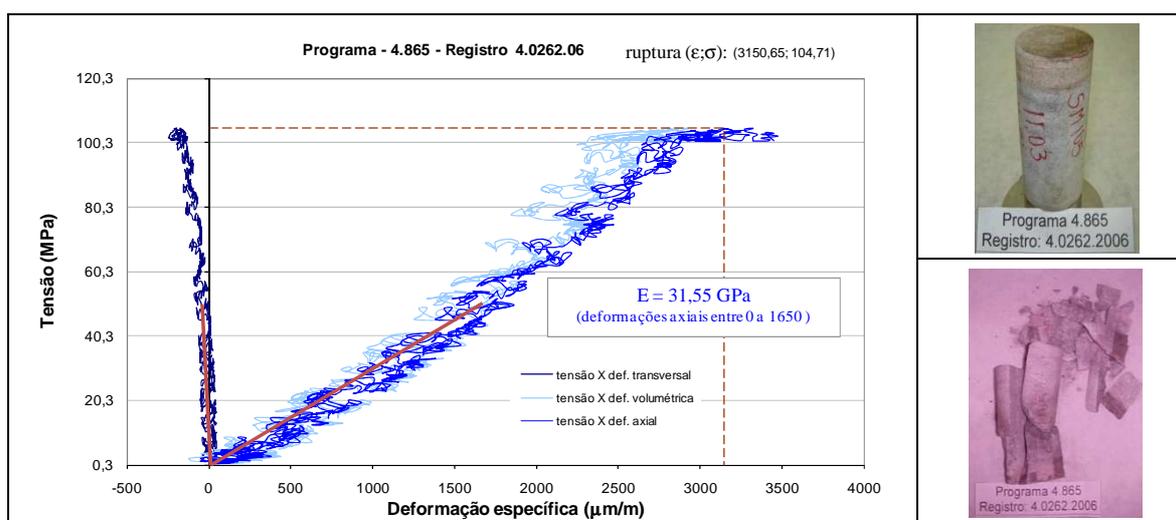


Figura B.28 - Compressão uniaxial, registro 4.0262.06 – quartzito-. (Furnas, 2009).

Tabela B.16 - Resultados da resistência à tração pelo ensaio brasileiro -filito-.

Registro nº	Furo	Prof. (m)	Coerência	Alteração	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)	Força (kN)	Resistência à Tração (MPa)
4.0003.07-a	SM-302	17,16 a 17,35	2	2	36,90	74,21	21,70	5,05*
4.0003.07-b			2	2	40,97	73,83	41,70	8,78*
4.0004.07-a		29,19 a 29,50	2	2	42,61	76,06	20,80	4,09*
4.0004.07-b			2	2	39,97	76,11	45,70	9,56*
4.0005.07		33,70 a 33,98	2	2	37,56	76,11	31,90	7,1*
4.0006.07-a	SM-116	7,29 a 7,44	2	2	34,71	76,05	21,55	5,2*
4.0006.07-b			2	2	39,95	76,05	23,19	4,86*
4.0007.07-a		38,77 a 38,89	1	2	41,84	74,19	44,20	9,07*
4.0007.07-b			1	2	40,74	74,41	21,18	4,45*
4.0008.07		46,56 a 46,71	2	2	44,57	75,45	20,60	3,9*

* Corpos de prova que tiveram ruptura em placas, fator influenciado pela xistosidade estar disposta perpendicularmente ao eixo do testemunho. Os valores apresentados não podem ser considerados como resistência à tração indireta.



Figura B.29 - Registros fotográficos dos corpos de prova ensaiados por compressão diametral - filito-.

Tabela B.17 - Resultados da resistência à tração pelo ensaio brasileiro -filito grafitoso-.

