



ALTERABILIDADE E COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE ROCHAS NO AHE SIMPLÍCIO

Patrícia Martins Lopes

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Anna Laura Lopes da Silva Nunes

Rio de Janeiro

Março de 2019

ALTERABILIDADE E COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE ROCHAS NO
AHE SIMPLÍCIO

Patrícia Martins Lopes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof.^a Anna Laura Lopes da Silva Nunes, Ph.D.

Prof. Alberto de Sampaio Ferraz Jardim Sayão, Ph.D.

Prof. Marcus Peigas Pacheco, Ph.D.

Prof. Ana Cristina Castro Fontenla Siera, D.Sc.

Prof. Fernando Artur Brasil Danziger, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2019

Lopes, Patrícia Martins

Alterabilidade e comportamento geomecânico de rochas no AHE Simplício / Patrícia Martins Lopes. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XVIII, 163 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadora: Anna Laura Lopes da Silva Nunes.

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 115-123.

1. Alterabilidade. 2. Comportamento mecânico. 3. Resistência à compressão da rocha. 4. Martelo Schmidt. I. Nunes, Anna Laura Lopes da Silva. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*A Deus e a todos que me apoiaram e
incentivaram, em especial à minha
família e amigos.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as oportunidades e por toda a força e coragem que tem me dado para que eu continue a caminhar com fé e perseverança.

À minha família, por todo o apoio que sempre me deram, por toda a fé que depositam em mim, e por serem o meu exemplo de força e o motivo de eu continuar caminhando.

Ao meu namorado, Airam, por todo apoio, força e auxílio durante o período de pesquisas, sem os quais o caminho teria sido mais árduo.

A todos os amigos e colegas do Programa de Engenharia Civil, que durante esses 2 anos acrescentaram ensinamentos e sorrisos em minha vida.

À minha orientadora Anna Laura, por todo apoio e paciência para ensinar, por toda a dedicação destinada a mim e ao meu projeto e pela amizade desenvolvida no período de pesquisa.

Ao Grupo de Pesquisa de Alterabilidade da PUC-Rio e COPPE-UFRJ, sem o qual esta pesquisa não seria possível.

Aos membros da banca, professores Alberto de Sampaio Ferras Jardim Sayão, Marcus Peigas Pacheco, Ana Cristina Castro Fontenla e Fernando Artur Brasil Danziger pela avaliação do trabalho.

Ao corpo docente da COPPE, por todo o conhecimento e aprendizado a mim transmitido.

Ao CNPq, pela concessão de bolsa de mestrado, sem a qual a realização desta etapa em minha vida não seria possível.

À Empresa Furnas Centrais Elétricas S.A. pela disponibilização de informação e material do empreendimento da Barragem de Simplício.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ALTERABILIDADE E COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE ROCHAS NO AHE SIMPLÍCIO

Patrícia Martins Lopes

Março/2019

Orientadora: Anna Laura Lopes da Silva Nunes

Programa: Engenharia Civil

A alteração de rochas e juntas provoca modificações em suas propriedades, causando a redução de resistência do maciço rochoso, e conseqüentemente a redução da segurança das obras de engenharia. O processo de alteração introduz diversas modificações do material, alterando seu comportamento geomecânico, originalmente previsto para fins de engenharia. A previsão do comportamento das rochas ao longo do tempo é de grande importância para que sejam realizados planos de manutenção e, até mesmo, reforço do material rochoso. Esta pesquisa apresenta os estudos realizados sobre a variação do comportamento mecânico das juntas rochosas dos maciços de gnaiss que compõem o circuito hidráulico do Aproveitamento Hidrelétrico Simplício, em função de sua alteração. Foram realizados ensaios de Martelo Schmidt em campo e em laboratório, sendo ensaiadas rochas e juntas inalteradas e alteradas. Os ensaios com Martelo Schmidt mostraram resultados satisfatórios e confirmaram as vantagens de uso, tais como rapidez, facilidade de execução e custos reduzidos. Além disso, o ensaio com martelo tem grande versatilidade de aplicação em amostras diversas, com restrições mínimas de área, volume e qualidade da superfície. A análise dos ensaios realizados e a comparação com resultados de investigações de laboratório de outras pesquisas no mesmo material de Simplício possibilitaram o desenvolvimento de relações empíricas de previsão de comportamento do material em função da resistência à compressão, do rebote do martelo e do tempo de alteração.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ALTERABILITY AND GEOMECHANICAL BEHAVIOR OF ROCKS AT AHE
SIMPLÍCIO

Patrícia Martins Lopes

March/2019

Advisor: Anna Laura Lopes da Silva Nunes

Department: Civil Engineering

The alteration of rocks and joints causes changes in their properties, causing a strength reduction of rock masses, and consequently the reduction of the safety of engineering works. The alteration process introduces a series of material modifications, changing its geomechanical behavior, originally intended for engineering purposes. The prediction of the behavior of rocks over time is of great importance in order to carry out plans for maintenance and even reinforcement of rock material. This research presents the studies carried out on the variation of the mechanical behavior of rocks joints of the gneiss masses that compose the hydraulic circuit of the AHE Simplício according to the alteration of these rocks. The hammer tests were carried out in the field and laboratory, where were tested unaltered and altered rocks and joints. The Schmidt Hammer tests showed satisfactory results and confirmed the advantages of use, such as speed, ease of execution and reduces costs. In addition, the hammer test shows great versatility of application in various samples, with minimum restrictions of area, volume and surface quality. The analysis of the tests carried out and the comparison with the results of laboratory investigations of other researches in the same material of Simplício allowed the development of empirical relations of prediction of behavior of the material as a function of the compressive strength, the rebound of the hammer and the time of alteration.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO DO TRABALHO.....	3
1.2 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS.....	3
CAPÍTULO 2	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 ROCHAS, DESCONTINUIDADES E SOLO	5
2.1.1 Rochas	5
2.1.2 Descontinuidades	8
2.1.3 Solo.....	9
2.1.4 Classificação das rochas.....	11
2.2 ALTERAÇÃO DE ROCHAS.....	14
2.2.1 Alteração e alterabilidade de rochas.....	15
2.2.2 Efeitos da alteração	20
2.2.3 Ensaios para avaliação da alteração	22
2.2.4 Avaliação da alteração	24
2.3 MARTELO SCHMIDT	26
2.3.1 Correlações.....	30
CAPÍTULO 3	34
3. ÁREA DE ESTUDO.....	34
3.1 LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO GERAL.....	34
3.2 GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA	38
3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS ESTUDADOS	41
3.3.1 Solo residual e estruturas reliquias.....	42
3.3.2 Gnaisse Simplício.....	45
3.4 ESTUDOS E ENSAIOS REALIZADOS	50
3.4.1 Ensaios realizados por MACHADO (2012).....	50
3.4.2 Ensaios realizados por SALLES (2013).....	53
3.4.3 Ensaios realizados por OLIVEIRA (2017)	64
3.4.4 Ensaios realizados por STEFFENS (2018)	74
CAPÍTULO 4	83

4.	METODOLOGIA	83
4.1	CLASSIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS	84
4.2	ENSAIOS COM MARTELO SCHMIDT	87
4.2.1	Ensaio em campo	88
4.2.2	Ensaio em laboratório	88
	CAPÍTULO 5	91
5.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	91
5.1	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	91
5.2	ENSAIOS COM MARTELO SCHMIDT REALIZADOS EM CAMPO	93
5.3	ENSAIOS COM MARTELO SCHMIDT REALIZADOS EM LABORATÓRIO	94
5.3.1	Comparação com as correlações entre rebote e resistência da literatura 101	
5.4	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS OBTIDOS COM OLIVEIRA (2017) E STEFFENS (2018)	105
	CAPÍTULO 6	112
6.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	112
6.1	CONCLUSÕES	112
6.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	114
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
	APÊNDICE I – FICHAS DE CLASSIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS	124

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Rocha ígnea – maciço de basalto com fraturas (NUNES, 2009).....	6
Figura 2.2 - Rocha sedimentar com acamamentos – Gran Canyon, EUA (NUNES, 2009).	7
Figura 2.3 – Rocha metamórfica – afloramento de gnaiss no AHE Simplício.....	7
Figura 2.4 – Descontinuidades em maciço de gnaiss – Costa Brava, RJ.	8
Figura 2.5 – Talude escavado em solo residual de gnaiss – AHE Simplício (Acervo de D. L. Machado).....	10
Figura 2.6 – Esquema de textura (a) clástica e (b) cristalina (NUNES, 2009).....	12
Figura 2.7 – Textura das rochas em função do tamanho dos grãos: (a) fanerítica, (b) afanítica, (c) fanerítica porfirítica e (d) afanítica porfirítica. (NUNES, 2009).....	13
Figura 2.8 – Tipos de degradação em função da temperatura e da precipitação (PELTIER, 1950; MAIA, 2001).	17
Figura 2.9 – Ordem de alteração química das rochas (MAIA, 2001).	20
Figura 2.10 – Classificação dos ensaios para avaliação da degradação (SALLES, 2013).	23
Figura 2.11 – Equipamento soxhlet convencional para ensaios de lixiviação contínua (MAIA, 2001).....	24
Figura 2.12 - Realização de ensaio com Martelo ou Esclerômetro Schmidt.....	27
Figura 2.13 – Esquema simplificado de funcionamento do Martelo Schmidt (OLIVEIRA, 2017).....	28
Figura 2.14 – Ábaco de correlação entre o valor de rebote (R) e a resistência à compressão da rocha (DEERE & MILLER, 1966; HOEK E BRAY, 1981).	31
Figura 3.1- Mapa do AHE-Simplício e vias de acesso (MARCHESI, 2008).	34
Figura 3.2 - Cartas fotogramétricas das obras de interligação entre a PCH Anta e a UHE Simplício (SALLES, 2013).	36
Figura 3.3- Arranjo geral – Obras de Interligação do AHE Simplício (adaptado de MACHADO, 2012).	37
Figura 3.4 - Localização da Faixa Ribeira em Planta e Corte (MARCHESI, 2008).....	39
Figura 3.5 - Alinhamento topográfico marcante da Zona de Cisalhamento do Rio Paraíba do Sul entre os municípios de Além Paraíba e Sapucaia (MARCHESI, 2008).	39
Figura 3.6 – Mapa geológico do Alinhamento de Além Paraíba (MARCHESI, 2008). 40	

Figura 3.7 – Geometria do talude de escavação do desemboque do túnel 5A (MACHADO, 2012).	43
Figura 3.8 - Seção transversal da escavação do desemboque do túnel 5A (MACHADO, 2012).	43
Figura 3.9 – Traços das estruturas reliquiarias na face do talude (MACHADO, 2012).	44
Figura 3.10 – Estrutura reliquiaria com material preto na superfície (MACHADO, 2012).	44
Figura 3.11 – Estruturas reliquiarias: (a) elevação 303,30 (b) elevação 299,25 (MACHADO, 2012).	44
Figura 3.12 – Testemunho recuperado do furo de sondagem SR – 657: Profundidade de 0,00 a 8,82m (SALLES, 2013).	46
Figura 3.13 – Testemunho recuperado do furo de sondagem SR – 657: Profundidade de 8,82 a 15,96m (SALLES, 2013).	47
Figura 3.14 – Testemunho recuperado do furo de sondagem SR – 657: Profundidade de 15,96 a 23,22m (SALLES, 2013).	47
Figura 3.15 – Testemunho recuperado do furo de sondagem SR – 657: Profundidade de 23,22 a 30,59m (SALLES, 2013).	48
Figura 3.16 – Recipientes utilizados para o armazenamento das amostras coletadas em Simplício.	49
Figura 3.17 – Superfícies das juntas rochosas em função do tempo de alteração (SALLES, 2013).	55
Figura 3.18 – Resultado típico do ensaio de compressão diametral (SALLES, 2013).	57
Figura 3.19 – Resistência à tração vs. tempo de alteração em laboratório (SALLES, 2013).	59
Figura 3.20 – Curvas tensão axial vs. deformação axial, lateral e volumétrica representativas do nível intacto e com 8300h de alteração em laboratório (SALLES, 2013).	60
Figura 3.21 – Valores médios dos parâmetros de tensão axial em função do nível de alteração no laboratório (SALLES, 2013).	62
Figura 3.22 – Valores médios dos módulos de Young em função do nível de alteração no laboratório (SALLES, 2013).	62
Figura 3.23 – Valores médios dos coeficientes de Poisson em função do nível de alteração no laboratório (SALLES, 2013).	63

Figura 3.24 – Martelo Schmidt HT225 (OLIVEIRA, 2017).....	65
Figura 3.25 – Ábaco de correlação entre o rebote e a resistência à compressão para o Martelo Schmidt HT225 (OLIVEIRA, 2017).	66
Figura 3.26 – Sistema de fixação da amostra com morsa: (a) medição do rebote das juntas com o martelo na horizontal e (b) medição do rebote da rocha intacta com o martelo na vertical (OLIVEIRA, 2017).....	66
Figura 3.27 – Juntas típicas classificadas em alteradas (a, b, c) e inalteradas (d, e, f) (OLIVEIRA, 2017).....	67
Figura 3.28 – Lateral das amostras classificadas em alteradas (a, b) e inalteradas (c) (OLIVEIRA, 2017).....	68
Figura 3.29 – Adaptação do ábaco de correlação disponibilizado pelo fabricante do martelo, com as fórmulas aproximadas para as posições horizontal (juntas) e vertical (rocha intacta) do martelo (OLIVEIRA, 2017).	68
Figura 3.30 – Distribuição das médias de resistência à compressão obtidas para as juntas e para a rocha intacta em função do estado de alteração da amostra (OLIVEIRA, 2017).	71
Figura 3.31 – Curvas das correlações entre rebote e resistência à compressão com limites inferior e superior (OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2018).....	73
Figura 3.32 – Curvas médias obtidas para junta e rocha intacta alteradas e inalteradas com relação proposta para o Gnaisse Simplício (OLIVEIRA, 2017).	73
Figura 3.33 – Equipamento de cisalhamento direto (STEFFENS, 2018).	76
Figura 3.34 – Sistema de aplicação de carga (STEFFENS, 2018).....	76
Figura 3.35 – Contato da junta após encapsulamento em moldes de gesso (STEFFENS, 2018).....	77
Figura 3.36 – Curvas tensão cisalhante vs. deslocamento horizontal – Junta 0h-2 (STEFFENS, 2018).	78
Figura 3.37 – Envoltória de resistência – Junta 0h-2 (STEFFENS, 2018).....	78
Figura 3.38 – Valores de rebote em função do grau de alteração das juntas (STEFFENS, 2018).....	80
Figura 3.39 – Correlações entre rebote e resistência à compressão – Amostra sem alteração artificial (0h) (STEFFENS, 2018).....	81
Figura 3.40 – Correlações entre rebote e resistência à compressão – Amostra com 4800h de alteração (STEFFENS, 2018).	81

Figura 3.41 – Resistência à compressão determinados em laboratório, CP e por Martelo Schmidt, J (STEFFENS, 2018).	82
Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia deste trabalho.	83
Figura 4.2 – Conjunto de amostras selecionadas para classificação.	85
Figura 4.3 – Comparação da dimensão entre uma amostra pequena (B1-P03) e uma amostra grande (B4-P11).	86
Figura 4.4 – Comparação entre o grau de alteração de amostras classificadas como: (a) rocha inalterada, (b) rocha levemente alterada, (c) e (d) rocha moderadamente alterada.	87
Figura 4.5 – Realização do ensaio de Martelo Schmidt em campo.	88
Figura 4.6 – Realização do ensaio de Martelo Schmidt.	89
Figura 4.7 – Amostras rompidas durante o ensaio devido ao aperto da morsa.	90
Figura 4.8 – Amostras rompidas durante o ensaio devido à alteração.	90
Figura 5.1 - Distribuição dos valores de rebote obtidos nos ensaios de Martelo Schmidt em amostras pequenas em função dos graus de alteração A, B e C.	95
Figura 5.2 - Distribuição dos valores de rebote obtidos nos ensaios de Martelo Schmidt em amostras grandes em função dos graus de alteração A, B e C.	95
Figura 5.3 - Distribuição dos valores de rebote obtidos nos ensaios de Martelo Schmidt.	96
Figura 5.4 – Correlações entre resistência à compressão e rebote conforme DEERE & MILLER (1966) e fabricante do Martelo HT225 - Amostras pequenas.	100
Figura 5.5 – Correlações entre resistência à compressão e rebote conforme DEERE & MILLER (1966) e fabricante do Martelo HT225 - Amostras grandes.	100
Figura 5.6 – Correlações entre rebote e resistência à compressão uniaxial - Amostras pequenas.	102
Figura 5.7 – Curvas de correlações entre rebote e resistência à compressão uniaxial para amostras grandes.	102
Figura 5.8 – Curvas de correlações entre rebote e resistência à compressão uniaxial compreendidas entre os limites inferior e superior para amostras pequenas.	104
Figura 5.9 – Curvas de correlações entre rebote e resistência à compressão uniaxial compreendidas entre os limites inferior e superior para amostras grandes.	104

Figura 5.10 - Proposta de equação para a previsão do comportamento do gnaisse da região de Simplício em função da variação da resistência à compressão e do valor de rebote.	107
Figura 5.11 – Curva de variação do índice de alteração em função do tempo de lixiviação em laboratório.....	109
Figura 5.12 – Proposta de equação para a previsão da variação do rebote do gnaisse de Simplício em função do tempo de lixiviação em laboratório.....	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação do grau de alteração das rochas (OLIVEIRA, 2017).	13
Tabela 2.2 - Comparação da Série de Goldich (estabilidade dos minerais) com a série de cristalização de Bowen (TEIXEIRA <i>et al.</i> , 2000).	19
Tabela 2.3 - Correlações entre o rebote do martelo Schmidt e a resistência à compressão uniaxial e o módulo de elasticidade.....	32
Tabela 3.1 – Resumo das obras de interligação (MACHADO, 2012).	38
Tabela 3.2 - Tipos e características gerais das unidades litológicas encontradas na área de empreendimento AHE Simplício (adaptado de VIANA, 2012).	41
Tabela 3.3 – Identificação, localização e nível de alteração dos testemunhos de sondagem (SALLES, 2013).	46
Tabela 3.4 – Valores de RQD para a sondagem SR-657 (SALLES, 2013).	48
Tabela 3.5 – Resumo dos parâmetros de resistência do solo residual de gnaiss (adaptado de MACHADO, 2012).	52
Tabela 3.6 – Minerais essenciais, acessórios e secundários presentes na rocha em diferentes níveis de alteração (SALLES, 2013).	56
Tabela 3.7 – Resultados dos ensaios de absorção em corpos de prova cilíndricos do Gnaiss Simplício para diferentes níveis de alteração (SALLES, 2013).	56
Tabela 3.8 – Valores médios da resistência à tração referente à fratura primária (\square_{FP}) e secundária (\square_{FS}) em diferentes níveis de alteração (SALLES, 2013).	58
Tabela 3.9 – Resistência à compressão das amostras e valores médios em função do nível de alteração (SALLES, 2013).	60
Tabela 3.10 – Valores dos índices de alteração em função do tempo de alteração (SALLES, 2013).	64
Tabela 3.11 – Valores médios de rebote e resistência à compressão para as juntas em função do grau de alteração (OLIVEIRA, 2017).	69
Tabela 3.12 – Valores médios de rebote e resistência à compressão para a rocha intacta em função do grau de alteração (OLIVEIRA, 2017).	70
Tabela 3.13 – Classificação do grau de alteração das juntas (STEFFENS, 2018).	75
Tabela 3.14 – Classificação do grau de alteração das juntas (STEFFENS, 2018).	79
Tabela 4.1 – Descrição do número de amostras retiradas de cada bombona.	84
Tabela 5.1 – Classificação do grau de alteração das amostras pequenas.	92

Tabela 5.2 – Classificação do grau de alteração das amostras grandes.....	93
Tabela 5.3 – Distribuição do número de amostras por nível de alteração.....	93
Tabela 5.4 – Valores de rebote obtidos nos ensaios de campo.....	94
Tabela 5.5 - Valores médios de rebote calculados para as amostras pequenas.....	97
Tabela 5.6 - Valores médios de rebote calculados para as amostras grandes.	98
Tabela 5.7 - Valores médios rebote por classe de alteração.....	99
Tabela 5.8 – Resultados dos ensaios de rebote em campo e laboratório comparados com resultados de OLIVEIRA (2017) e STEFFENS (2018).	105
Tabela 5.9 – Valores de resistência à compressão conforme DEERE & MILLER (1966).	106
Tabela 5.10 – Índices de alteração do rebote em função do nível e tipo de alteração das amostras.....	108
Tabela 5.11 - Proposta de previsão de comportamento do material ao longo do tempo.	110

LISTA DE ABREVIÇÕES E SÍMBOLOS

Abreviações:

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHE	Aproveitamento Hidrelétrico
ASTM	<i>American Society for Testing Material</i>
BR040	Rodovia Federal Radial do Brasil – sentido sudeste
BR116	Rodovia Federal Longitudinal do Brasil – CE/RS
BR393	Rodovia Federal Diagonal do Brasil – RJ/ES
CCR	Concreto Compactado a Rolo
CE	Estado do Ceará
CP ('s)	Corpo(s) de Prova
ES	Estado do Espírito Santo
FP	Fratura primária
FS	Fratura secundária
ISRM	<i>International Society for Rock Mechanics</i>
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MG	Estado de Minas Gerais
NBR	Norma Brasileira
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
RJ	Estado do Rio de Janeiro
RQD	<i>Rock Quality Designation</i>
UHE	Usina Hidrelétrica

Símbolos:

ε	Deformação
G	Densidade real dos grãos
IA	Índice de alteração da absorção
$I_{\sigma_{FP}}$	Índice de alteração da resistência à tração na fratura primária
$I_{\sigma_{FS}}$	Índice de alteração da resistência à tração na fratura secundária

$I\sigma_C$	Índice de alteração da resistência à compressão na ruptura
$I\sigma_{RI}$	Índice de alteração da tensão axial final da região I
$I\sigma_{ID}$	Índice de alteração da tensão axial no início da dilatância
IE_S	Índice de alteração do módulo de Young secante
IE_T	Índice de alteração do módulo de Young tangente
IV_S	Índice de alteração do coeficiente de Poisson secante
IV_T	Índice de alteração do coeficiente de Poisson tangente
M_S	Massa Seca
σ_{FP}	Resistência à tração na fratura primária
σ_{FS}	Resistência à tração na fratura secundária
σ_C	Resistência à compressão uniaxial

Unidades de medida:

$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius
h	Hora
s	Segundo
mm	Milímetro
cm	Centímetro
m	Metro
km	Quilômetro
m^3/s	Metro cúbico por segundo
l	Litro
kgf	Quilograma-força
N	Newton
Pa	Pascal
MPa	Megapascal
W	Watt
g/cm^3	Grama por centímetro cúbico

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

O comportamento dos maciços rochosos vem sendo amplamente estudado ao longo das últimas décadas devido não apenas a grande utilização das rochas nas obras de engenharia, mas também a grandes acidentes, como as rupturas das barragens de *Malpasset* (1959) na França e de *Vajont* (1963) na Itália, provocadas principalmente pela falta de conhecimento por parte das equipes técnicas, de algumas propriedades dos maciços e suas descontinuidades.

Todavia pouca atenção tem sido dada à variação da qualidade mecânica da rocha em função dos processos de intemperismos físico e químico, os quais resultam em um processo de alteração natural do maciço rochoso ao longo do tempo. A importância dos estudos de alterabilidade reside na maior compreensão dos processos de alteração e suas consequências no comportamento geomecânico das rochas, visando a sua previsão ao longo do tempo.

A alteração é resultado de um processo geológico que ocorre em função da exposição das rochas aos agentes de intemperismo. Esta exposição provoca modificações físicas e químicas nas propriedades das rochas, que pode levar ao enfraquecimento do maciço devido ao surgimento de fissuras, à alteração dos minerais e à redução da resistência do material (GUIDICINI & NIEBLE, 1983; TEIXEIRA *et al.*, 2000; MAIA, 2001; MAIA *et al.*, 2002 e 2003; PRESS *et al.*, 2006).

A alteração das rochas provoca quatro efeitos principais em seu comportamento: diminuição da resistência, aumento da deformabilidade, aumento da porosidade e diminuição da coesão entre os minerais do material rochoso (FARJALLAT *et al.*, 1972). O processo de alteração reduz as resistências à compressão e à tração da rocha, além da resistência ao cisalhamento das descontinuidades presentes nos maciços (BARTON, 1973; MAIA, 2001).

Neste contexto, é de grande importância para as obras de engenharia a avaliação da alteração das rochas e suas descontinuidades. Além disso, é importante que sejam realizados estudos sobre o comportamento dos solos residuais, que são os produtos da alteração das rochas, pois estes tendem a manter as características da rocha mãe, as quais podem influenciar seu comportamento, como é o caso das estruturas reliquias.

Esta pesquisa procura estudar o comportamento mecânico das rochas em função de sua alteração, e assim, estabelecer correlações empíricas que possibilitem prever o comportamento do material ao longo do tempo.

As amostras selecionadas para esta pesquisa foram retiradas da área do Aproveitamento Hidrelétrico Simplício (AHE Simplício), que se localiza na divisa entre os estados do Rio de Janeiro e de Minas Gerais. Durante as obras de escavações dos canais e túneis do empreendimento, rupturas condicionadas pelas estruturas geológicas ocorreram nos taludes dos canais. Para entender o comportamento do maciço em diferentes níveis de alteração e, especialmente, o mecanismo de ruptura dos taludes de Simplício foram realizados diversos estudos pelo Grupo de Pesquisa de Alterabilidade da PUC-Rio e COPPE-UFRJ. Dentre as pesquisas realizadas pelo grupo destacam-se os trabalhos de MAIA (2001), MAIA *et al.* (2002, 2003) realizados nos maciços das barragens de Marimbondo e Serra da Mesa e as pesquisas desenvolvidas nos maciços do AHE Simplício por MACHADO (2012), SALLES (2013), OLIVEIRA (2017), OLIVEIRA *et al.* (2018), STEFFENS (2018) e a presente pesquisa.

O primeiro estudo realizado com o material de Simplício foi o de MACHADO (2012), que buscou caracterizar as estruturas reliquias do solo residual de gnaiss ao longo das escavações do Canal 5. O comportamento geomecânico do solo condicionado por suas estruturas reliquias foi determinado por meio de ensaios físicos e mecânicos e do mapeamento das estruturas reliquias.

SALLES (2013) buscou avaliar a alterabilidade do gnaiss da região de Simplício por meio de ensaios de alteração acelerada realizados em um equipamento de percolação, por ela desenvolvido. Esse equipamento permitiu que fosse simulado o efeito do fluxo de água ao longo dos canais e túneis do circuito hidráulico, para diferentes tempos de percolação. Para cada tempo utilizado no ensaio (0h, 600h, 1200h, 2400h, 4800h, 6000h, 8300h), ocorreu um nível distinto de alteração da rocha, que foi analisado por meio de ensaios laboratoriais e de índices de qualidade.

OLIVEIRA (2017) desenvolveu uma proposta para a caracterização de juntas naturalmente alteradas, utilizando os testemunhos recuperados das sondagens feitas em Simplício. Para isso, a resistência à compressão das juntas foi determinada a partir de ensaios com o Martelo Schmidt.

Por fim, STEFFENS (2018) avaliou o comportamento mecânico de juntas alteradas em diferentes níveis por meio dos ensaios de alteração acelerada no

equipamento de percolação, utilizando ensaios de cisalhamento direto e de Martelo Schmidt.

1.1 OBJETIVO DO TRABALHO

O principal objetivo desta pesquisa é estabelecer correlações empíricas que permitam uma previsão de comportamento para os maciços rochosos do AHE Simplício ao longo do tempo, levando-se em consideração o processo de alteração sofrido pelo gnaiss local.

Para isso, foram realizados ensaios de Martelo Schmidt, a fim de avaliar a resistência à compressão do gnaiss proveniente da área dos canais e que foi alterado naturalmente ao longo dos últimos 10 anos. Além disso, foi feita a compilação e análise dos resultados obtidos nas pesquisas anteriores (MACHADO, 2012; SALLES, 2013; OLIVEIRA, 2017; STEFFENS, 2018), visando auxiliar na previsão de comportamento do material.

Sendo assim, os objetivos específicos para desenvolvimento desta pesquisa são:

- i. Compilação dos resultados obtidos nas pesquisas anteriores, realizadas com o material do AHE Simplício;
- ii. Seleção e caracterização das amostras de bloco retiradas do AHE Simplício durante a fase de escavação;
- iii. Realização dos ensaios de Martelo Schmidt e análise dos resultados;
- iv. Análise conjunta dos resultados obtidos nesta pesquisa e nas pesquisas anteriores;
- v. Desenvolvimento das relações empíricas em função do grau e do tempo de alteração das amostras;
- vi. Proposta de relação empírica para a previsão do comportamento dos maciços ao longo do tempo.

1.2 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

Esta dissertação está dividida em seis capítulos e um apêndice. Este primeiro capítulo é uma contextualização da pesquisa, onde são comentados a importância do estudo, objetivos e o escopo da dissertação.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão das principais referências relacionadas ao tema da pesquisa. São abordados neste capítulo temas como rochas, juntas e solos residuais; alteração de rochas, suas implicações e os mecanismos de alteração; além de reportar os ensaios que auxiliam na avaliação da alterabilidade e os métodos de avaliação da alteração da rocha e do seu comportamento mecânico.

O Capítulo 3 traz uma breve descrição da área de estudo, onde foram retiradas as amostras utilizadas nos ensaios de MACHADO (2012), SALLES (2013), OLIVEIRA (2017), STEFFENS (2018) e na presente pesquisa. Neste capítulo é apresentada uma descrição do arranjo geral da obra, bem como um resumo dos aspectos geológicos e geotécnicos do local. Também é apresentada uma compilação dos dados obtidos em cada uma das pesquisas citadas.

O Capítulo 4 descreve a metodologia utilizada na compilação de dados, na seleção e classificação das amostras ensaiadas, e nos ensaios realizados com Martelo Schmidt.

No Capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios com Martelo Schmidt, a comparação destes resultados com os das demais pesquisas, as correlações de comportamento encontradas, e as correlações para a previsão do comportamento dos materiais que constituem os canais e túneis do AHE Simplício.

O Capítulo 6 apresenta as principais conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

O documento conta ainda com um apêndice, no qual são apresentadas as fichas de caracterização de cada amostra.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A pesquisa desenvolvida busca responder a uma questão levantada durante as escavações dos canais e túneis do circuito de adução do Aproveitamento Hidrelétrico Simplício, sobre a alteração das rochas que compõem os maciços. Ao longo das obras, rupturas bastante similares ocorreram nos taludes escavados, sendo observado que a alteração das rochas e juntas, poderia ter contribuído para as rupturas. Decidiu-se então, investigar a alterabilidade das rochas do AHE Simplício e os efeitos da alteração nas propriedades da rocha. Foram realizados alguns estudos que tratam da alteração dos materiais rochosos de Simplício e por meio desse conjunto de resultados e dos resultados obtidos no presente estudo, buscou-se prever a alterabilidade e o comportamento destes materiais.

Este capítulo apresenta uma breve revisão das principais bibliografias nacionais e internacionais, que tratam sobre alteração e alterabilidade de rochas, e sobre ensaios com martelo Schmidt, com o intuito de contextualizar o tema da pesquisa.

Além disso, para uma melhor compreensão dos conceitos ligados à alteração das rochas, faz-se necessária a apresentação de um breve resumo sobre rochas, descontinuidades, solos e classificação das rochas quanto a sua estrutura.

2.1 ROCHAS, DESCONTINUIDADES E SOLO

2.1.1 Rochas

Rocha é um aglomerado de diferentes minerais e/ou matéria orgânica, que se forma naturalmente e faz parte da crosta terrestre. A formação das rochas e a aglomeração de seus minerais obedece a leis físicas e químicas, que em conjunto com o modo com que as rochas se formam, separam-nas em três grandes grupos: magmáticas, sedimentares e metamórficas (MACIEL FILHO, 1997).

As rochas magmáticas ou ígneas (Figura 2.1) são as que apresentam melhor comportamento mecânico e maior homogeneidade. São resultado da consolidação do magma, que é o material gerado no interior da crosta terrestre a altas temperaturas. Quando o magma chega à superfície terrestre, ocorre o fenômeno conhecido como

vulcanismo e o material passa a se chamar lava. A solidificação do magma no interior da crosta terrestre dá origem às rochas plutônicas ou intrusivas (grandes profundidades) e às rochas hipoabissais (médias profundidades). Já a consolidação das lavas dá origem a rochas vulcânicas ou extrusivas. As rochas intrusivas são formadas por processos lentos de resfriamento, o que resulta em um material mais cristalino, com granulação mais grossa e formas definidas, como o granito e o gabro. As rochas hipoabissais são formadas a velocidades intermediárias de resfriamento, resultando em materiais de granulação média, como o diabásio. As rochas extrusivas são formadas por processos mais rápidos de resfriamento, o que gera rochas com granulações mais finas, como os basaltos e os riolitos (MACIEL FILHO, 1997; FRAZÃO, 2012; SALLES, 2013).



Figura 2.1 – Rocha ígnea – maciço de basalto com fraturas (NUNES, 2009).

As rochas sedimentares (Figura 2.2) são aquelas formadas pela consolidação de um material solto. São divididas em clásticas (ou detríticas) e químicas. As rochas clásticas, como os arenitos, siltitos e argilitos, são formadas por fragmentos de outras rochas, que se depositam em um local e são consolidadas por pressão de sobrecarga exercida pelas camadas superiores e/ou por cimentação. As rochas químicas são formadas a partir da combinação e precipitação de íons dissolvidos na água, que formam substâncias geralmente cristalinas, como as rochas calcárias e os dolomitos (MACIEL FILHO, 1997; FRAZÃO, 2012).

As rochas metamórficas (Figura 2.3) são formadas a partir de alterações mineralógicas, químicas e estruturais que ocorrem em rochas preexistentes, ainda em

estado sólido, devido ao aumento da pressão e da temperatura do meio. Essas alterações resultam na recristalização dos minerais preexistentes e na formação de novos, modificando a estrutura e a textura das rochas. Alguns exemplos deste tipo de rocha são os gnaisses, mármore e quartzitos (MACIEL FILHO, 1997; SALLES, 2013).



Figura 2.2 - Rocha sedimentar com acamamentos – Gran Canyon, EUA (NUNES, 2009).



Figura 2.3 – Rocha metamórfica – afloramento de gnaiss no AHE Simplício.

2.1.2 Descontinuidades

Maciço rochoso é um conjunto de materiais e estruturas, com comportamento governado pelas propriedades da rocha intacta, das descontinuidades existentes, dos blocos discretos presentes na estrutura ou ainda das propriedades do conjunto, além de outros fatores como tensões *in situ* e pressão de água (BRADY & BROWN, 2005; OLIVEIRA, 2017).

Segundo a NBR 6502 (1993), descontinuidades são todas as estruturas que interrompem a continuidade física do maciço rochoso, tais como falhas geológicas, sistemas de juntas, planos de acamamento, xistosidade e foliação (Figura 2.4). A presença de descontinuidades no maciço define zonas de fraqueza e concentração de tensões, além de frentes de intemperismo (VALLEJO *et al.*, 2002).

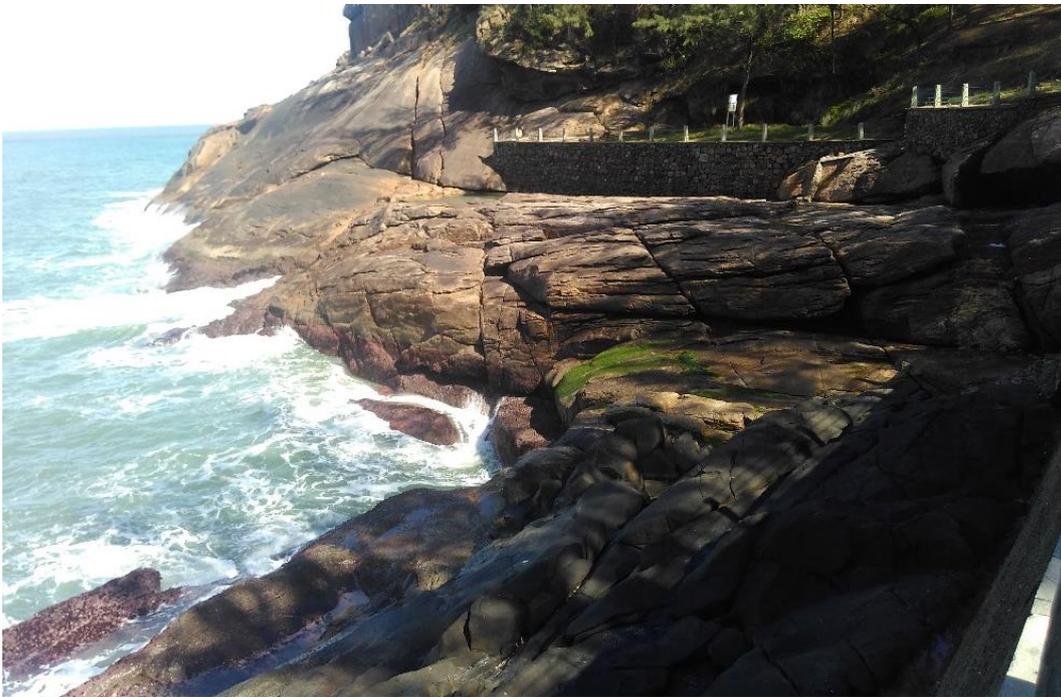


Figura 2.4 – Descontinuidades em maciço de gnáisse – Costa Brava, RJ.

O termo junta rochosa é utilizado para descrever descontinuidades mecânicas de origem geológica, que atravessam a superfície dos maciços rochosos (BARTON & CHOUBEY, 1977). As juntas são descontinuidades ao longo das quais não ocorreu deslocamento significativo e que, em geral, interceptam superfícies primárias como acamamentos, clivagem e xistosidades. Elas são importantes, pois exercem influência no comportamento mecânico do maciço.

As descontinuidades podem conter material de preenchimento entre suas paredes, fazendo com que o comportamento da descontinuidade seja governado pelas propriedades físicas e mecânicas do material de preenchimento. O comportamento de descontinuidades sem material de preenchimento é função do nível de tensão atuante na descontinuidade, das propriedades das paredes das juntas e sua rugosidade, do tipo de rocha e seu grau de intemperismo (STEFFENS, 2018).

As propriedades mecânicas que determinam o comportamento das descontinuidades são representadas por sua resistência ao cisalhamento e compressão uniaxial. O estado de tensões em campo é o que determina o comportamento mecânico global e as deformações dos maciços rochosos (VALLEJO *et al.*, 2002).

Rugosidade é o termo utilizado para denominar as irregularidades da superfície das juntas em escala de laboratório (centimétricas), enquanto ondulação se refere à escala de campo (métrica). A escala da rugosidade influencia no comportamento da junta ao ser cisalhada, pois superfícies em contato que possuem ondulação sofrem dilatação durante o cisalhamento. No caso das irregularidades de pequena escala pode ocorrer dilatação quando apresentam alta resistência ou baixos níveis de tensão, ou, em caso contrário, as irregularidades sofrem desgaste (ISRM, 1978).

A rugosidade da superfície de uma junta depende da origem e da mineralogia da rocha matriz (BARTON, 1973). A influência da rugosidade das descontinuidades em sua resistência ao cisalhamento diminui conforme a resistência da rugosidade diminui ou a velocidade do cisalhamento aumenta. A variação de volume que ocorre durante o cisalhamento de uma junta mostra a importância da rugosidade na transição entre dilatação e redução de volume (ROKO *et al.*, 1997).

O tipo de rocha pode indicar se a rocha é mais ou menos resistente e estável. Além disso, o tipo de rocha também pode indicar o grau de suscetibilidade à alteração. A alteração das rochas e das juntas modifica suas propriedades e seu comportamento mecânico em geral para pior, ou seja, contra a segurança das obras de engenharia.

2.1.3 Solo

O intemperismo de rochas reduz a forte ligação que existe entre os minerais, modificando a resistência da rocha e tornando-a desagregável. De acordo com a NBR 6502, quando a rocha sofre desagregação e/ou decomposição devido à ação de agentes

físicos e químicos, o material resultante deste processo de intemperismo é o solo (Figura 2.5).

A formação dos solos residuais e dos solos sedimentares se dá por processos distintos de transporte. Os solos residuais são aqueles que permanecem no local de origem da rocha, enquanto o segundo é transportado e depositado em outro local. Os fatores que mais influenciam na formação dos solos sedimentares são a formação, o transporte e a deposição do sedimento, com ação predominante do intemperismo físico. Já nos solos residuais, a ação do intemperismo químico é o principal fator de influência, sendo este controlado pelo clima, tipo de rocha, drenagem, entre outros.

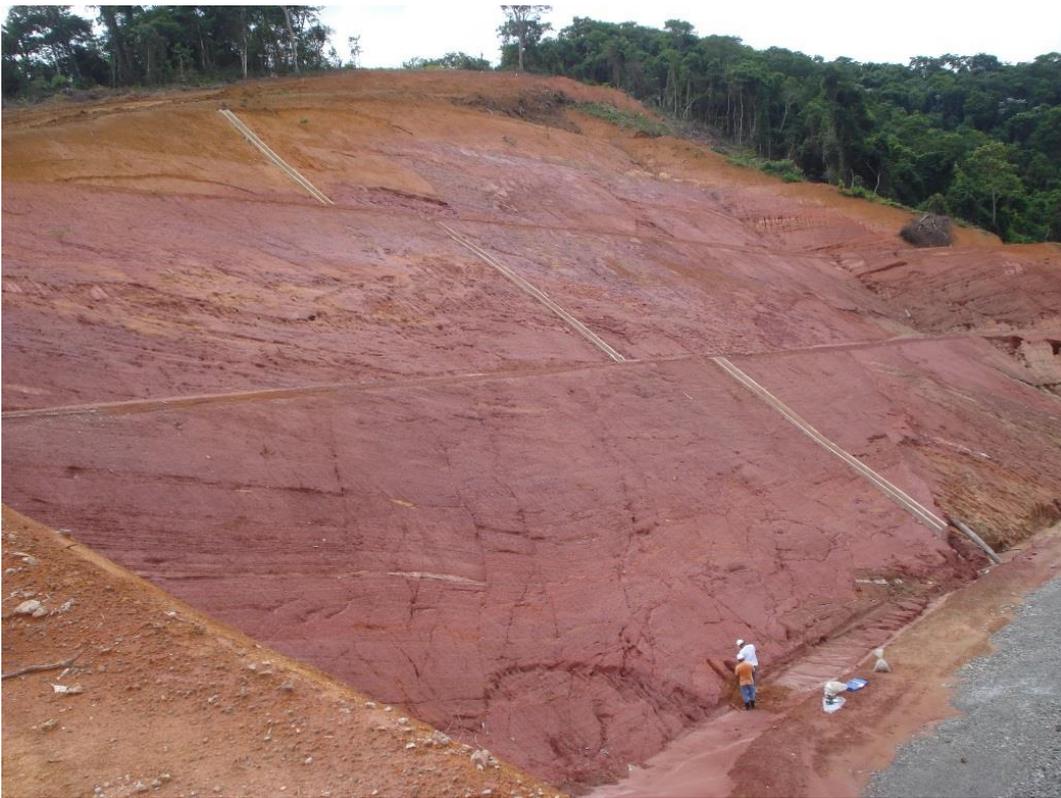


Figura 2.5 – Talude escavado em solo residual de gnaiss – AHE Simplício (Acervo de D. L. Machado).

A diferença entre os processos de formação dos solos residuais e sedimentares gera diferentes mineralogias, granulometrias, formato das partículas e estrutura para estes solos.

No Brasil, devido às altas temperaturas e pluviosidade, os solos residuais se desenvolvem com maior facilidade, podendo apresentar horizontes de grandes espessuras. Estes solos são resultado da ação do intemperismo químico

predominantemente, com a atuação complementar do intemperismo físico (MACHADO, 2012).

2.1.4 Classificação das rochas

Segundo NUNES (2009), as principais características petrográficas que influenciam no comportamento das rochas são representadas por: mineralogia, estrutura, textura, grau de alteração e cor.

As rochas ígneas, metamórficas e sedimentares apresentam composição mineralógica distinta, que é formada por minerais essenciais e acessórios. Os minerais acessórios são aqueles que estão presentes em pequenas quantidades na rocha. Já os minerais essenciais estão presentes em grandes quantidades e suas propriedades físicas e mecânicas podem influenciar no comportamento mecânico do maciço (NUNES, 2009).