Registro nº	Furo	Profundidade (m)	Coerência	Alteração	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)	Força (kN)	Resistência à Tração (MPa)
4.0009.07	SR-10	24,50 a 24,65	1	1	29,48	57,02	21,7	8,22
4.0010.07-a	SM-113	30,47 a 30,60	2	1	32,69	54,54	21,18	7,56*
4.0010.07-b			2	1	27,32	54,54	44,2	18,89*
4.0010.07-c			2	1	29,84	54,51	41,7	16,32*
4.0011.07-a	SM-309	14,54 a 14,72	2	2	39,86	75,91	23,19	4,88
4.0011.07-b			2	2	45,6	75,76	21,55	3,97
4.0012.07-a	SR-307	33,30 a 33,45	2	2	32,32	53,38	20,6	7,60
4.0012.07-b			2	2	30,39	53,36	20,8	8,17*
4.0260.06	SM-309	14,14 a 14,40	2	2	42,29	75,8	31,9	6,34*

* Corpos de prova que tiveram ruptura em placas, fator influenciado pela xistosidade estar disposta perpendicularmente ao eixo do testemunho. Os valores apresentados não podem ser considerados como resistência à tração indireta.



Figura B.30- Registros fotográficos dos corpos de prova ensaiados por compressão diametral – filito grafitoso-.

Tabela B.18 - Resultados da resistência à tração pelo ensaio brasileiro –quartzito-.

Registro nº	Furo	Prof. (m)	Coerência	Alteração	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)	Força (kN)	Resistência à Tração (MPa)
4.0013.07	SM-105	11,25 a 11,45	1	1	30,23	54,47	41,7	16,12
4.0015.06-a	SR-307	2,50 a 2,65	1	1	41,76	74,88	45,7	9,3
4.0015.07-b			1	1	42,28	74,7	31,9	6,43
4.0015.07-c			1	1	41,13	74,7	21,7	4,5
4.0014.07-a	SM-108	14,70 a 15,00	2	1	36,05	75,78	20,6	4,80*
4.0014.07-b			2	1	39,41	75,78	20,8	4,43*
4.0016.07-a	SM-108	15,81 a 16,20	2	1	30,23	75,78	23,19	6,44
4.0016.07-b			2	1	37,29	75,77	21,55	4,86
4.0016.07-c			2	1	37,29	75,77	21,18	4,77
4.0016.07-d			2	1	36,05	75,77	44,2	10,3

* Os corpos de prova não tiveram a sua ruptura pela geratriz do corpo de prova. Os valores apresentados não podem ser considerados como resistência à tração indireta.

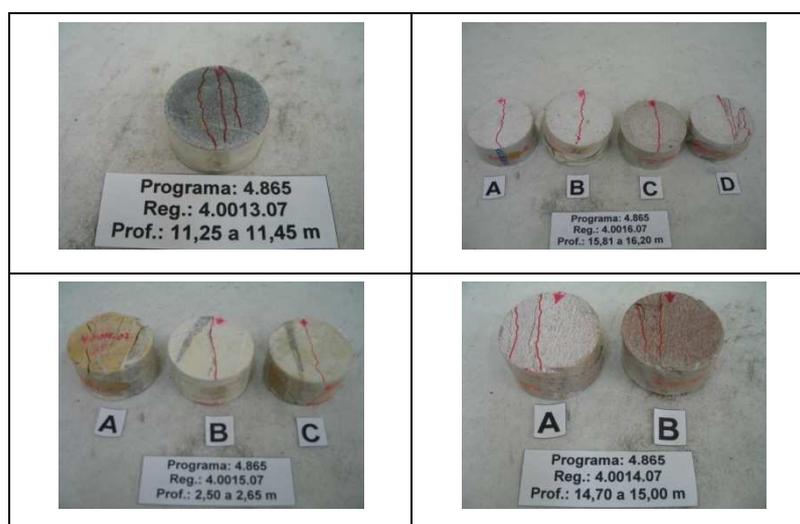


Figura B.31 - Registros fotográficos dos corpos de prova ensaiados por compressão diametral - quartzito-.