De acordo com FRAZÃO (2002) e FRASCÁ & SARTORI (1998), os principais minerais constituintes das rochas são: quartzo; feldspatos; micas (muscovita e biotita); piroxênios; anfibólios; feldspatoides; olivina; calcita; dolomita; e argilominerais.

Cada tipo de mineral possui uma resistência ao risco diferente e essa característica pode influenciar na dureza das rochas. A resistência ao risco de um mineral varia de 1 a 10 e é medida pela escala de Mohs:

1 – Talco	}	Riscados pela unha
2 – Gipsita		
3 – Calcita	}	Riscados por vidro/canivete
4 – Fluorita		
5 – Apatita		
6 – Ortoclásio	}	Riscam o vidro
7 – Quartzo		
8 – Topázio		
9 – Coríndon		
10 – Diamante		

Quanto à estrutura, as rochas podem ser maciças (com ou sem fratura), foliadas e xistosas ou estratificadas. As rochas com estrutura maciça são mais comuns dentre o

grupo das rochas ígneas; as com estrutura foliada e xistosas são mais comuns entre as rochas metamórficas; e as com estrutura estratificada são mais comuns em rochas sedimentares.

A textura das rochas é dividida em cristalina, mais comum em rochas ígneas e metamórficas, e clástica, mais comum em rochas sedimentares. Em uma estrutura de textura cristalina (Figura 2.6b), os grãos estão imbricados, ou seja, são perfeitamente unidos, virando uma estrutura única. Já em uma estrutura de textura clástica (Figura 2.6a), os grãos são envoltos por uma matriz, sem estarem unidos uns aos outros (NUNES, 2009).

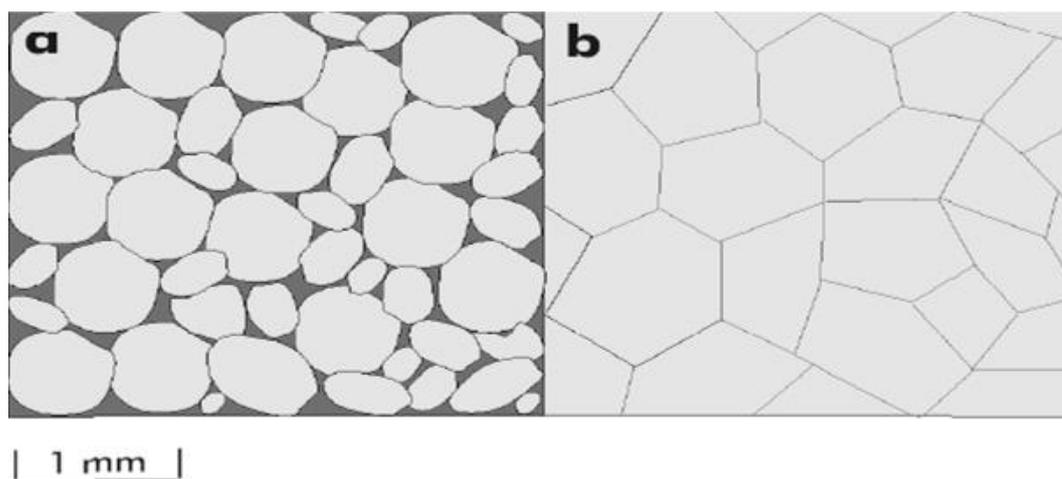


Figura 2.6 – Esquema de textura (a) clástica e (b) cristalina (NUNES, 2009).

A textura pode ser dividida ainda em afanítica ou fanerítica podendo ambas serem porfiríticas ou não. Uma rocha tem textura afanítica quando os grãos que fazem parte de sua matriz são muito pequenos e invisíveis a olho nu. Já a rocha com textura fanerítica possui grãos que são visíveis a olho nu. Uma rocha tem textura porfirítica quando possui grãos maiores que se destacam na matriz de grãos menores. A Figura 2.7 apresenta alguns exemplos de rochas com estes tipos de textura.

Outra característica relacionada à textura da rocha é a granulação de seus minerais, que pode ser finíssima e fina (cristais não visíveis), ou média, grossa e muito grossa (cristais visíveis).

Quanto ao grau de alteração, existem diversas classificações, porém, em geral, as rochas são divididas em: rocha sã ou inalterada, levemente alterada, moderadamente alterada, altamente alterada e completamente alterada, sendo que esta última corresponde a um material com características muito similares às dos solos. Neste trabalho, para a

determinação do grau de alteração das amostras, será utilizada a classificação desenvolvida por OLIVEIRA (2017) e apresentada na Tabela 2.1.

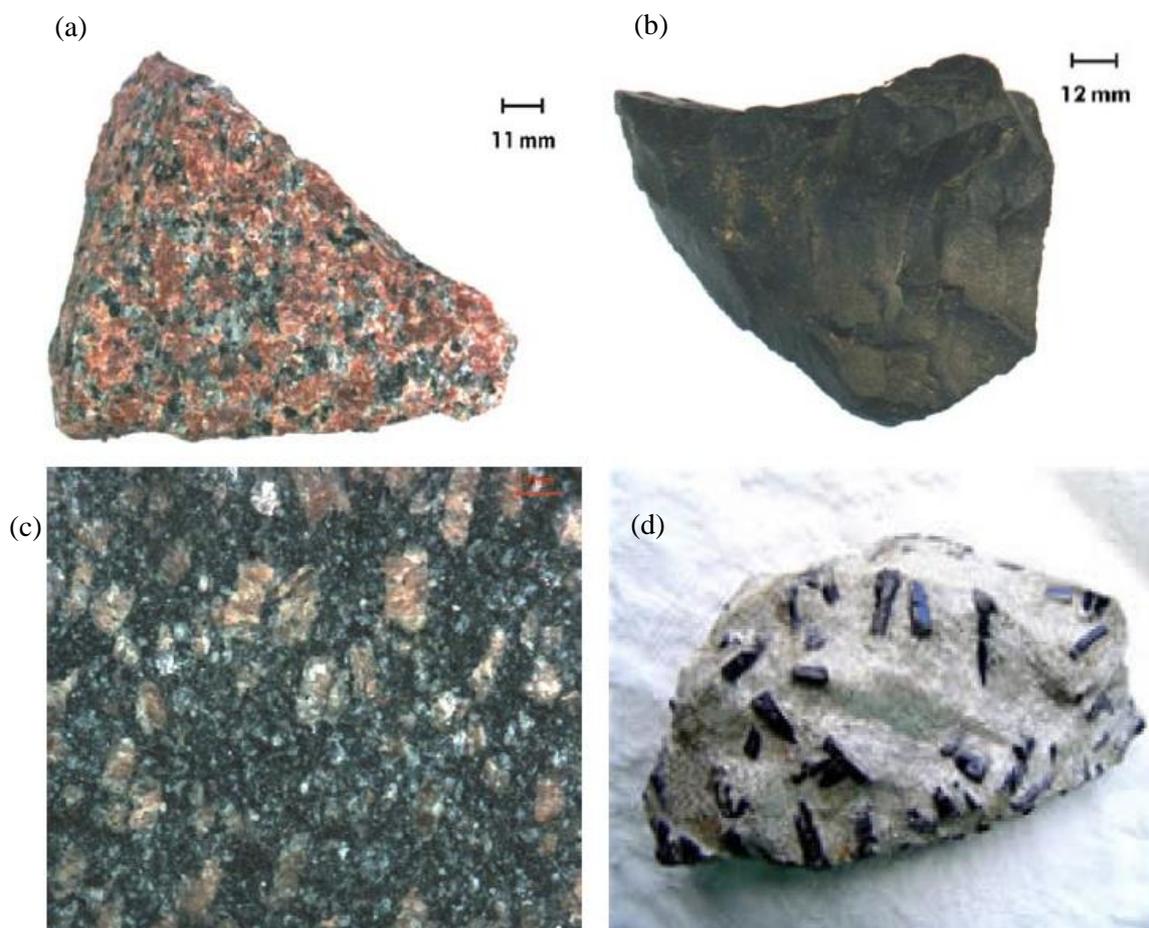


Figura 2.7 – Textura das rochas em função do tamanho dos grãos: (a) fanerítica, (b) afanítica, (c) fanerítica porfirítica e (d) afanítica porfirítica. (NUNES, 2009).

Tabela 2.1 – Classificação do grau de alteração das rochas (OLIVEIRA, 2017).

GRAU DE ALTERAÇÃO	DESCRIÇÃO
A – Inalterada	Minerais originais intactos, sem indícios de decomposição, podendo existir leve oxidação.
B – Pouco alterada	Alteração incipiente com pouca transformação dos componentes mineralógicos originais e pouca descoloração do material
C – Medianamente alterada	Minerais medianamente alterados e, em geral, sem brilho; maior descoloração do material.
D – Muito alterada	Minerais muito alterados e sem brilho; superfície com intensa decomposição, desagregando-se facilmente.
E – Extremamente alterada	Componentes mineralógicos originais transformados total ou parcialmente pelo intemperismo químico; transição da rocha para solo.

Quanto à cor, as rochas podem apresentar coloração homogênea ou com variação, sendo estas colorações predominantemente máficas (escuras) ou félsicas (claras).

2.2 ALTERAÇÃO DE ROCHAS

Segundo MAIA (2001), a utilização das rochas como material de construção data do princípio da civilização e a observação das modificações que elas sofrem ao longo do tempo também não é algo novo. A alteração das rochas ocorre de forma natural ao longo de milhares de anos, porém alterações significativas podem ocorrer em um intervalo de alguns anos ou meses. Alterações significativas veem ocorrendo em intervalos cada vez menores devido principalmente às intervenções que as obras de engenharia têm provocado. O desmonte a fogo tem sido muito utilizado e provoca danos que podem resultar em uma aceleração do processo de alteração das rochas.

As modificações sofridas pelas rochas devido à exposição a agentes ambientais recebem diversos nomes na literatura, sendo intemperismo o mais utilizado. O intemperismo é o conjunto de processos que provocam a desintegração e a decomposição das rochas, quando expostas à processos físicos e químicos de alteração, respectivamente (TEIXEIRA *et al.*, 2000).

O termo alteração também é utilizado para denominar estas modificações sofridas pelas rochas. Este termo é mais utilizado quando tais modificações provocam mudanças no desempenho da rocha, em especial quando afeta o seu desempenho geomecânico (FRAZÃO, 1993).

A alteração das rochas causa o enfraquecimento do maciço, levando ao surgimento de fissuras, a alteração dos minerais e a redução dos parâmetros de resistência da rocha (GUIDICINI & NIEBLE, 1983). O entendimento dos processos de alteração das rochas e seus efeitos é importante para a engenharia, pois têm influência nas propriedades mecânicas da rocha (BRADY & BROWN, 2005).

MAIA (2001) apresenta diversos casos de obras nacionais e internacionais, nas quais a alteração das rochas causou diversos tipos de problemas. FARRAN & THENÓZ (1965) apresentaram um caso onde rochas graníticas desagregaram-se em meses quando expostas aos agentes atmosféricos. São relatados também, alguns casos que ocorreram no Brasil como o do basalto utilizado no aterro da ponte do Rio Sucuri (obra complementar

da barragem de Jupιά), que se desagregou em poucas semanas (FARJALLAT *et al.*, 1972); os basaltos da Barragem de Capivara no Rio Paranapanema, que se desagregaram completamente em contato com agentes atmosféricos, levando a uma redefinição de parte do projeto (FARJALLAT *et al.*, 1972; SIGNER, 1973; CRUZ, 1996); e os relatos de FRAZÃO & CARUSO (1983) sobre a alteração acelerada sofrida por rochas basálticas utilizadas em barragens da Bacia do Alto Paraná.

Ressalte-se que, os termos ‘alteração’ e ‘intemperismo’ correspondem ao mesmo processo de modificação das propriedades das rochas, devido a sua interação com o meio ambiente e seus agentes de transformação. Porém, o termo intemperismo é utilizado para tratar, de um modo mais geral, todos os processos de modificação das rochas. Enquanto o termo alteração é mais utilizado para se referir aos processos de modificação que provocam mudanças no comportamento geomecânico da rocha. Desta forma, o segundo termo será o adotado na presente pesquisa.

2.2.1 Alteração e alterabilidade de rochas

Alteração é o nome dado ao conjunto de modificações de ordem física e/ou química que as rochas sofrem quando estão na superfície da terra em contato com mecanismos de alteração (TEIXEIRA *et al.*, 2000).

Todas as rochas, mesmo as mais resistentes, podem enfraquecer e desagregar em contato com a água e os gases da atmosfera (PRESS *et al.*, 2006).

O intemperismo é um processo geológico que afeta as propriedades das rochas e pelo qual as rochas são destruídas, dando origem aos solos. As rochas podem ser alteradas quimicamente, provocando à modificação e/ou dissolução dos minerais presentes; ou fisicamente, fragmentando a rocha por processos mecânicos sem que a composição química desta seja modificada. As alterações físicas e químicas podem atuar em conjunto. Por exemplo, a deterioração química da rocha faz com que ela se torne mais suscetível à fragmentação. Por sua vez, quanto mais a rocha for fragmentada, maior será a área disponível para ação do intemperismo químico (PRESS *et al.*, 2006; ARIKAN & AYDIN, 2012).

A alteração física da rocha compreende os processos que provocam a desagregação da mesma devido à ação de agentes mecânicos e ocorre com maior frequência em regiões de baixa umidade. Seus principais mecanismos de alteração são:

desagregação devido a variações de temperatura e umidade que provocam dilatação e contração térmica da rocha; fraturamento por alívio de tensões provocado por escavações ou cortes; desagregação devido ao crescimento de cristais, que pode ocorrer pelo congelamento da água ou pela cristalização de sais dissolvidos na água; crescimento de raízes, que causa o fraturamento da rocha; e abrasão provocada por atrito ou impacto entre partículas e que causa o desgaste da rocha (TEIXEIRA *et al.*, 2000; MAIA, 2001).

A alteração química das rochas são os processos que provocam a sua decomposição e ocorrem geralmente em meios úmidos. O principal agente do intemperismo químico é a água, que infiltra nas fraturas da rocha e em contato com gases da atmosfera e matéria orgânica, adquire um caráter ácido.

As principais reações que ocorrem no intemperismo químico são: hidratação, que promove variação de volume dos minerais; dissolução que, promove a perda de minerais; hidrólise que, enfraquece a estrutura devido à retirada de íons; e oxidação que promove a formação de óxidos e hidróxidos facilmente lixiviados (TEIXEIRA *et al.*, 2000; MAIA, 2001).

A alteração da rocha depende de fatores relacionados à rocha e relacionados ao meio ambiente. Esses fatores atuam como promotores da alteração, que ocorre em um determinado período de tempo (MAIA, 2001).

Os principais fatores responsáveis pela ação do intemperismo são: as características e propriedades da rocha, pois a mineralogia e a microestrutura determinam uma maior ou menor facilidade com que a rocha sofre alteração; clima, pois as variações de temperatura e pluviosidade determinam a velocidade da alteração; relevo e topografia, pois controlam o regime de infiltração e escoamento da água, determinando se a rocha está mais sujeita a alteração física (terreno em declive) ou a alteração química (terreno suave); fauna e flora, pois fornecem matéria orgânica favorecendo as reações químicas e produzem raízes que ajudam a fraturar a rocha; e tempo de exposição da rocha (BEGONHA, 1989; PRESS *et al.*, 2006; TEIXEIRA *et al.*, 2000).

PRESS *et al.* (2006) citam ainda a atividade humana como fator de alteração das rochas, devido aos desmontes mecânicos e com explosivos realizados pelas obras de engenharia, e devido às alterações ambientais e climáticas provocadas pelos homens, como o aumento das chuvas ácidas e a contaminação do solo por produtos químicos.

Desintegração consiste na perda de coesão da rocha e individualização dos minerais devido à ação de agentes físicos. Decomposição é a modificação progressiva da

composição dos minerais provocada pela ação de agentes químicos. A desagregação também é importante na avaliação da alteração da rocha e consiste no mecanismo pelo qual ocorre a redução da resistência mecânica da rocha e aumento da produção de finos devido à ação de processos químicos e físicos.

MAIA (2001) separa e elenca os principais agentes de alteração em agentes físicos, químicos e biológicos. Os principais agentes físicos são radiação solar, temperatura, precipitação, umidade relativa do ar, vento, pressão atmosférica e atrito mecânico. Dentre os agentes químicos estão água, ácidos, bases, solventes, oxigênio, ozônio e poluentes atmosféricos. Os agentes biológicos são os microorganismos como fungos e bactérias.

Neste contexto, é possível notar que alguns dos principais agentes de alteração das rochas estão ligados a fatores climáticos como temperatura, precipitação, umidade relativa do ar, vento, pressão atmosférica, potencial hidrogeniônico e de oxirredução.

Em regiões quentes e úmidas, o intemperismo químico tende a atuar de forma mais intensa, enquanto em regiões glaciais, o intemperismo físico comanda o processo de alteração das rochas (PRESS *et al.*, 2006). Portanto, a intensidade com que os agentes de alteração atuam em cada ambiente depende do fator climático. A Figura 2.8 apresenta uma correlação entre a temperatura e a precipitação média anual e os tipos de alteração que devem preponderar em cada região, bem como sua intensidade (PELTIER, 1950; MAIA, 2001).

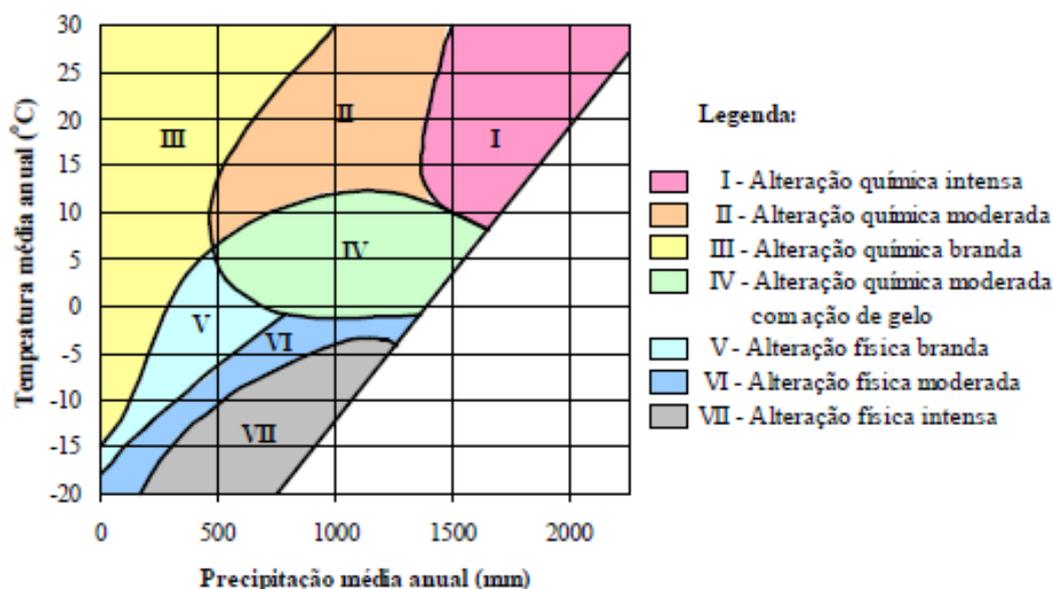


Figura 2.8 – Tipos de degradação em função da temperatura e da precipitação (PELTIER, 1950; MAIA, 2001).

O maciço rochoso, formado por rocha intacta mais descontinuidades, pode sofrer o processo de alteração quando exposto às condições atmosféricas e à percolação da água. Este processo, que é resultado da ação física e química dos agentes atmosféricos, provoca o enfraquecimento das ligações e a decomposição dos minerais que constituem a rocha (AYDAN *et al.*, 2014).

A intemperização dos maciços rochosos é maior quando existem juntas, fraturas e fissuras no maciço, pois estas estruturas são mais suscetíveis à exposição de agentes externos. Neste mesmo contexto, quando há um alívio de tensões no maciço, são geradas novas juntas e conseqüentemente mais frentes de intemperismo (MIŠČEVIĆ & VLASTELICA, 2009).

A profundidade da alteração das rochas e das juntas que compõem o maciço depende do tipo de rocha e de sua permeabilidade. Rochas mais permeáveis são alteradas por completo, superfície e interior do material, enquanto rochas impermeáveis sofrem alteração mais superficial.

A alterabilidade das rochas é um fator importante para a estabilidade dos taludes rochosos que estão sujeitos a agentes atmosféricos, pois as alterações sofridas pela rocha podem levar à redução da resistência, e conseqüentemente, à redução do fator de segurança do talude (HACK *et al.*, 2002).

A alterabilidade do material corresponde a sua susceptibilidade à alteração, que pode ser maior ou menor de acordo com suas características, e que tem dependência com a estabilidade química de seus minerais constituintes. Quanto mais estáveis quimicamente forem os minerais constituintes da rocha, menos alterável será o material (BEGONHA, 1989; MAIA, 2001).

O conceito de alterabilidade relativa foi proposto inicialmente por GOLDICH (1938) e foi baseada na estabilidade química de rochas com diferentes mineralogias, submetidas às mesmas condições de alteração. Em seus estudos apresentou, a partir de observações, uma seqüência de estabilidade dos principais minerais quando submetidos ao intemperismo, conhecida como Série de Goldich.

BOWEN (1956) apresenta séries que sugerem uma seqüência de cristalização dos minerais conforme ocorre o resfriamento do magma. Quanto mais rápida for a formação dos minerais (primeiros a se formarem), menos estáveis eles serão. Sendo assim, os minerais que se formam por último na seqüência de cristalização do magma, são os minerais mais estáveis da superfície terrestre.

A Tabela 2.2 apresenta uma comparação entre as séries e pode ser explicada da seguinte maneira: quanto mais tempo o mineral leva para se cristalizar, mais estável ele se torna e menor será a velocidade com que ele se altera sob a ação do intemperismo.

Tabela 2.2 - Comparação da Série de Goldich (estabilidade dos minerais) com a série de cristalização de Bowen (TEIXEIRA *et al.*, 2000).

Série de Goldich	Velocidade de Alteração	Série de Bowen	
<i>Mais Estável</i>	<i>Menor</i>	<i>Último a Cristalizar</i>	
Óxidos de ferro (Hematita)	↓	Quartzo	
Hidróxidos de alumínio (Gibbsita)		Muscovita	
Quartzo		Ortoclásio	
Argilominerais			
Muscovita			
Feldspato K (Ortoclásio)		Biotita	
Biotita			
Feldspato Na (Albita)		Anfibólio	
Anfibólios		Minerais máficos ¹	
Piroxênio		Piroxênio	
Feldspato Ca (Anortita)		Olivina	
Olivina			
Calcita			
Halita			
<i>Menos Estável</i>		<i>Maior</i>	<i>Primeiro a Cristalizar</i>

¹ Série descontínua
² Série contínua

De acordo com MINETTE (1982), quanto menor o teor de sílica presente nas rochas magmáticas e metamórficas, mais susceptíveis à alteração química são os seus minerais constituintes. Desta forma, rochas basálticas se tornam mais alteráveis em relação às rochas graníticas e xistos em relação aos gnaisses.

MINETTE (1982) apresenta uma ordem de alteração química das rochas em função da suscetibilidade de alteração de seus minerais constituintes. Uma adaptação desta série feita por MAIA (2001) é apresentada na Figura 2.9.

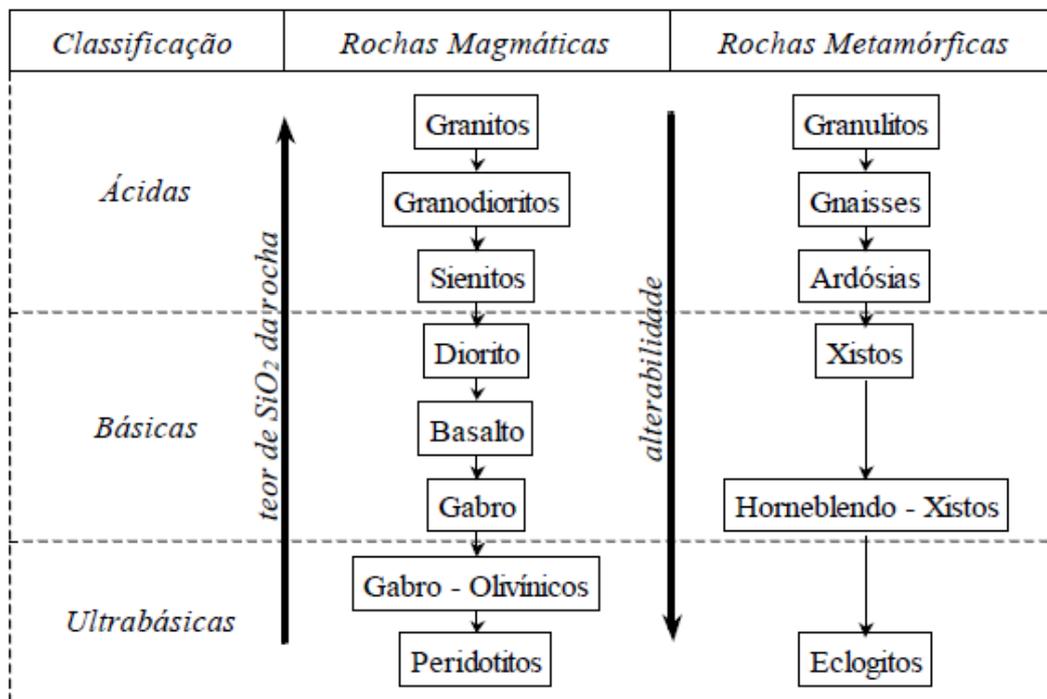


Figura 2.9 – Ordem de alteração química das rochas (MAIA, 2001).

2.2.2 Efeitos da alteração

De modo geral, a resistência da rocha depende mais de seu estado de sanidade do que de sua mineralogia. Isto ocorre sobretudo para as rochas ígneas e metamórficas, que possuem alta resistência quando são, e têm sua resistência bastante reduzida quando alteradas (MACIEL FILHO, 1997).

Uma rocha é alterada quando apresenta modificações físicas, químicas, mineralógicas ou texturais, que provocam modificações em suas características físicas e mecânicas. Modificações físicas podem ser traduzidas por variação de cor da rocha e de seus minerais visíveis, abertura de fissuras e desagregação de minerais. Já as modificações químicas e mineralógicas dizem respeito à decomposição e modificação dos minerais da rocha. Modificações texturais podem ocorrer quando as rochas atingem um estado mais avançado de alteração (BEGONHA, 1989).

O intemperismo de rochas em condições tropicais e úmidas produz modificações microestruturais que podem levar ao surgimento de manchas, mudança de cor, formação de minerais secundários, mudanças de textura, microfissuramento, aumento de vazios, redução da coesão entre os grãos e da resistência, podendo levar a rocha à desintegração (GUPTA & SESHAGIRI RAO, 1998; AYDIN & BASU, 2005).

O processo de alteração da rocha promove o enfraquecimento das ligações entre cristais, grãos e fragmentos das rochas, reduzindo a sua resistência e deformabilidade.

Além disso, o processo pode aumentar o tamanho das fraturas e juntas da rocha, e formar material de preenchimento (AYDAN *et al.*, 2014).

Uma característica importante do intemperismo é que uma pequena alteração da rocha sã pode causar uma diminuição da resistência mecânica maior do que a que ocorre para níveis mais altos de alteração (BARTON, 1973).

Do ponto de vista da engenharia, a importância da alteração das rochas reside em quatro efeitos principais, sendo eles: a diminuição da resistência com ou sem produção de finos; a variação das características mecânicas de deformabilidade; a variação na porosidade, permeabilidade e estanqueidade; e a diminuição da aderência entre os minerais (FARJALLAT, 1972).

A alteração provoca a diminuição da resistência à compressão e à tração da rocha, além da sua desagregação e aumento de fissuras. A redução da resistência da rocha provoca uma redução do fator de segurança da obra.

Quanto à permeabilidade, a alteração da rocha pode causar tanto o seu aumento como a sua redução, provocando modificações no regime de fluxo e nos níveis de pressões nas descontinuidades do maciço. Em fundações, por exemplo, a alteração da rocha pode provocar o aumento da permeabilidade, aumentando a perda de água pela fundação. Já em taludes, a produção de finos provocada pela alteração pode reduzir a permeabilidade do maciço, podendo causar sobrecarga por acúmulo de água no talude.

Outros efeitos provocados pela alteração dos materiais rochosos são: modificação da granulometria, da forma e da rugosidade da rocha; aumento da absorção de água; e propagação de fissuras, podendo levar à desagregação.

A resistência ao cisalhamento de uma junta rochosa que sofreu alteração será menor que a resistência da mesma junta sem alteração, devido à redução da resistência à compressão que ocorre em juntas alteradas. A resistência das juntas sofre maior redução com o aumento do nível de alteração da rocha (BARTON, 1973).

A alteração da junta causa a redução da resistência das paredes da junta, a condução da água pelas juntas, a redução da resistência à compressão das paredes dos blocos mais internos do maciço, e o aumento da permeabilidade da rocha do maciço (BARTON, 1973).

A rugosidade das juntas contribui positivamente para a resistência ao cisalhamento da descontinuidade, porém a alteração da junta e a presença de material de preenchimento afetam a resistência negativamente (BARTON *et al.*, 1974).

2.2.3 Ensaios para avaliação da alteração

O objetivo final do estudo de alterabilidade é a avaliação do comportamento do material a longo prazo. Para que isso seja possível, é necessário muitas vezes simular a alteração do material em laboratório. Esta simulação deve ser rápida e reproduzir as condições de alteração do campo.

Segundo SALLES (2013) os principais ensaios utilizados na avaliação da alteração das rochas podem ser divididos em diretos e indiretos (Figura 2.10). Os ensaios diretos são aqueles que expõem o material rochoso diretamente à ação dos mecanismos de alteração, buscando simular as condições ambientais do local de exposição. São divididos em ensaios de degradação, ensaios de desgaste e ensaios de impacto. Os ensaios indiretos são utilizados para avaliar o nível de degradação da amostra e, para isto são feitas comparações entre as propriedades do material alterado e da rocha intacta. A associação dos ensaios diretos e indiretos permite avaliar tanto o grau de alteração da amostra, quanto o modo com que ela sofre alteração. Além disso, é possível determinar a evolução do comportamento da rocha ao longo do tempo.

Os ensaios mais relevantes para avaliação da alteração das rochas, são os de degradação. Estes ensaios têm por objetivo submeter o material, em campo ou em laboratório, à ação de agentes intempéricos, acelerando o processo de alteração das amostras e possibilitando a determinação da variação das propriedades do material para diferentes níveis de alteração (SALLES, 2013).

Os ensaios de degradação em campo, como os ensaios de ciclagem natural, possibilitam a exposição do material às condições naturais de intemperismo. Este tipo de ensaio é empregado em estudos de longo prazo e devem ser atentadas as condições de exposição dos materiais, pois eles devem ser colocados em locais onde incidam fatores climáticos como luz solar, precipitações e vento (SALLES, 2013).

Os ensaios de degradação em laboratório mais utilizados nos estudos de alterabilidade das rochas são os ensaios de lixiviação contínua e de ciclagem por umedecimento e secagem.

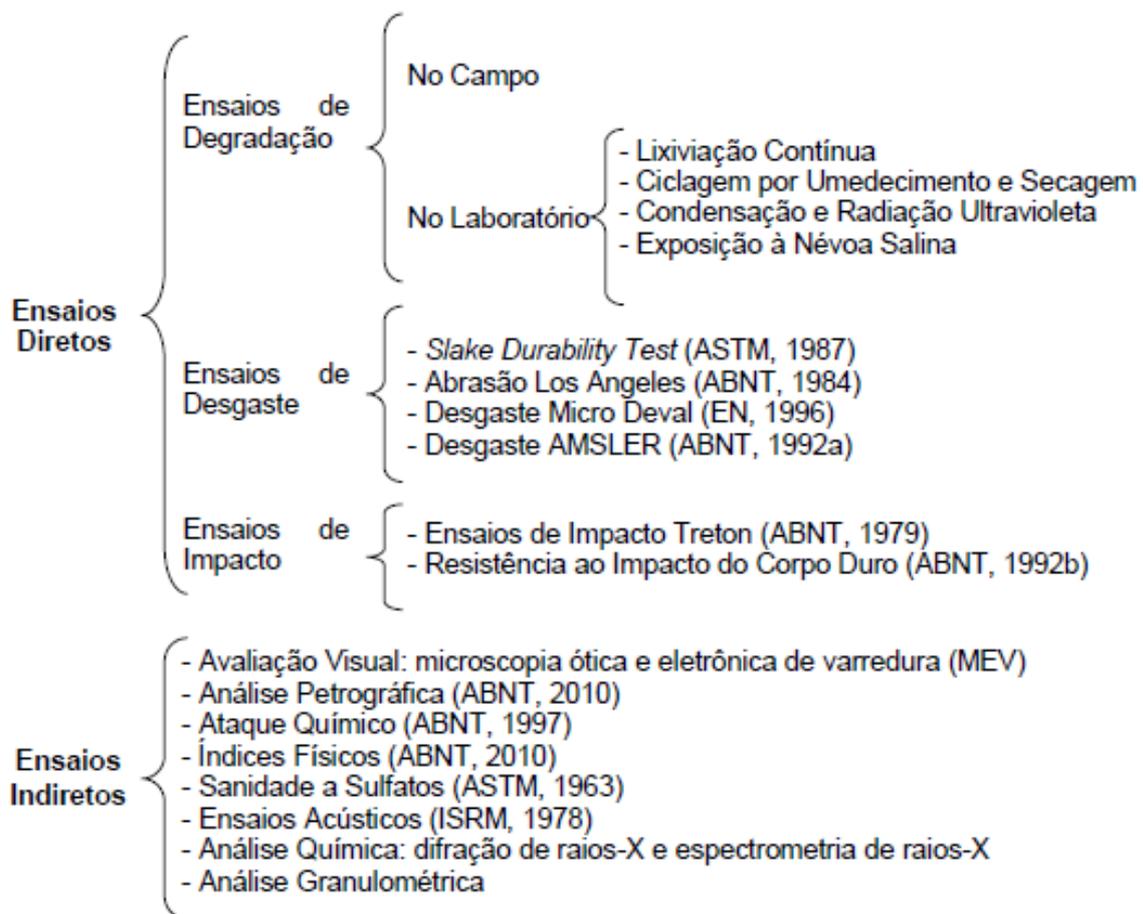


Figura 2.10 – Classificação dos ensaios para avaliação da degradação (SALLES, 2013).

O ensaio de lixiviação contínua simula a alteração das amostras pelo processo de carreamento de materiais e elementos da rocha. O equipamento mais usado é o extrator soxhlet (Figura 2.11), no qual as amostras sofrem variações de temperatura e das condições de saturação por água. Neste equipamento a amostra é submetida a três condições de alteração: na primeira, o material da parte superior do tubo é submetido a variações de temperatura enquanto é lavado continuamente; na segunda, o material da parte central é submetido a variações do nível de água; e na terceira, o material da parte inferior permanece permanentemente submerso (MAIA, 2001).

Os ensaios de ciclagem tentam reproduzir a alteração das rochas, que ocorre em campo devido às variações de umidade e temperatura. O ensaio mais comum de ciclagem consiste no umedecimento da rocha seguido de secagem ao ar ou em estufa.

2.2.4 Avaliação da alteração

A avaliação da alteração e da alterabilidade das rochas é um problema muito complexo da engenharia. Porém, a análise da alteração e de seus efeitos nas propriedades geotécnicas é de extrema relevância na previsão do comportamento das rochas. (MAIA, 2001).

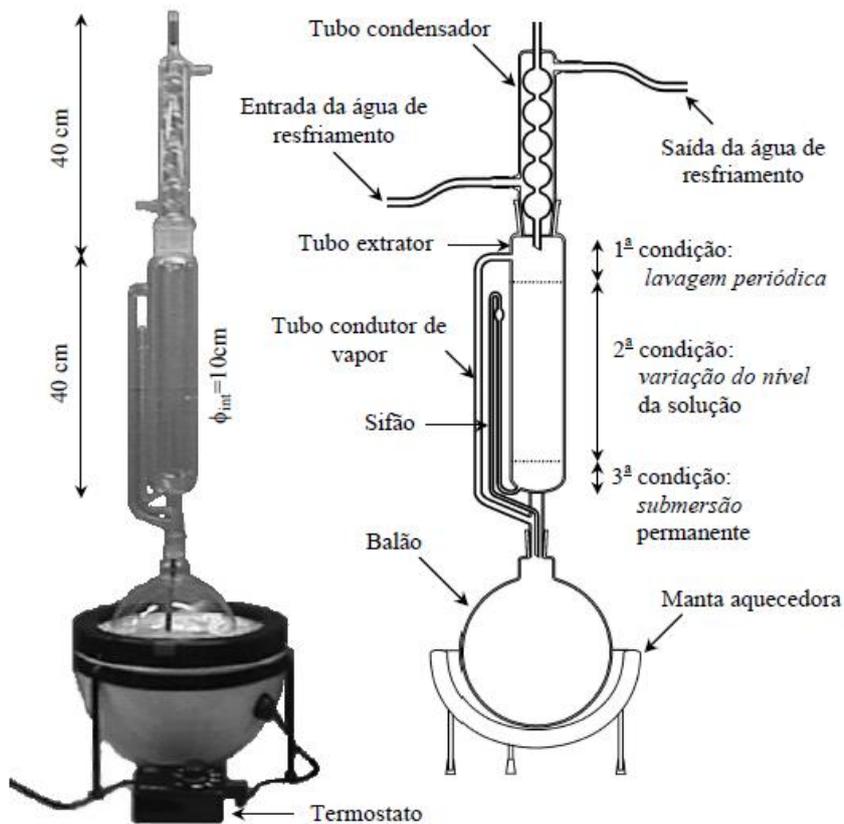


Figura 2.11 – Equipamento soxhlet convencional para ensaios de lixiviação contínua (MAIA, 2001).

A análise do estado de alteração de uma rocha pode ser feita de maneira qualitativa ou quantitativa. A avaliação qualitativa é subjetiva e insuficiente para estimar propriedades mecânicas e o comportamento das rochas. Consiste na análise visual da alteração dos minerais por meio de variações de cor, brilho e textura. A análise quantitativa é realizada principalmente por comparação das propriedades da rocha sã com as propriedades da rocha alterada, sendo utilizados ensaios de alteração acelerada em laboratório que simulam a alteração natural da rocha ao longo do tempo (HEIDARI et al., 2013; LOPES, 2006).

A avaliação quantitativa do grau de alteração das amostras pode ser feita por meio dos índices de alterabilidade, nos quais são comparadas as características de rochas de um mesmo tipo petrográfico, em seu estado intacto e em seu estado alterado. Estes índices permitem comparar diferentes níveis de alteração em diferentes amostras de uma mesma rocha e simular a variação de cada propriedade desta rocha com o aumento do grau de alteração da mesma. Os índices de qualidade são aplicados na quantificação de propriedades mensuráveis como resistência, absorção, desgaste, porosidade, massa específica, propagação de ondas e granulometria (SALLES, 2013).

Segundo FARJALLAT (1972), a associação das características das rochas a índices de qualidade que comparam seus diferentes graus de alteração, é uma evolução na análise quantitativa da alterabilidade dos materiais rochosos.

Alguns dos principais índices de qualidade são assim definidos por MAIA (2001) são:

- Índices geoquímicos: usados para comparar a composição química da rocha alterada com a da rocha sã;
- Índices petrográficos: usados para quantificar os minerais sãos e alterados da rocha, além de avaliar o estado das microfissuras e quantificar o teor de minerais secundários;
- Índices físicos: as propriedades mais utilizadas na avaliação do grau de alteração da rocha são absorção de água, porosidade, peso específico, expansibilidade e permeabilidade;
- Índice de propagação de ondas: quanto mais alterada a rocha estiver, maior será o número de discontinuidades presentes na amostra, fazendo com que a velocidade de propagação da onda diminua;
- Índices geomecânicos: as propriedades geomecânicas das rochas podem ser muito afetadas pelo processo de alteração. Por isso, a avaliação destes índices é muito relevante nos projetos de engenharia.

MAIA (2001) apresenta ainda alguns ensaios de caracterização que podem ser utilizados como indicadores de alteração da rocha como: ensaios de abrasão Los Angeles, microdureza Vickers, impacto Treton, ensaios de sanidade a sulfatos de sódio e magnésio, ataque por etileno-glicol e água oxigenada, além do ensaio de durabilidade (*slake durability*).

HEIDARI *et al.* (2013) determinaram correlações entre o grau de alteração de rochas como granito e granodiorito e propriedades como resistência à compressão uniaxial, resistência à tração, carga pontual, absorção e porosidade. Verificaram que a alteração provocou o aumento da fissuração das amostras e que o granito é menos alterável que o granodiorito.

AREL & TUGRUL (2001) apresentaram análises petrográficas, mineralógicas e químicas feitas em amostras de granodiorito e verificaram que o peso específico e a resistência da rocha diminuem com a alteração, enquanto a porosidade aumenta.

ÖZVAN *et al.* (2014) avaliaram a resistência ao cisalhamento de granitos de acordo com o grau de alteração das amostras e dos parâmetros de rugosidade da junta (JCR). Averiguaram que a rugosidade da superfície da junta aumentou com o processo de alteração das amostras, enquanto que a sua resistência ao cisalhamento diminuiu.

2.3 MARTELO SCHMIDT

O ensaio de Martelo ou Esclerômetro Schmidt (Figura 2.12) foi inicialmente proposto, pelo engenheiro Ernst Schmidt, para testar a dureza do concreto de forma não destrutiva, tendo seu uso ampliado posteriormente, para estimar a resistência das rochas (KATZ *et al.*, 2000).

O Martelo Schmidt vem sendo muito utilizado desde a década de 50 na determinação da dureza de superfícies de concreto e de rocha, devido ao seu baixo custo e simplicidade de utilização (BUYUKSAGIS & GOKTAN, 2007).

O ensaio com Martelo Schmidt é uma ótima solução para o problema da determinação da resistência à compressão das juntas. Alguns detalhes do ensaio são importantes como a direção de realização do teste e a perpendicularidade entre o pistão e a superfície da junta. Além disso, as dimensões das amostras devem ser suficientes para que a rocha não se mova enquanto estiver sendo ensaiada. BARTON & CHOUBEY (1977) recomendam que amostras pequenas sejam devidamente fixadas para realização do ensaio.

O Martelo Schmidt realiza ensaios não destrutíveis, e seu funcionamento consiste na aplicação de impacto em uma superfície que se deseja ensaiar, a qual responde com uma reação proporcional à sua dureza (WEST, 1991; AYDIN & BASU, 2005).



Figura 2.12 - Realização de ensaio com Martelo ou Esclerômetro Schmidt.

O mecanismo de operação do equipamento (Figura 2.13) consiste em uma massa presa a uma mola, que é comprimida ao pressionar o pistão do martelo contra uma superfície. A mola é comprimida até a liberação da massa, que se choca com a extremidade do pistão e transmite o impacto à superfície. Após o impacto, a massa retorna e essa distância de retorno ou rebote da massa é proporcional à energia absorvida pela superfície de impacto. Esta parcela de energia que é absorvida, depende da dureza e da resistência ao impacto da amostra, que é expressa pelo valor do rebote (R) marcado no painel do amostrador por meio de uma escala numérica que varia geralmente de 10 a 100. Detalhes dos mecanismo e procedimentos de ensaio com martelo são apresentados por WEST (1991), BUYUKSAGIS & GOKTAN (2007) e AYDIN (2009).

Parte da energia do impacto é absorvida pelo trabalho feito pela deformação plástica do material e parte é transformada em som e calor. A energia restante representa a resistência à penetração ou a dureza do material. Quanto maior for a dureza do material, menor será a penetração do pistão e, conseqüentemente, maior será o rebote registrado pelo equipamento. O valor do rebote representa a distância percorrida pelo pistão após o impacto (AYDIN & BASU, 2005).

Esquema simplificado do funcionamento mecânico do esclerômetro

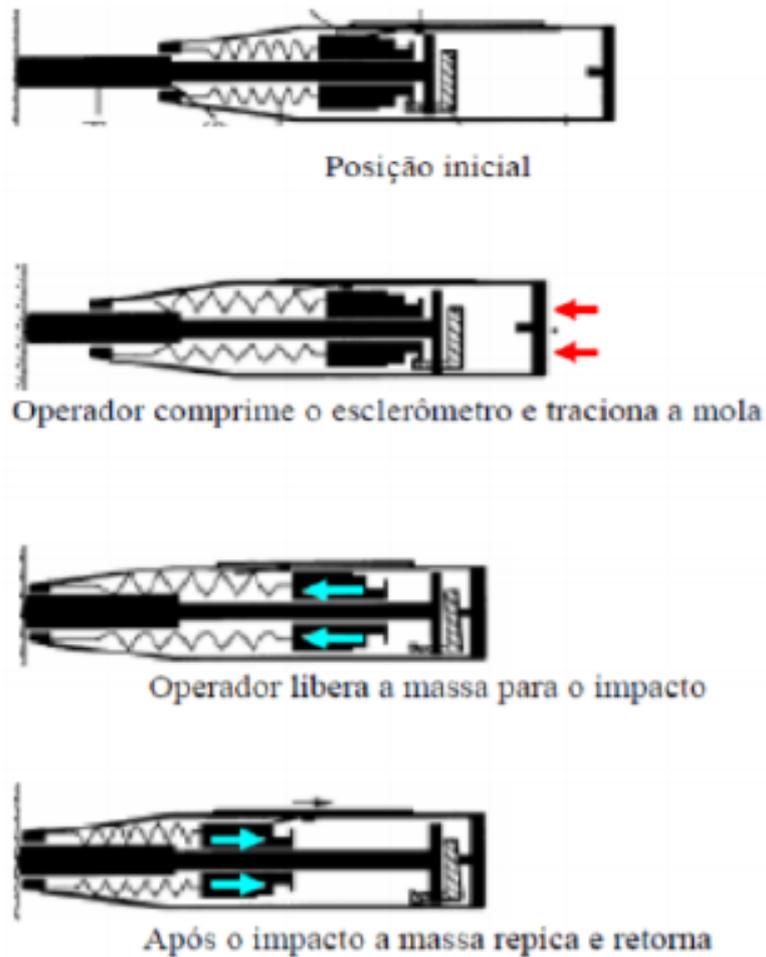


Figura 2.13 – Esquema simplificado de funcionamento do Martelo Schmidt (OLIVEIRA, 2017).

A indústria oferece dois tipos de Martelo Schmidt, a saber, martelos tipo L e N com energia de impacto de 0,735 e 2,207Nm, respectivamente. A ISRM (1978) indicava apenas o uso do martelo tipo L para rochas. Entretanto, AYDIN (2009) afirma que para um certo diâmetro da ponta do pistão e raio de curvatura, a energia de impacto do martelo determina sua faixa de aplicação. Por exemplo, o martelo tipo N é menos sensível às irregularidades da superfície e pode ser usado para superfícies com maiores resistências ao impacto, enquanto o martelo tipo L tem maior sensibilidade para valores de resistência mais baixos, fornecendo melhores resultados ao testar rochas mais brandas.

Os dois tipos de martelo, N e L, podem ser usados de forma efetiva, sendo que o martelo tipo L apresenta maior sensibilidade para a heterogeneidade da rocha e uma maior dispersão de resultados. Ambos martelos apresentaram alta sensibilidade quanto às propriedades da rocha, resistência e módulo de deformação, sendo que o martelo tipo N,

geralmente, apresenta melhores resultados, ou seja, uma maior energia de impacto caracteriza melhor a resistência e o comportamento da amostra (AYDIN & BASU, 2005; BUYUKSAGIS & GOKTAN, 2007).

O tipo de martelo e o intervalo de medição da resistência à compressão da rocha são determinados pela suas características litológicas e microestruturais, pois elas controlam a extensão do dano causado pelo impacto e a magnitude do rebote (AYDIN & BASU, 2005).

As pesquisas desenvolvidas por AYDIN (2009) provocaram a substituição de parte do documento antigo da norma ISRM (1978) sobre ensaio com Martelo Schmidt. O autor reporta que as amostras devem possuir um núcleo com diâmetro mínimo de 54,7mm para o martelo tipo L e 84mm para o tipo N, e devem ter pelo menos 100mm de espessura no ponto de impacto. O cuidado com as dimensões das amostras é essencial para que a energia de impacto não seja dissipada na forma de ondas ou rachaduras, pois os pontos de impacto estão muito próximos dos limites corpos de prova.

De acordo com a ASTM D5873 (2000), deve ser utilizada uma base de aço com no mínimo 20kg para fixação das amostras em formato de bloco. Para amostras de sondagem (cilíndricas), é recomendado que se faça nesta base de aço, uma abertura semicilíndrica com o mesmo raio do testemunho de sondagem (ASTM, 2000). As amostras devem ser colocadas e fixadas na base de aço para garantir total apoio da base da amostra na região de impacto do martelo (AYDIN, 2009).

O ensaio deve ser realizado com o pistão sempre perpendicular à superfície da amostra de rocha, a fim de evitar remoção de lascas e dissipação da energia (AYDIN, 2009). Além disso, BRANDI *et al.* (2015) salientam que os resultados obtidos em direções diferentes da horizontal sofrem ação da gravidade e devem ser normalizados por meio de curvas de correção, que são fornecidas pelo fabricante do equipamento ou padronizadas pela ISRM (1978).

Nos testes realizados em campo há uma maior dispersão de resultados e o valor de rebote médio tende a diminuir. Já em laboratório, as dimensões limitadas das amostras podem trazer problemas devido à geometria, confinamento lateral e rugosidade de pequena escala das amostras, fazendo-se necessário maiores estudos com relação ao uso deste equipamento em laboratório (AYDIN, 2009).

Alterações na rocha e em seus minerais resultam em valores de rebotes significativamente diferentes. A alteração provoca o aumento da heterogeneidade dos

minerais da rocha, que conseqüentemente aumenta a dispersão dos valores de rebote (AYDIN, 2009). Além disso, os resultados obtidos em superfícies com descontinuidades são diferentes daqueles obtidos nas partes intactas do maciço (GUERREIRO, 2000).

Os resultados deste ensaio em juntas rochosas, são influenciados pelas irregularidades das juntas e pela ação do intemperismo, cuja ocorrência dificulta a análise principalmente em profundidade (BARTON, 1973; WILLIAMS & ROBINSON, 1983; OLIVEIRA, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2018).

Os valores de rebote obtidos com Martelo Schmidt são menores para superfícies rugosas em relação às superfícies lisas. Superfícies mais rugosas fazem com que uma parcela maior da energia do ensaio seja dissipada, pois o contato entre a rocha e o martelo não se dá em uma superfície uniforme, ou seja, o pistão aplica o impacto nas rugosidades da rocha, diminuindo a área de contato entre eles.

Por sua vez, a alteração da rocha também provoca uma redução do valor de rebote do Martelo Schmidt (WILLIAMS & ROBINSON, 1983).

2.3.1 Correlações

Uma das maneiras de correlacionar o valor de rebote e a resistência à compressão das rochas é utilizando ábacos e curvas de correlação, que são fornecidos pelos fabricantes dos equipamentos, encontradas nas referências do tema ou padronizadas pela ISRM (1978). A Figura 2.14 apresenta um exemplo deste tipo de ábaco de correlação, proposto por DEERE & MILLER (1966) e adaptada para as unidades internacionais de medida por HOEK & BRAY (1981).

Diversos autores desenvolveram correlações empíricas entre os valores de rebote obtidos nos ensaios de Martelo Schmidt e a resistência à compressão uniaxial e/ou a resistência à compressão de juntas, para diferentes tipos de rocha. Algumas das principais correlações encontradas na bibliografia são apresentadas na Tabela 2.3, junto à descrição do tipo de rocha e dos intervalos de resistência e rebote que foram utilizados em cada estudo. Grande parte destas correlações foram reportadas por AYDIN & BASU (2005).

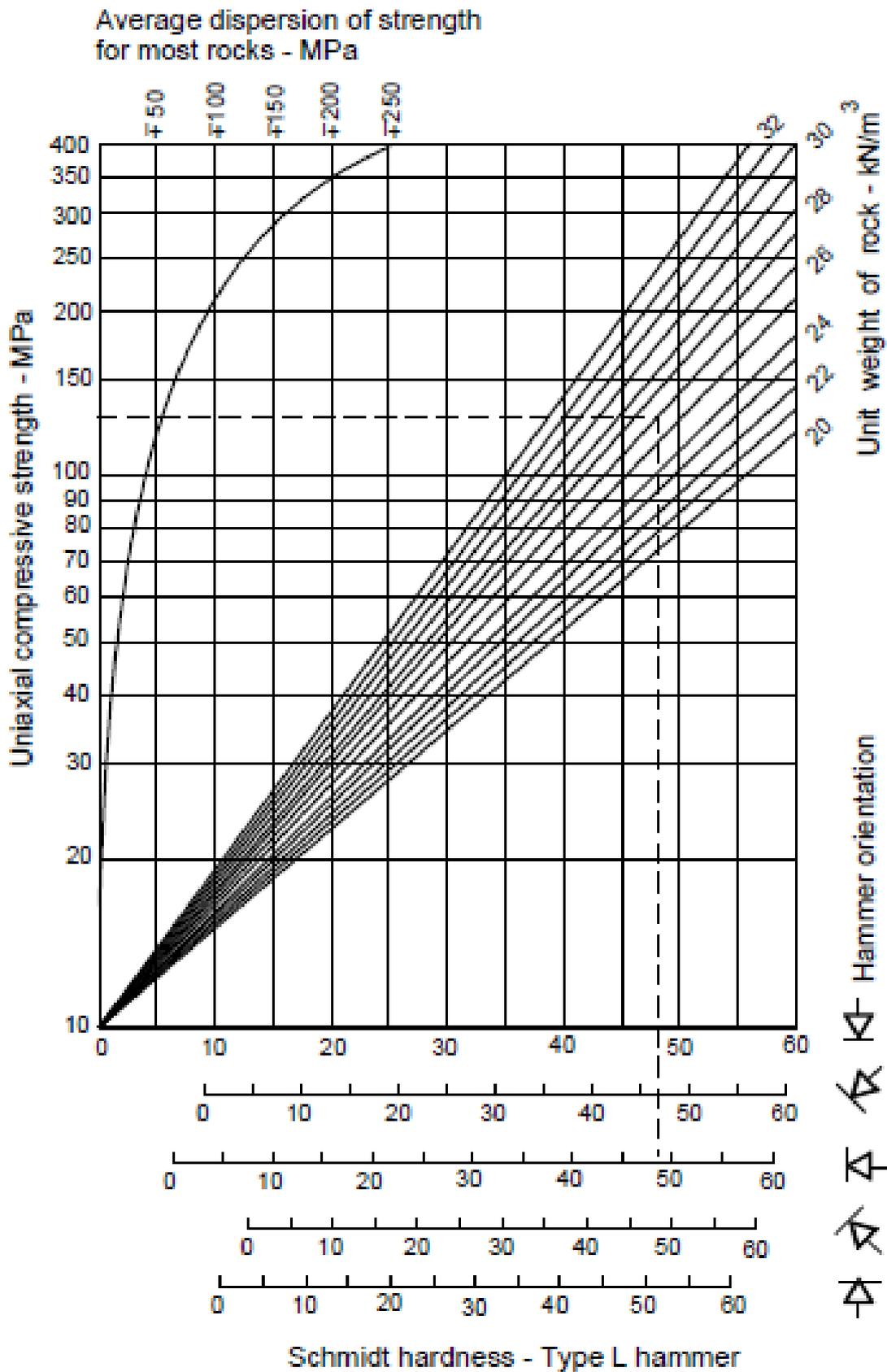


Figura 2.14 – Ábaco de correlação entre o valor de rebote (R) e a resistência à compressão da rocha (DEERE & MILLER, 1966; HOEK E BRAY, 1981).

Tabela 2.3 - Correlações entre o rebote do martelo Schmidt e a resistência à compressão uniaxial e o módulo de elasticidade.

REFERÊNCIA	CORRELAÇÃO	r	TIPO DE ROCHA	σ_C (MPa)	R
Deere & Miller, 1966	$\sigma_C = 9,97 * e^{(0,02 * R_L * \rho)}$	0,94	28 litologias	22-358	23-59
Aufmuth, 1973	$\sigma_C = 0,326 * (R_L * \rho)^{1,348}$	0,80	25 litologias	12-362	10-54
Dearman & Irfan, 1978	$\sigma_C = 0,00016 * R_L^{3,47}$	-	Granito (Grau I a IV)	11-266	23-62
Beverly <i>et al.</i> , 1979	$\sigma_C = 12,74 * e^{(0,0185 * R_L * \rho)}$	-	20 litologias	38-218	-
Kidybinski, 1980	$\sigma_C = 0,52 * e^{(0,05 * R_L + \rho)}$	-	Carvão, folhelho, lamito silito e arenito	-	-
Singh <i>et al.</i> , 1983	$\sigma_C = 2,0 * R_L$	0,86	Arenito, silito, lamito e seatearth	12-73	10-35
Shorey <i>et al.</i> , 1984	$\sigma_C = 0,40 * R_N - 3,60$	0,94	Carvão	3-13	15-40
Haramy & DeMarco, 1985	$\sigma_C = 0,994 * R_L - 0,383$	0,70	Carvão	7-46	12-44
Ghose & Chakraborti, 1986	$\sigma_C = 0,88 * R_L - 12,11$	0,87	Carvão	13-41	28-53
O'Rourke, 1989	$\sigma_C = 4,85 * R_L - 76,18$	0,77	Arenito, Silito, calcário e anidrita	14-215	19-52
Cargill & Shakoor, 1990	$\sigma_C = 3,32 * e^{(0,043 * R_L * \rho)}$	0,93	Arenitos	35-271	27-49
Sachpazis, 1990	$\sigma_C = 0,233 R_L + 15,724$	0,96	33 carbonatos diferentes	22-311	16-60
Xu <i>et al.</i> , 1990	(a) $\sigma_C = 2,98 * e^{(0,06 * R_L)}$	0,95	Micaxisto	9-56	17-53
	(b) $\sigma_C = 2,99 * e^{(0,06 * R_L)}$	0,91	Prasinito	8-145	21-64
	(c) $\sigma_C = 2,98 * e^{(0,063 * R_L)}$	0,94	Serpentino	-	-
	(d) $\sigma_C = 3,78 * e^{(0,05 * R_L)}$	0,93	Gabro	-	-
	(e) $\sigma_C = 1,26 * e^{(0,052 * R_L * \rho)}$	0,92	Lamito	-	-
Gokceoglu, 1996	$\sigma_C = 0,0001 * R^{3,27}$	0,84	Marga	-	-
Kahraman, 1996	$\sigma_C = 0,00045 * (R_N * \rho)^{2,46}$	0,96	10 litologias	-	-
Katz <i>et al.</i> , 2000	$\sigma_C = 2,208 * e^{(0,067 * R_N)}$	0,96	Calcário, arenito, sienito e granito	11-259	24-73
Kahraman, 2001	(a) $\sigma_C = 6,97 * e^{(0,014 * R_N * \rho)}$	0,78	Carbonatos	4-153	15-70
	(b) $\sigma_C = 1,45 * e^{(0,07 * R_L)}$	0,92	Granito (Classe I e IV)	6-196	20-65
	(c) $\sigma_C = 0,92 * e^{(0,07 * R_N)}$	0,94		-	-
Yilmaz & Sendir, 2002	$\sigma_C = 2,27 * e^{(0,06 * R_L)}$	0,91	Gipso	15-30	30-44
Yasar & Erdgan, 2004	$\sigma_C = 0,000004 * R_L^{4,292}$	0,80	Carbonatos, arenito, mármore e basalto	40-112	45-55
Aydin & Basu, 2005	$\sigma_C = 0,917 * e^{(0,067 * R_N)}$	0,94	Granito	-	-
Fener <i>et al.</i> , 2005	$\sigma_C = 4,24 * e^{(0,059 * R_N)}$	0,81	9 litologias	87-203	53-62

Buyuksagis & Goktan, 2007	$\sigma_c = 2,101 * e^{(0,0613 * R_N)}$	0,95	27 litologias	18-292	40-83
Shalabi <i>et al.</i> , 2007	$\sigma_c = 3,201 * R_L - 46,59$	0,76	Dolomito e calcário dolomítico	11-127	23-45
Kiliç & Teymen, 2008	$\sigma_c = 0,0137 * R_N^{2,2721}$		11 litologias	5-235	17-64
Torabi <i>et al.</i> , 2011	$\sigma_c = 0,0465 * R_L^2 - 0,1756 * R_L + 27,682$	0,86	Siltito, arenito e xisto	25-224	16-67
Oliveira, 2017	$\sigma_c = 3,8181 * e^{(0,0567 * R_N)}$		Gnaisse	1-114	14-69

σ_c = resistência à compressão uniaxial (MPa); ρ = massa específica (g/cm³); R_L e R_N = valor de rebote para martelos tipo L e N, respectivamente; e = logaritmo neperiano; r = coeficiente de regressão.

Como as normas técnicas sugeriam somente o uso do martelo tipo L, muitas das correlações da Tabela 2.3 foram elaboradas para este tipo de martelo. Alguns trabalhos foram desenvolvidos com o intuito de estabelecer correlações entre os dois tipos de martelo. AYDIN & BASU (2005) compararam os resultados dos martelos tipo L e N, e propõem a seguinte correlação de rebote:

$$R_L = \frac{R_N - 6,3679}{1,0646} \quad (2.1)$$

onde, R_L é o valor de rebote para o martelo tipo L e R_N o valor de rebote para o martelo tipo N.

O acesso ao empreendimento pode ser feito tanto pelo estado do Rio de Janeiro quanto por Minas Gerais, seguindo pelas rodovias BR-040 ou BR-116 até o entroncamento com a BR-393, em direção aos municípios de Além Paraíba ou Três Rios, respectivamente.

O empreendimento AHE Simplício é composto pela Pequena Central Hidrelétrica de Anta (PCH Anta), onde é feito o barramento do rio, e pela Usina Hidrelétrica de Simplício (UHE Simplício). Após o barramento, parte da vazão é desviada por um circuito de adução que possui aproximadamente 30km de extensão e conta com canais, túneis, reservatórios e diques. Esse circuito é responsável por levar a água até a casa de força da UHE Simplício, onde a geração de energia é feita por meio de uma queda única, que aproveitou o desnível natural local de 115m (MACHADO, 2012).

O barramento do rio foi feito na margem direita, a montante do distrito de Anta, onde foram instaladas uma barragem, um vertedouro e uma casa de força complementar. A barragem foi construída em concreto compactado a rolo (CCR) e possui altura máxima de 29,5m, comprimento de crista de 275m e nível d'água do reservatório na elevação de 251,5m. O vertedouro é composto por três vãos de 15m de largura, equipado com comportas do tipo segmento e junto com a barragem é capaz de escoar 8500 m³/s. A casa de força complementar (PCH Anta) conta com duas turbinas que juntas geram 28 MW de potência.

As obras que interligam o barramento em Anta com casa de força em Simplício têm início após o reservatório de Anta, com um canal escavado em rocha e solo que é seguido de túneis, reservatórios, diques e outros canais, formando um circuito hidráulico de aproximadamente 30km de extensão. A adução da água até a casa de força é feita com auxílio de um canal associado a três túneis forçados, onde a energia é gerada por três turbinas com potência de 101,9MW, garantindo assim uma potência instalada de 305,7MW (VIANA, 2010).

A Figura 3.2 e a Figura 3.3 apresentam as cartas fotogramétricas e os croquis que detalhem melhor o arranjo geral do empreendimento AHE Simplício, sendo possível observar a disposição da PCH Anta, da UHE Simplício e dos canais, túneis, reservatórios e diques que fazem parte do circuito hidráulico da obra. Na Tabela 3.1 estão indicadas as extensões dos canais e dos túneis que interligam a PCH Anta e a UHE Simplício.

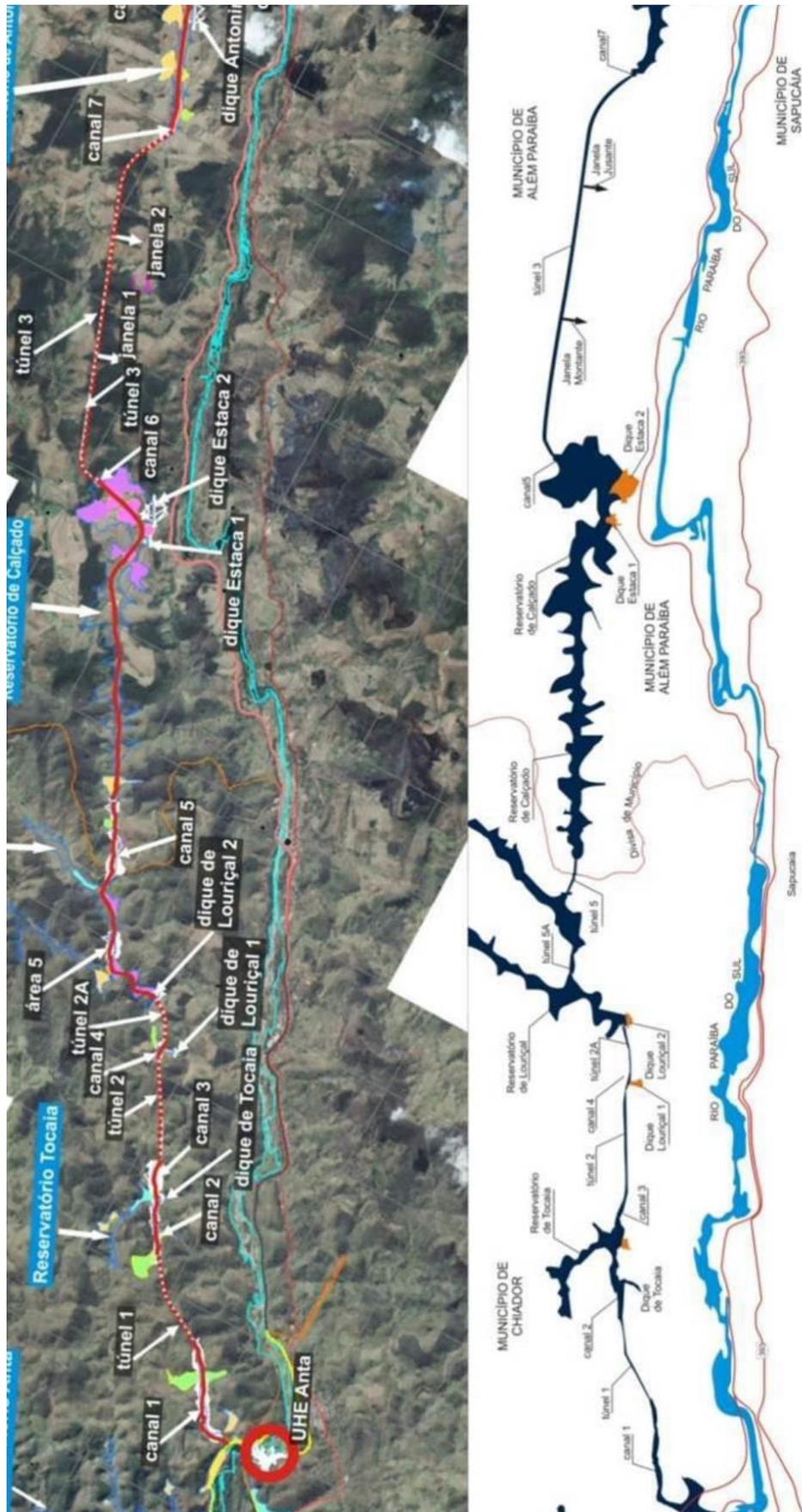


Figura 3.2 - Cartas fotogramétricas das obras de interligação entre a PCH Anta e a UHE Simplício (SALLES, 2013).

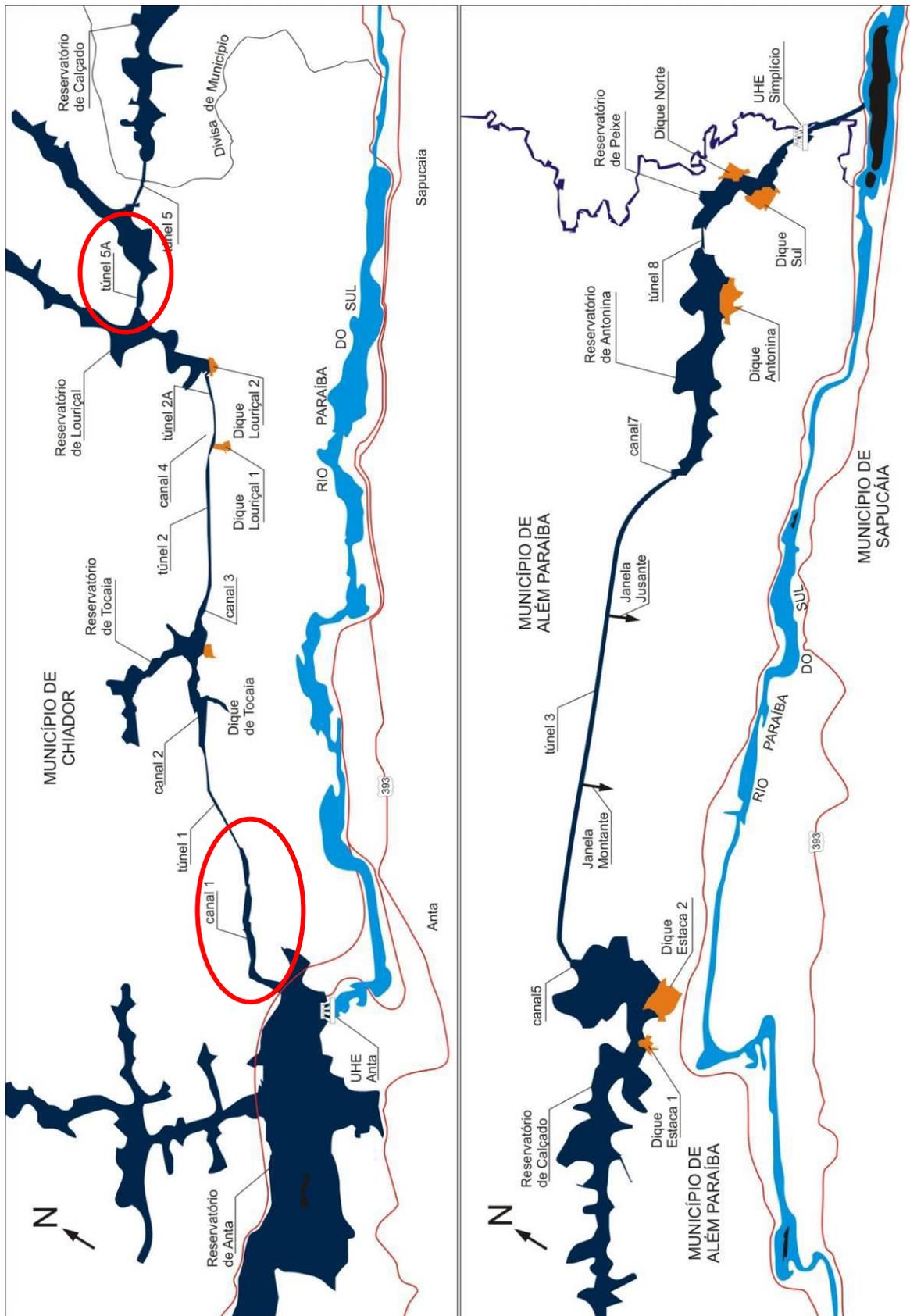


Figura 3.3- Arranjo geral – Obras de Interligação do AHE Simplício (adaptado de MACHADO, 2012).

Tabela 3.1 – Resumo das obras de interligação (MACHADO, 2012).

OBRAS DE INTERLIGAÇÃO	COMPRIMENTO (m)
Canal 1	1905
Túnel 1	1458
Canal 2	1011
Canal 3	565
Túnel 2	1755
Canal 4 – Parte 1	85
Túnel A	782
Canal 4 – Parte 2	105
Túnel A5	502
Túnel C5	1590
Canal 6	73
Túnel 3	6030
Canal 7	202
Túnel 8	580

3.2 GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA

O local onde se encontra o AHE Simplício está inserido na unidade do Lineamento Além Paraíba, também conhecida como Zona de Cisalhamento do Rio Paraíba do Sul. Esta Zona de Cisalhamento apresenta rochas ígneas e metamórficas de alto grau que constituem a parte central da estrutura denominada Faixa Ribeira (DEHLER & MACHADO, 2002; VIANA, 2010).

A Faixa Ribeira se encontra ao sul do Cráton São Francisco e as rochas locais apresentam intenso metamorfismo em função da presença de falhas regionais expressivas na direção nordeste (Figura 3.4). A formação dessa faixa está associada a sucessivas colisões entre terrenos e a margem sul do Cráton São Francisco.

A Zona de Cisalhamento ou Lineamento do Além Paraíba é uma zona de falha transcorrente, e como pode ser observado na Figura 3.5, se caracteriza por seu relevo expressivamente alinhado a aproximadamente N60E (MARCHESI, 2008).

A área se localiza entre as escarpas da Serra do Mar (a sudeste) e da Serra da Mantiqueira (a noroeste), formando um vale tectônico que se insere no alinhamento de cristas do Paraíba do Sul, onde sua morfologia resulta de uma acentuada influência geológica, dando origem a um conjunto de fraturas e falhas que exercem forte controle sobre a rede de drenagem (MARCHESI, 2008).

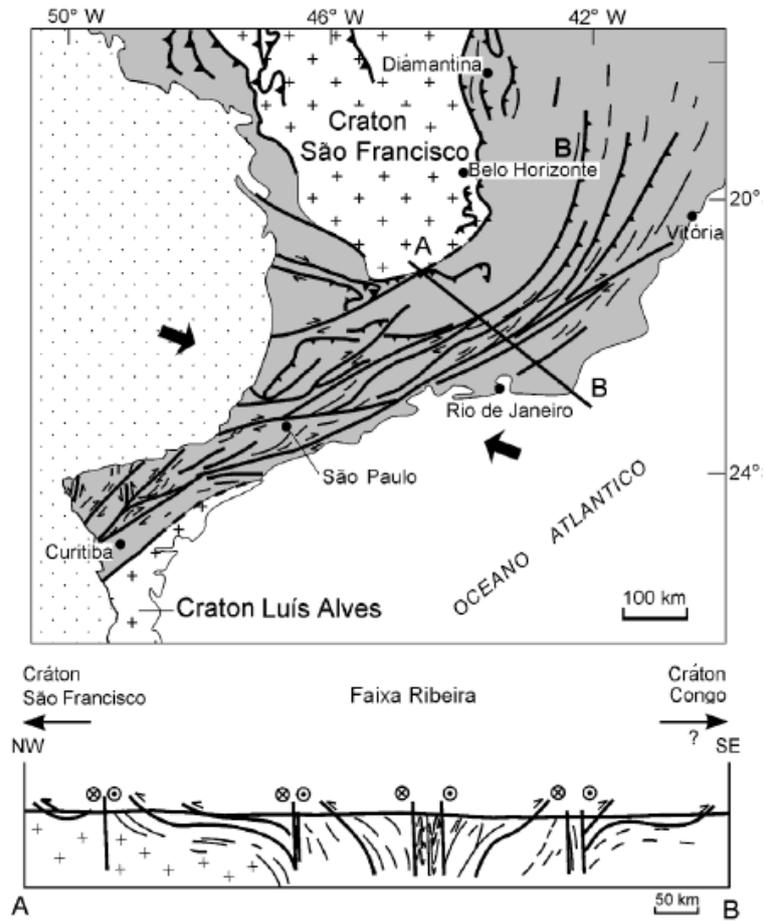


Figura 3.4 - Localização da Faixa Ribeira em Planta e Corte (MARCHESI, 2008).



Figura 3.5 - Alinhamento topográfico marcante da Zona de Cisalhamento do Rio Paraíba do Sul entre os municípios de Além Paraíba e Sapucaia (MARCHESI, 2008).

De acordo com MARINHO (2007), a área do aproveitamento é constituída principalmente por rochas gnáissicas com forte tendência ao desgaste físico devido aos intensos processos tectônicos ocorridos na região e que deram origem a muitas falhas, diaclases e foliações acentuadas.

Quanto ao clima, a região apresenta clima úmido e precipitação anual acima de 1200mm, o que provoca uma intensa alteração nas rochas a partir das fraturas, gerando mantos de intemperismo bastante desenvolvidos, que se tornam mais susceptíveis ao escorregamento e à erosão.

A geologia do entorno do AHE Simplício é composta por substrato cristalino de gnaisses, migmatitos e rochas granitoides, intrudidos por diques de diabásio e recobertos parcialmente por depósitos de solos aluvionares, coluvionares e residuais (VALERIANO, 2006; MARINHO, 2007).

O empreendimento localiza-se entre três unidades litológicas distintas: o Grupo Italva, o complexo Juiz de Fora e o complexo Paraíba do Sul, sendo este último a mais predominante como pode ser visto na Figura 3.6. A região é composta essencialmente por rochas do tipo gnaisses-migmatíticos, as quais foram classificadas por VIANA (2010) em ortognaisses e paragnaisses, como mostrado na Tabela 3.2.

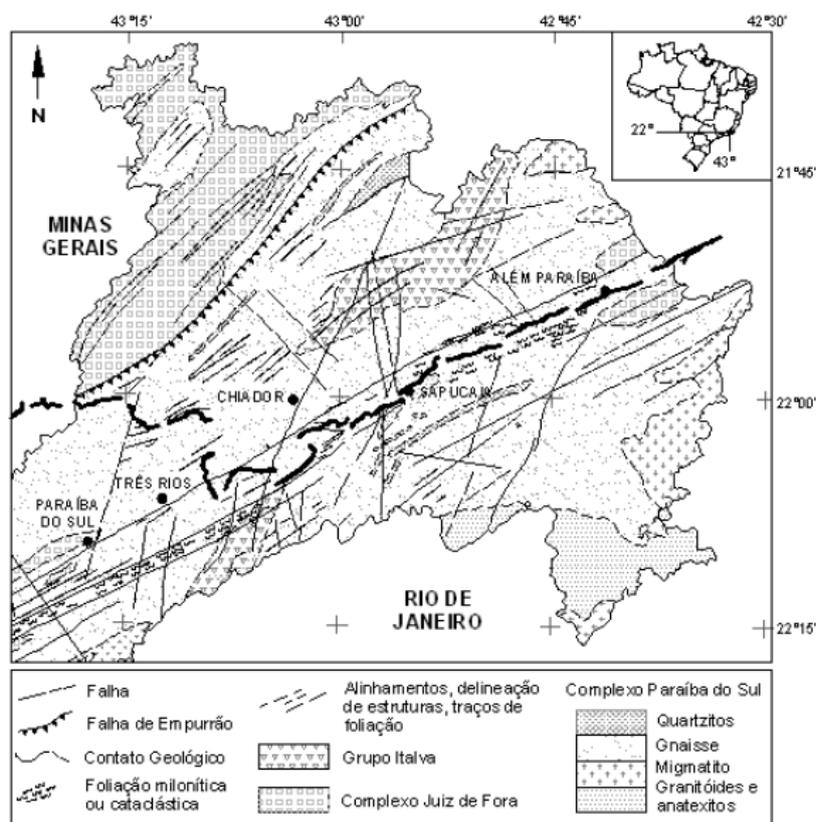


Figura 3.6 – Mapa geológico do Alinhamento de Além Paraíba (MARCHESI, 2008).

Tabela 3.2 - Tipos e características gerais das unidades litológicas encontradas na área do empreendimento AHE Simplício (adaptado de VIANA, 2012).

Litologias	Tipos	Características gerais	Minerais principais
ORTOGNAISSES (Originado de rocha ígnea)	Alto Grau (Complexo Juiz de Fora)	Porfiroblástico, com granulação variando de fina a média, coloração esverdeada e textura milonítica. Encontra-se desde a PCH Anta até a casa de força da UHE Simplício.	Quartzo Plagioclásio Microclina Biotita Hornblenda
	Serra da Boa Vista (Complexo Paraíba do Sul)	Leucocrático a hololeucocrático, com granulação variando de fina a média, textura homogênea e estrutura maciça. Encontra-se na área do Túnel 3 e do Túnel 5.	Microclina Quartzo Plagioclásio Biotita
PARAGNAISSES (Originado do metamorfismo de antigos sedimentos)	Hornblenda Biotita Gnaiss (Complexo Paraíba do Sul)	Porfiroblástico, com granulação variando de fina a média, textura lepidoblástica dada pela biotita. Encontra-se no Túnel 1 e no Dique Antonina.	Quartzo Plagioclásio Cianita Titanita Biotita Hornblenda
	Granada Biotita Gnaiss (Complexo Paraíba do Sul)	Porfiroblástico, com pórfiros de plagioclásio e granada. Encontra-se na maioria dos canais.	Quartzo Plagioclásio Biotita Granada Silimanita

Segundo VIANA (2010), a maior parte dos reservatórios e escavações de canais do circuito hidráulico está localizada no domínio pertencente aos paragnais, com exceção do Canal 1 e parte do Canal 2, que estão no domínio dos ortognais.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS ESTUDADOS

Neste item são descritos os locais do circuito hidráulico de onde foram retiradas as amostras que foram estudadas por MACHADO (2012), SALLES (2013), OLIVEIRA (2017), STEFFENS (2018) e no presente trabalho.

Além disso, são reportados os procedimentos utilizados para caracterização e escolha das amostras de solo e rocha, que foram ensaiados em cada um dos cinco trabalhos citados, considerando a base na descrição feita por cada um dos autores.

Os materiais são apresentados por tipo: Solo residual, reportado e ensaiado por MACHADO (2012); e Gnaiss Simplício, com a descrição do material proveniente de

sondagens, ensaiado por SALLES (2012), OLIVEIRA (2017) e STEFFENS (2018), e as amostras em blocos que foram ensaiadas neste trabalho.

3.3.1 Solo residual e estruturas reliquias

Os estudos do solo residual do AHE Simplício foram realizados por MACHADO (2012) com o intuito de caracterizar as estruturas reliquias por meio de ensaios como granulometria, resistência ao cisalhamento e análises petrográficas, para assim entender o comportamento do solo residual de gnaiss condicionado à presença desse tipo de estrutura.

A área na qual foram coletadas as amostras de solo residual está localizada no desemboque do Túnel 5A, destacada na Figura 3.7. A implantação deste túnel deu origem a um talude de escavação em solo com aproximadamente 70m de altura na região do desemboque (Figura 3.8). A escavação apresenta geometria convexa, com taludes do tipo 1:1,5 (V: H) e alturas de 10 metros, intercalados com bermas de 5m de largura.

Segundo MACHADO (2012), a face do talude de escavação revelou duas estratigrafias de solo, um solo coluvionar com espessura de cerca de 3 metros localizado na superfície e um solo residual jovem subjacente ao colúvio. O solo residual se apresentou bastante heterogêneo e com presença de estruturas reliquias da rocha, como planos de descontinuidades e foliação, que se tornam mais marcantes com o aumento da profundidade. Na Figura 3.9 é possível ver os traços das estruturas reliquias na face do talude de escavação.

Foram coletadas e ensaiadas amostras indeformadas do solo residual com presença de estruturas reliquias e um solo residual sem estruturas. De acordo com o estudo, o solo residual apresentou granulometria variada com porções mais arenosas e outras com predominância de material fino. Além disso, verificou-se a presença de um material preto na superfície de algumas estruturas reliquias, como pode ser visto na Figura 3.10.

Observa-se, na Figura 3.11, que a superfície das estruturas reliquias coletadas de maiores elevações apresentou menor quantidade de material preto, maior quantidade de minerais vermelhos e maior rugosidade, em comparação com a superfície daquelas retiradas de elevações menores, corroborando a ação da alteração ao longo do perfil.

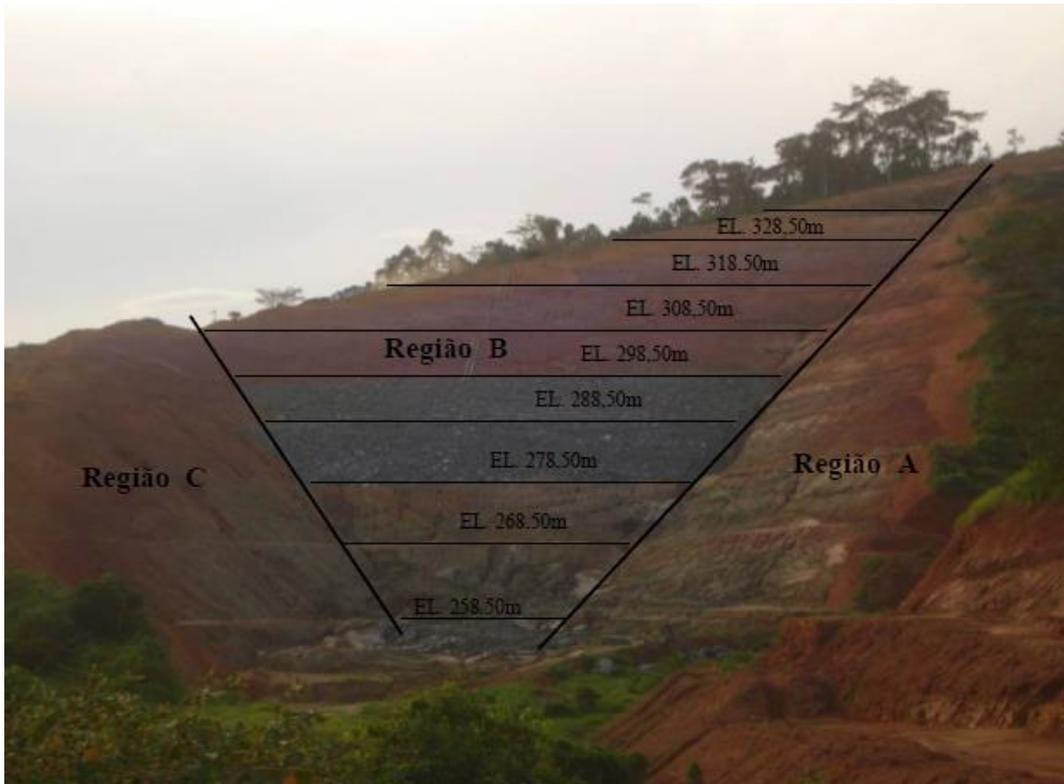


Figura 3.7 – Geometria do talude de escavação do desemboque do túnel 5A (MACHADO, 2012).

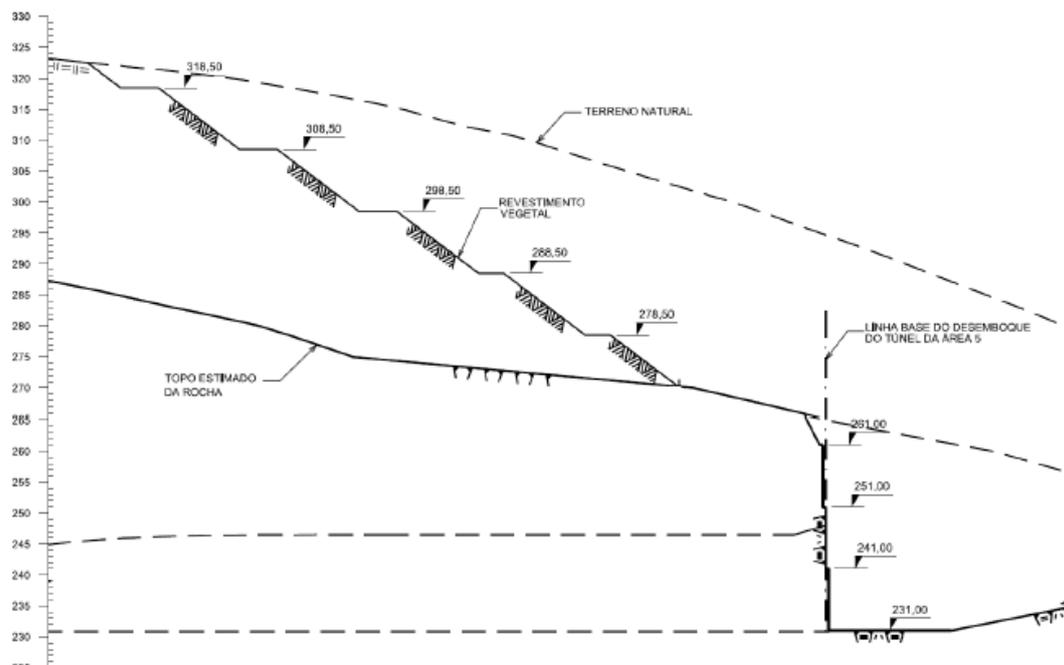


Figura 3.8 - Seção transversal da escavação do desemboque do túnel 5A (MACHADO, 2012).

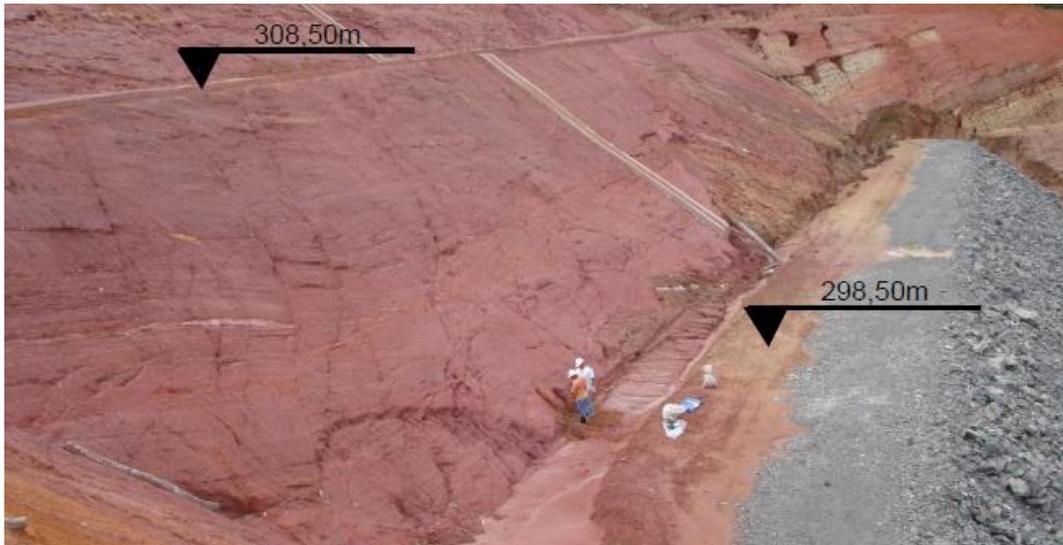


Figura 3.9 – Traços das estruturas reliquiárias na face do talude (MACHADO, 2012).



Figura 3.10 – Estrutura reliquiária com material preto na superfície (MACHADO, 2012).

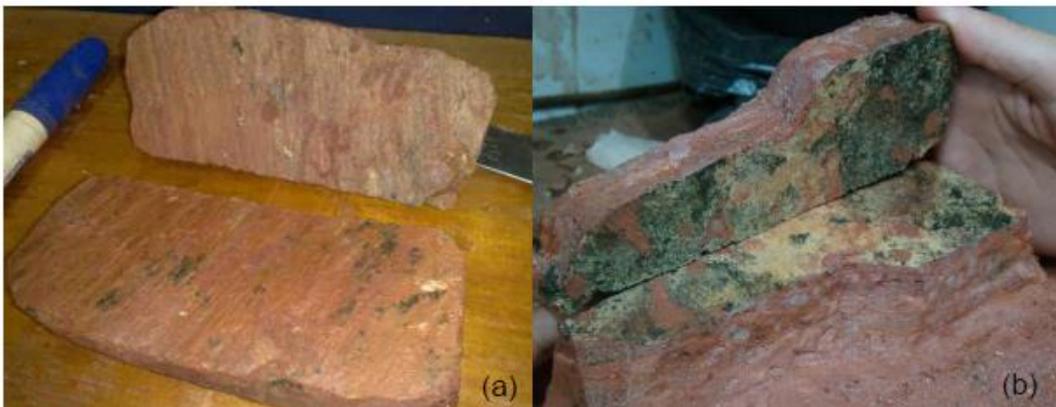


Figura 3.11 – Estruturas reliquiárias: (a) elevação 303,30 (b) elevação 299,25 (MACHADO, 2012).

Os resultados da grande campanha de ensaios de cisalhamento direto mostraram ângulos de atrito 60% inferiores para amostras com estruturas reliquias em relação às amostras sem estruturas, indicando a relevância destas estruturas para a instabilidade do talude.

3.3.2 Gnaisse Simplício

A empresa Furnas Centrais Elétricas S.A. cedeu os testemunhos das sondagens rotativas realizadas na área do empreendimento e as amostras dos blocos para as pesquisas de alterabilidade. Para a seleção das amostras que seriam utilizadas em cada pesquisa foi levado em consideração o nível de alteração da amostra (inalterada e alterada), além da quantidade e da representatividade do material disponível.

As pesquisas de OLIVEIRA (2017) e STEFFENS (2018) foram desenvolvidas com amostras de rocha do AHE Simplício, as quais foram selecionadas e ensaiadas por SALLES (2013). Os estudos realizados na presente pesquisa utilizaram amostras de rocha que foram selecionadas durante as obras de escavação dos canais do empreendimento. As amostras foram coletadas em meados do ano de 2008 e permaneceram armazenadas em recipientes do tipo bombona ao longo dos últimos 10 anos.

- **Amostras de sondagem ensaiadas por SALLES (2013)**

Para simular o efeito do fluxo de água pelos canais do circuito hidráulico, Salles (2013) construiu e utilizou um equipamento de Percolação para Alteração Acelerada, que permitiu provocar em laboratório diversos níveis de alteração das amostras de gnaisse. O material escolhido por SALLES (2013) para a sua pesquisa foram os testemunhos provenientes do furo SR - 657, localizado no emboque do Túnel 1 e ao lado do Canal 1. A escolha deste furo se deu devido a qualidade das amostras desta sondagem, tendo sido consideradas intactas, e a quantidade de amostras disponíveis (oito caixas), que deveriam ser suficientes para promover diversos níveis de alteração nos ensaios de degradação.

SALLES (2013) determinou o valor de RQD (*Rock Quality Designation*) dos furos de sondagem e classificou amostras de testemunhos provenientes de três áreas do empreendimento. A identificação dos testemunhos de sondagem disponíveis, a localização deles e a sua classificação são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Identificação, localização e nível de alteração dos testemunhos de sondagem (SALLES, 2013).

Identificação do Furo	Coordenadas de GPS		Localização	Caixa	Nível de alteração	RQD Médio (%)
	Norte	Este				
SR – 657	7.563.777	707.486	Emboque Túnel 1	1 a 8	Intacto	85
SR – 3043	7.566.875	711.962	Desemboque Túnel 2A	1 a 2	Alterado	34
SR – 3044	7.566.906	711.970	Desemboque Túnel 2A	1 a 10	Alterado	50
SR – 3045	7.566.912	711.998	Desemboque Túnel 2A	1 a 2	Alterado	45
SR – SN°	7.571.812	718.744	Emboque Túnel 3	1 a 2	Intacto	95

A Figura 3.12 a Figura 3.15 apresentam os testemunhos de sondagem recuperados do furo SR - 657. Os valores de RQD obtidos por SALLES (2013) para cada um dos trechos referentes ao avanço da sonda do furo SR-657 estão apresentados na Tabela 3.4.

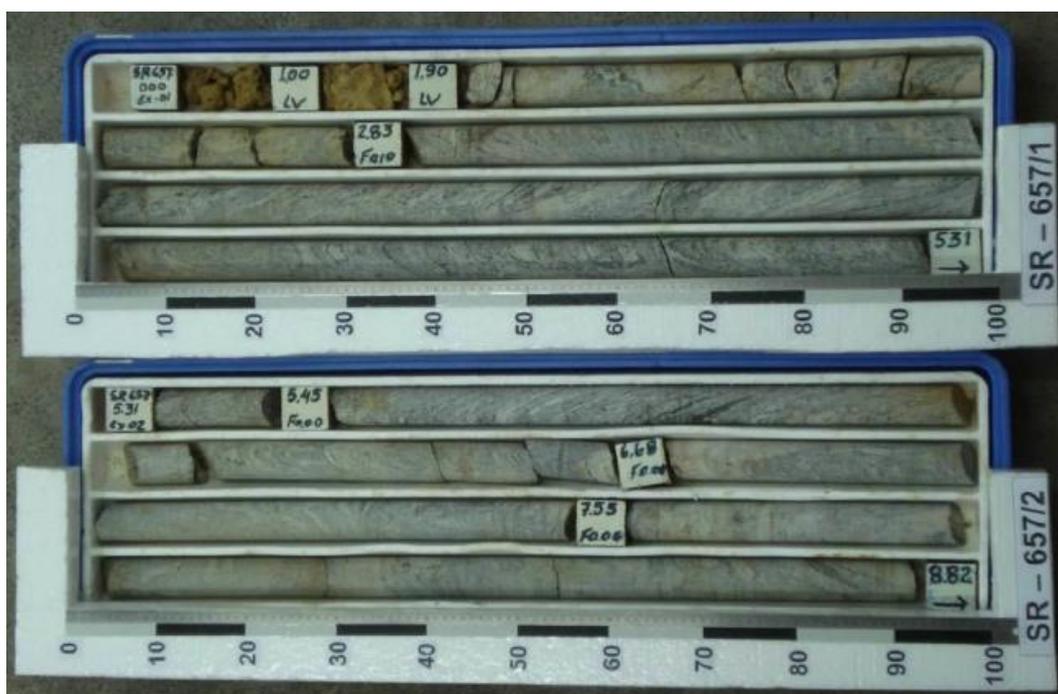


Figura 3.12 – Testemunho recuperado do furo de sondagem SR – 657: Profundidade de 0,00 a 8,82m (SALLES, 2013).



Figura 3.13 – Testemunho recuperado do furo de sondagem SR – 657: Profundidade de 8,82 a 15,96m (SALLES, 2013).

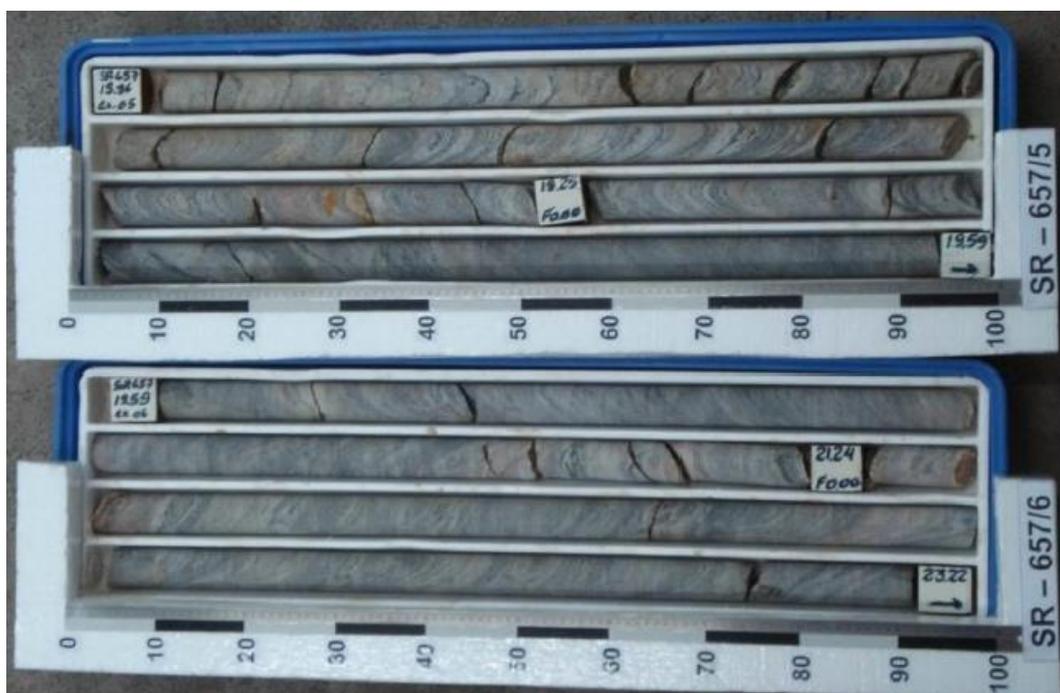


Figura 3.14 – Testemunho recuperado do furo de sondagem SR – 657: Profundidade de 15,96 a 23,22m (SALLES, 2013).

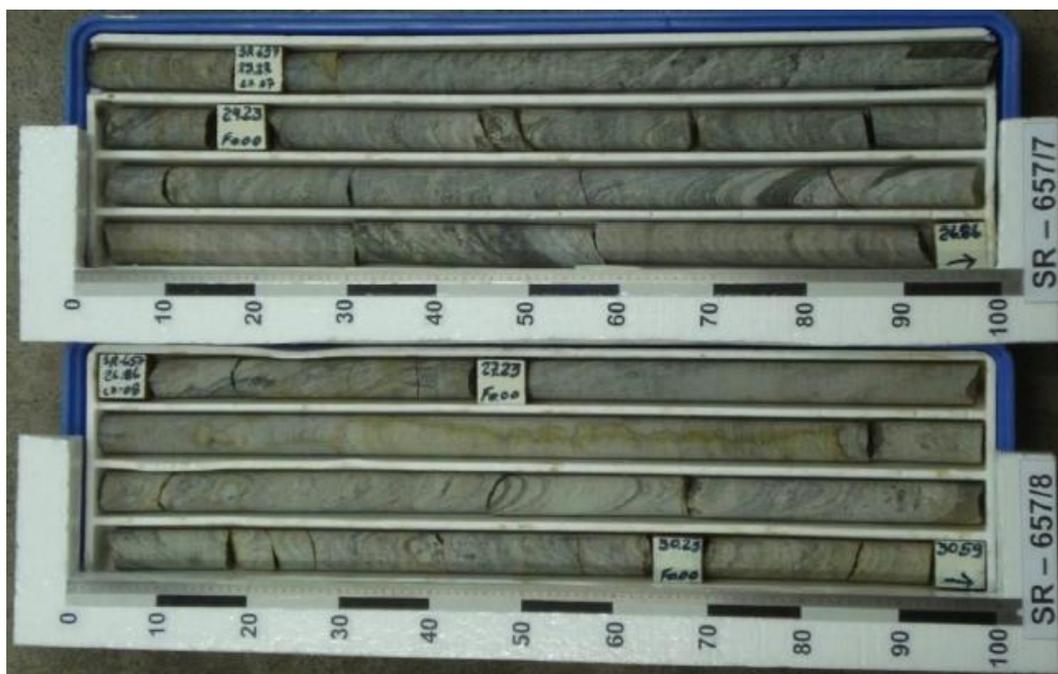


Figura 3.15 – Testemunho recuperado do furo de sondagem SR – 657: Profundidade de 23,22 a 30,59m (SALLES, 2013).

Tabela 3.4 – Valores de RQD para a sondagem SR-657 (SALLES, 2013).

Trecho do Testemunho	Avanço (m)	Comprimento (m)	RQD (%)
1	0 a 1,90	1,90	-
2	1,90 a 2,83	0,93	26
3	2,83 a 5,31	2,48	100
4	5,31 a 5,45	0,14	0
5	5,45 a 6,68	1,23	85
6	6,68 a 7,55	0,87	98
7	7,55 a 8,82	1,27	97
8	8,82 a 9,73	0,91	89
9	9,73 a 10,60	0,87	87
10	10,60 a 12,47	1,87	96
11	12,47 a 15,96	3,49	87
12	15,96 a 19,59	3,63	80
13	19,59 a 21,24	1,65	94
14	21,24 a 23,22	1,98	91
15	23,22 a 24,23	1,01	96
16	24,23 a 27,23	3,00	87
17	27,23 a 30,59	3,36	85

- **Amostras ensaiadas neste trabalho**

As amostras ensaiadas no presente trabalho foram retiradas das áreas das escavações dos canais que fazem parte do empreendimento, principalmente das escavações do Canal 1. A escolha das amostras foi realizada por meio dos seguintes critérios: dimensão, nível de alteração e representatividade do material.

As amostras foram separadas e armazenadas dentro de recipientes fechados (Figura 3.16), que permaneceram ao longo dos últimos 10 anos em um local aberto, em área do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, sob a ação de agentes intempéricos como variação de temperatura e umidade.

Como estas amostras coletadas durante as obras em Simplício podem ter sofrido alteração natural ao longo destes 10 anos de armazenamento, decidiu-se realizar ensaios de resistência com este material para comparação de seu comportamento com o comportamento dos testemunhos de sondagem ensaiados nos demais estudos.



Figura 3.16 – Recipientes utilizados para o armazenamento das amostras coletadas em Simplício.

A descrição dos procedimentos utilizados no presente trabalho para a escolha das amostras ensaiadas, bem como a descrição dos procedimentos de classificação e ensaio destas amostras será realizada posteriormente, no capítulo de metodologia.

3.4 ESTUDOS E ENSAIOS REALIZADOS

Neste tópico será apresentado um breve dos estudos citados anteriormente (MACHADO, 2012; SALLES, 2013; OLIVEIRA, 2017; e STEFFENS, 2018), bem como um resumo dos ensaios realizados e dos resultados obtidos em cada trabalho.

Este resumo se faz necessário, pois um dos objetivos do presente trabalho é fazer uma compilação dos resultados obtidos pelos autores acima citados com os resultados obtidos nesta pesquisa, e por meio de análises e comparações deste compilado, estabelecer uma previsão de comportamento a longo prazo para os materiais disponíveis na área do AHE Simplício.

3.4.1 Ensaios realizados por MACHADO (2012)

Os ensaios realizados por MACHADO (2012) consistiram na determinação da resistência mecânica e na identificação de características físicas, mineralógicas e mecânicas das amostras de solo coletadas no Canal 5 de Simplício. O programa de investigação deste estudo contou com ensaios de granulometria, índices de consistência, índices físicos, cisalhamento direto com reversão, permeabilidade de carga variável e análise mineralógica.

As amostras ensaiadas foram classificadas, de acordo com as definições da ABNT, como solo residual jovem ou saprolito, visto que estes apresentavam características visuais da rocha matriz, como concentrações de materiais brancos e amarelados e orientação preferencial dos minerais como ocorre em rochas de gnaiss.

Os resultados obtidos nos ensaios de granulometria mostraram que o solo residual de gnaiss possui composição silto-arenosa com reduzido percentual de argila e pequenas variações entre as amostras matriz e as amostras com estruturas reliquias.

Nos ensaios para determinação dos limites, apesar da composição silto-arenosa com apenas 9% de argila, a classificação SUCS baseada na carta de plasticidade apontou uma argila muito compressiva, o que pode refletir a elevada atividade das amostras com

média de 3,14. A elevada plasticidade poderia estar associada à grande presença de mica na amostra, pois segundo MACHADO (2012), grandes concentrações de mica podem conferir um “índice de atividade fictício” para o solo, ou seja, um índice de atividade não relacionado à mineralogia da fração argila presente.

A densidade real dos grãos foi determinada de acordo com as recomendações normativas, e os resultados apresentaram pequena variação entre as amostras da matriz de solo e as amostras com presença de estruturas reliquias. Segundo o autor, os valores obtidos convergem para a faixa de valores usual, entre 2,6 e 2,8.

Os ensaios de permeabilidade tiveram por objetivo identificar a influência da estrutura reliquiar na condutividade hidráulica do solo. Os resultados obtidos mostraram uma diferença inexpressiva, indicando que a estrutura reliquiar parece não afetar a permeabilidade do maciço, considerando as linhas de fluxo perpendiculares ao plano da estrutura reliquiar.

As análises mineralógicas foram realizadas em microscópio para análises petrográficas de luz transmitida, tendo sido analisadas 11 lâminas. O resultado das análises apontou uma predominância de materiais de alteração compostos por: sericita, minerais opacos e minerais de cor marrom e avermelhados. A análise mineralógica não foi capaz de identificar diferenças na composição mineral que expliquem a grande variação de resistência entre os ensaios feitos em matriz de solo e os feitos em solo com estruturas reliquias.

Quanto aos ensaios de cisalhamento direto, foram executados 26 ensaios em dois estágios com reversão manual descarregada entre os estágios. Dos 26 corpos de prova ensaiados, 8 deles foram moldados a partir da matriz de solo e os demais foram moldados em solo com estruturas reliquias. Além disso, as amostras foram ensaiadas em condições de saturação natural e submersas, para tensões normais de 25, 50, 100 e 150 kPa.

Os corpos de prova retirados de amostras de solo com estruturas reliquias foram moldados de forma que o plano de cisalhamento do ensaio coincidissem com os planos das estruturas, permitindo assim que fossem obtidos os parâmetros de resistência das estruturas reliquias, que seriam comparados aos parâmetros obtidos para a matriz do solo.

De acordo com MACHADO (2012), o critério de ruptura de Mohr-Coulomb se mostrou representativo para o material ensaiado e as envoltórias foram obtidas a partir de

regressão linear. A partir das envoltórias apresentadas no estudo, foram obtidos os parâmetros de resistência para cada bloco e condição de saturação, estando estes resumidos na Tabela 3.5.

Os critérios e parâmetros de referência utilizados para determinação da tensão cisalhante e deslocamento horizontal no momento da ruptura são apresentados em detalhes no seu trabalho.

Tabela 3.5 – Resumo dos parâmetros de resistência do solo residual de gnaiss (adaptado de MACHADO, 2012).

Amostra	Estágio	Umidade	Tipo de resistência	Parâmetros de Resistência		
				Φ (°)	c (kPa)	r^2
BL1 Matriz	1	Sub.	Pico	31	12	0,97
BL1 Matriz	1	Sub.	Residual	18	0	0,99
BL1 Matriz	2	Sub.	Residual	15	0	0,99
BL1 Matriz	1	Nat.	Pico	39	26	0,99
BL1 Matriz	1	Nat.	Residual	33	0	0,95
BL1 Matriz	2	Nat.	Residual	30	0	0,98
BL1 Reliq.	1	Sub.	Pico	10	0	1,00
BL1 Reliq.	1	Sub.	Residual	9	0	0,98
BL1 Reliq.	2	Sub.	Residual	8	0	0,94
BL1 Reliq.	1	Nat.	Pico	16	2	0,98
BL1 Reliq.	1	Nat.	Residual	15	0	0,99
BL1 Reliq.	2	Nat.	Residual	12	0	0,95
BL5 Reliq.	1	Sub.	Pico	28	0	0,81
BL5 Reliq.	1	Sub.	Residual	27	0	0,86
BL5 Reliq.	2	Sub.	Residual	26	0	0,99
BL5 Reliq.	1	Nat.	Pico	36	7	1,00
BL5 Reliq.	1	Nat.	Residual	35	6	1,00
BL5 Reliq.	2	Nat.	Residual	27	8	1,00

Segundo o autor, as tensões cisalhantes mobilizadas durante o ensaio do Bloco 1 com estrutura reliquiar foram inferiores à metade das tensões mobilizadas nos ensaios

da matriz de solo sob a condição de umidade natural, o que confirmou as baixas resistências deste tipo de estrutura.

A grande diferença entre os parâmetros de resistência obtidos para o Bloco 1 e para o Bloco 5 com estrutura reliquiar se justifica pelo fato da superfície dos corpos de prova do bloco 5 não ser tão lisa quanto a do bloco 1. Além disso, o autor aponta uma diferença na composição mineralógica das estruturas reliquias dos dois blocos, onde as do Bloco 5 apresentariam partículas vermelhas e as do bloco 1 material preto, porém essa diferença não pôde ser confirmada através das análises das lâminas delgadas.

O autor concluiu que os ensaios mostraram a grande influência dos materiais de matriz e reliquiar no comportamento tensão-deformação obtidos nos ensaios, e pouca influência das tensões normais e da condição de saturação dos corpos de prova. No que diz respeito aos parâmetros de resistência, foi constatado no estudo que a submersão dos corpos de prova provoca uma redução destes parâmetros e a redução da resistência por alinhamento de partículas até a resistência residual. Além disso, comparando-se os parâmetros de resistência obtidos para o Bloco 1 Reliquiar e o Bloco 1 Matriz é possível notar a diminuição destes parâmetros devido à presença das estruturas reliquias.

3.4.2 Ensaios realizados por SALLES (2013)

SALLES (2013) desenvolveu um equipamento de percolação para alteração acelerada com o intuito de simular o efeito do fluxo de água pelos canais de adução de Simplício. As amostras colocadas neste equipamento foram submetidas à circulação fechada e contínua de água destilada a uma temperatura de aproximadamente 37°C. As amostras foram submetidas a seis níveis distintos de alteração, correspondentes a 600h, 1200h, 2400h, 4800h, 6000h e 8300h.

Para avaliar a influência da alteração da rocha nas propriedades físicas e mecânicas das amostras estudadas, foram realizadas análises qualitativas das juntas, análises petrográficas, ensaios de absorção e ensaios de compressão uniaxial e diametral. A fim de comparar os resultados obtidos de amostras naturais e amostras artificialmente alteradas, SALLES (2013) adotou alguns índices de alteração tais como de absorção, resistência à tração na fratura primária e secundária, resistência à compressão na ruptura, entre outros. Os resultados mais relevantes obtidos por SALLES (2013) são reportados:

- **Análise Qualitativa das Juntas Rochosas**

SALLES (2013) realizou uma análise qualitativa da alteração das juntas rochosas, para avaliar macroscopicamente a variação da cor, do brilho e da rugosidade da superfície das juntas em função do tempo de alteração da amostra.

Os resultados obtidos indicam que, com o aumento da alteração das juntas, houve redução da quantidade de minerais máficos, redução da rugosidade das juntas, presença de minerais amarelados oxidados e presença de microfissuras visíveis a olho nu na superfície com 8300h de alteração. As modificações citadas podem ser vistas na Figura 3.17, que apresenta a superfície das juntas para cada nível de alteração analisado.

- **Análise Petrográfica**

A caracterização feita por análise petrográfica utilizou lâminas petrográficas delgadas que foram analisadas por microscopia ótica de luz transmitida. Foram analisadas lâminas referentes ao estado natural das amostras (0h de alteração) e aos estados alterados (600, 1200, 2400, 4800, 8300h de alteração), em um total de 12 lâminas delgadas.

A caracterização petrográfica e mineralógica permite avaliar a natureza e a quantidade dos minerais essenciais, acessórios e secundários; o arranjo estrutural e o grau de alteração dos minerais; além do tipo de microfissuração presente nas amostras.

De acordo com a classificação da rocha, o gnaiss Simplício corresponde a um anfibólio-biotita-gnaiss, de granulometria fina e textura granoblástica com orientação dos máficos, e composição majoritariamente félsica.

Com base nos resultados petrográficos obtidos por SALLES (2013), é possível notar que de maneira geral a composição mineralógica não se mostrou muito distinta para os diferentes níveis de alteração das amostras. Porém, foi verificada visualmente uma variação no grau de alteração, principalmente dos minerais máficos.

Os minerais encontrados nas amostras por meio das análises petrográficas estão apresentados na Tabela 3.6, de acordo com o nível de alteração de cada amostra. Os minerais secundários do tipo caulinita, calcita, sericita, clorita e óxido de ferro são produtos de alteração intempérica.



(a) Intacta



(b) 600horas



(c) 1200horas



(d) 2400horas



(e) 4800horas



(f) 8300horas

Figura 3.17 – Superfícies das juntas rochosas em função do tempo de alteração (SALLES, 2013).

Tabela 3.6 – Minerais essenciais, acessórios e secundários presentes na rocha em diferentes níveis de alteração (SALLES, 2013).

Nível de alteração (h)	Minerais		
	Essenciais	Acessórios	Secundários
0		Titanita, zircão e opacos	Sericita, clorita, biotita e óxido de ferro
600		Zircão e opacos	Sericita e caulinita
1200	Quartzo, k-feldspato, plagioclásio,	Allanita, epidoto, zircão e opacos	Caulinita
2400	biotita e anfibólio	Titanita, zircão, muscovita e opacos	Sericita e caulinita
4800		Titanita, zircão, muscovita e opacos	Sericita e caulinita
8300		Allanita, muscovita, zircão e opacos	Calcita, clorita, óxido de ferro, sericita e caulinita

- **Ensaio de Absorção**

De acordo com QUEIROZ (2009) a absorção de água pela rocha pode ser um indicador de seu estado de alteração, visto que os materiais alterados tendem a absorver mais água devido à modificação química de seus minerais essenciais, podendo gerar minerais secundários mais absorptivos.

Os valores de absorção obtidos por SALLES (2013) para as amostras intactas e para as amostras artificialmente alteradas estão apresentados na Tabela 3.7.

Observa-se um aumento de aproximadamente 40% do valor da absorção da rocha submetida a 8300h de alteração com relação ao material no estado intacto.

Tabela 3.7 – Resultados dos ensaios de absorção em corpos de prova cilíndricos do Gnaiss Simplício para diferentes níveis de alteração (SALLES, 2013).

Nível (h)	Nº de Corpos de Prova	Absorção média (%)
0	11	0,15±0,02
600	11	0,13±0,00
1200	11	0,10±0,02
2400	11	0,18±0,02
4800	11	0,18±0,01
6000	11	0,23±0,02
8300	23	0,21±0,02

- **Ensaio de Compressão Diametral (Ensaio Brasileiro)**

O ensaio de compressão diametral, também conhecido como Ensaio Brasileiro, é utilizado na obtenção da resistência à tração da rocha. O ensaio consiste na aplicação de uma carga de compressão ao longo da geratriz de um cilindro de pequena altura (geralmente metade do diâmetro), gerando tensões de tração na região central do corpo de prova, levando-o ao desenvolvimento de uma fratura primária e consequente ruptura.

Os corpos de prova foram preparados para este ensaio com uma relação H/D (altura/diâmetro) de 0,5. Os ensaios de resistência à tração foram realizados considerando-se duas direções de carregamento: uma paralela (PL) e outra perpendicular (PP) à foliação do material rochoso.

A Figura 3.18 apresenta a curva Força vs. Deslocamento de corpo de prova intacto como representativa dos resultados de ensaios de compressão diametral.

A Tabela 3.8 apresenta os valores médios de resistência à tração para cada nível de alteração de amostra. Foram utilizados dois tipos de análise para o cálculo das médias sendo que: no primeiro foram considerados todos os ensaios realizados (σ_{FP1} e σ_{FS1}); e no segundo foi feito o tratamento estatístico dos dados, eliminando valores que variaram muito em relação à média (σ_{FP2} e σ_{FS2}).

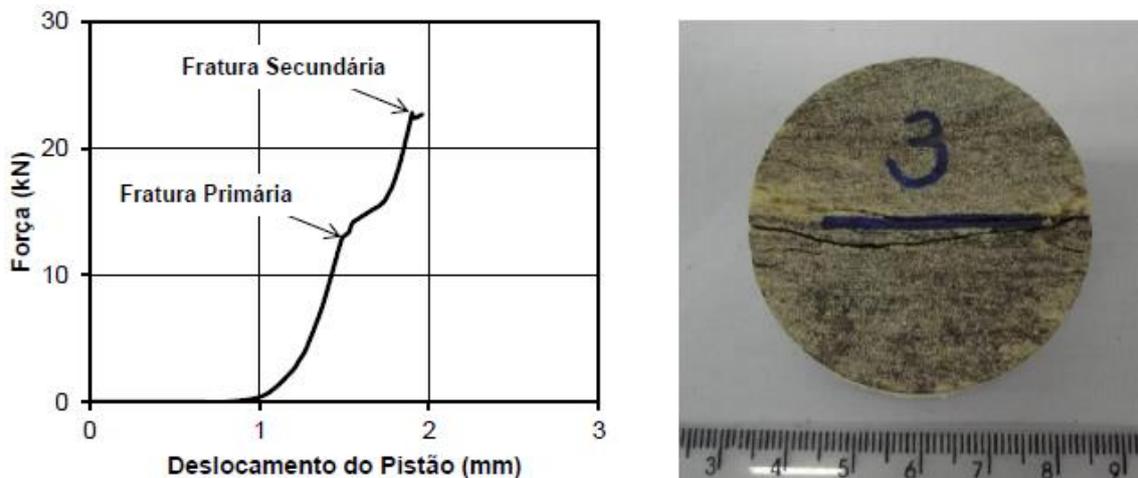


Figura 3.18 – Resultado típico do ensaio de compressão diametral (SALLES, 2013).

Os valores de resistência à tração e as curvas ajustadas a estes valores são apresentados na Figura 3.19.

Tabela 3.8 – Valores médios da resistência à tração referente à fratura primária (σ_{FP}) e secundária (σ_{FS}) em diferentes níveis de alteração (SALLES, 2013).

Nível de alteração	Direção de carregamento	σ_{FP1} (MPa)	σ_{FS1} (MPa)	σ_{FP2} (MPa)	σ_{FS2} (MPa)
Intacto	Paralelo à foliação	8,16 ±0,61	10,75 ±3,24	8,16 ±0,61	8,91 ±0,82
	Perpendicular à foliação	8,85 ±0,04	14,50 ±1,02	8,85 ±0,04	14,42 ±0,60
600h	Paralelo à foliação	8,71 ±0,22	14,52 ±2,13	8,60 ±0,13	15,75 ±0,30
	Perpendicular à foliação	8,95 ±0,18	19,82 ±2,31	8,95 ±0,18	21,07 ±1,16
1200h	Paralelo à foliação	8,30 ±0,16	15,51 ±3,82	8,30 ±0,16	13,72 ±3,14
	Perpendicular à foliação	9,04 ±0,44	21,43 ±4,29	9,04 ±0,44	19,03 ±1,45
2400h	Paralelo à foliação	8,35 ±0,77	15,72 ±2,17	8,35 ±0,77	14,71 ±1,80
	Perpendicular à foliação	9,05 ±0,10	14,25 ±1,43	9,05 ±0,10	14,25 ±1,43
4800h	Paralelo à foliação	8,17 ±0,70	16,34 ±0,55	8,17 ±0,70	16,34 ±0,55
	Perpendicular à foliação	8,76 ±0,22	14,59 ±1,82	8,76 ±0,22	15,58 ±0,85
6000h	Paralelo à foliação	8,62 ±0,19	13,88 ±0,39	8,62 ±0,19	13,88 ±0,39
	Perpendicular à foliação	8,60 ±0,11	13,45 ±1,33	8,60 ±0,11	13,45 ±1,33
8300h	Paralelo à foliação	7,83 ±0,99	15,10 ±2,15	7,83 ±0,99	14,93 ±1,65
	Perpendicular à foliação	8,89 ±0,43	16,36 ±3,42	8,89 ±0,43	16,60 ±1,91

σ_{FP1} : Resistência à tração média para fraturamento primário; σ_{FS1} : Resistência à tração média para fraturamento secundário; σ_{FP2} : Resistência à tração média para fraturamento primário (estatística); σ_{FS2} : Resistência à tração média para fraturamento secundário (estatística).

Segundo a autora, com relação à fratura primária (σ_{FP}) foi possível observar que não houve variação significativa dos valores em função da direção de carregamento (paralelo e perpendicular à foliação) e em função do tempo de alteração. No que diz respeito à fratura secundária (σ_{FS}), foi possível observar que na direção paralela à foliação houve um aumento de σ_{FS} até 2400h de alteração; já na direção perpendicular não se verificou uma variação significativa em função do tempo de alteração.

De modo geral, SALLES (2013) concluiu que a resistência à tração da rocha foi pouco sensível ao procedimento de alteração em laboratório e que o procedimento de ensaio pode ter influenciado nos resultados, visto que durante o ensaio a fratura do corpo de prova é condicionada pelo carregamento e não pelas fraturas existentes, que resultam do processo de alteração da rocha.

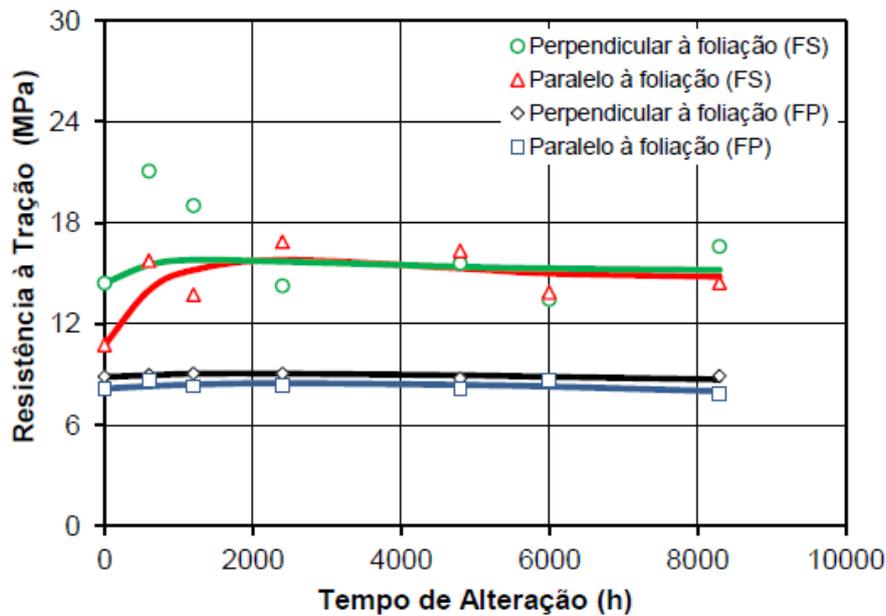


Figura 3.19 – Resistência à tração vs. tempo de alteração em laboratório (SALLES, 2013).

- **Ensaio de Compressão Uniaxial**

O equipamento utilizado nos ensaios de compressão uniaxial faz parte do sistema de ensaios geomecânicos MTS 315.02S, com capacidade de 2700kN de compressão uniaxial. O controle do carregamento do ensaio foi feito através da taxa de deformação radial e com carga de pré-carregamento de 10kN.

A Figura 3.20 apresenta uma comparação entre as curvas tensão axial vs. deformação do material intacto e com 8300h de alteração. É possível observar a mudança de comportamento das curvas e, que com o aumento do nível de alteração ocorre a redução da resistência à compressão uniaxial e o aumento da deformabilidade da rocha.

A Tabela 3.9 apresenta os valores de resistência à compressão uniaxial na ruptura (σ_C) obtidos por SALLES (2013) e os valores médios para cada nível de alteração, calculados segundo duas análises: uma considerando todos os valores obtidos (σ_{C-1}) e outra utilizando apenas os ensaios representativos de cada nível de alteração (σ_{C-2}).

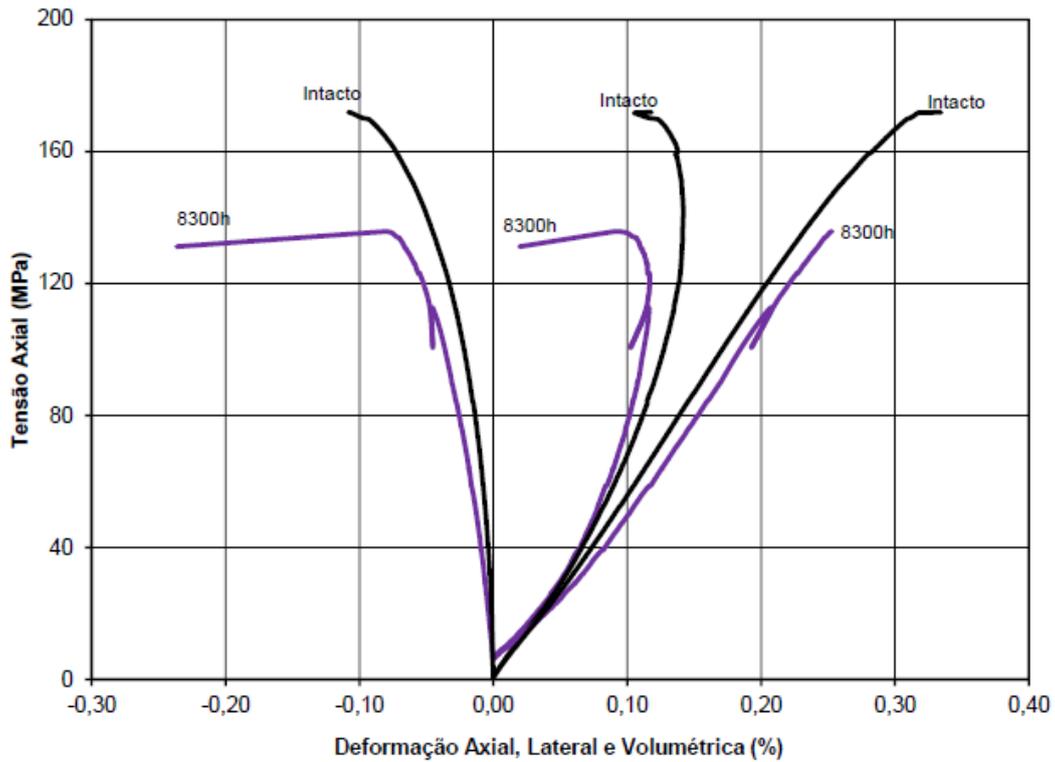


Figura 3.20 – Curvas tensão axial vs. deformação axial, lateral e volumétrica representativas do nível intacto e com 8300h de alteração em laboratório (SALLES, 2013).

Tabela 3.9 – Resistência à compressão das amostras e valores médios em função do nível de alteração (SALLES, 2013).

Tempo (h)	CP	σ_C (MPa)	σ_{C-1} (MPa)	σ_{C-2} (MPa)
0	1	171,87		
	2*	145,49		
	3	152,55		
	4	174,04	153,82	164,81
	5*	118,16		
	6	160,78		
600	7*	164,56		
	8*	133,56		
	9	145,74	147,37	146,25
	10	137,78		
	11	155,22		
1200	12	114,62		
	13	138,42	128,76	134,26
	14	144,28		

	15*	106,76		
	16	139,73		
	17*	174,48		
	18	167,13		
2400	19	173,70	164,98	165,68
	20	159,15		
	21	153,38		
	22*	117,47		
	23*	148,62		
4800	24	162,58	150,23	161,68
	25	151,24		
	26	171,23		
	27	157,36		
	28	149,28		
6000	29*	167,59	148,73	149,35
	30	141,42		
	31*	127,99		
	32	152,65		
	33*	173,87		
8300	34	135,72	144,47	142,79
	35	154,45		
	36*	121,82		
	37	128,33		

* Ensaios considerados como não representativos do nível de alteração.

SALLES (2013) observou que o aumento do nível de alteração provoca a uma redução da resistência à compressão uniaxial - σ_C (Figura 3.21), da tensão do início da dilatação - σ_{ID} (Figura 3.21) e do módulo de Young secante e tangente (Figura 3.22); um aumento da resistência da região I - σ_{RI} (Figura 3.21); e uma baixa sensibilidade do coeficiente de Poisson secante e tangente com o aumento da alteração (Figura 3.23).

De modo geral, o processo de alteração das amostras em laboratório provocou uma redução da resistência à compressão do Gnaisse Simplício e um aumento de sua deformabilidade.

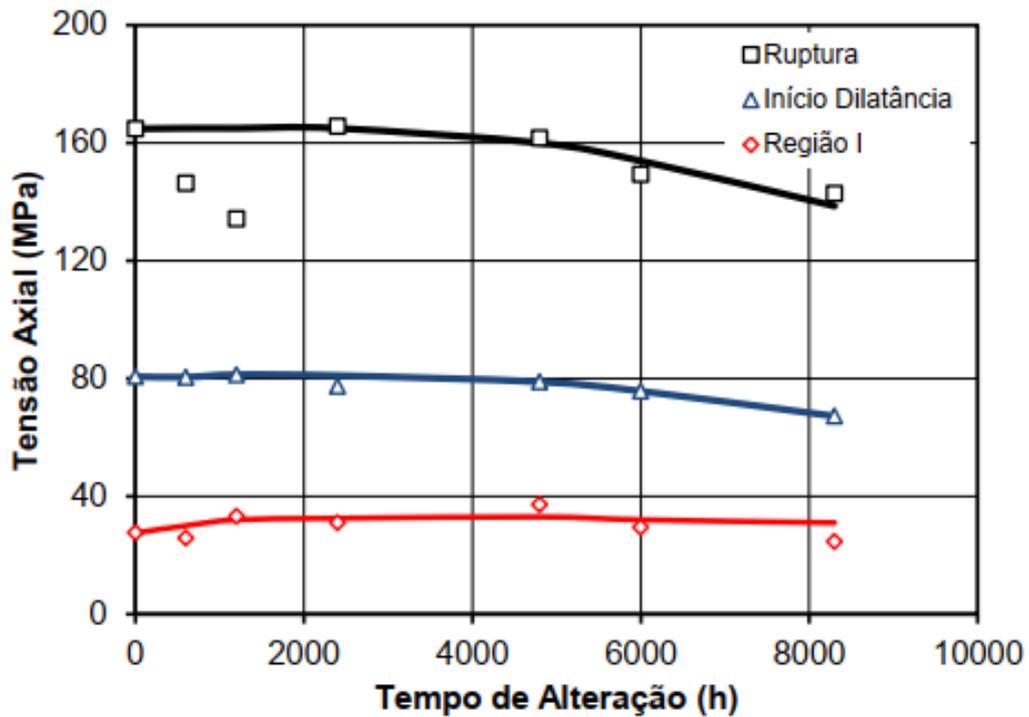


Figura 3.21 – Valores médios dos parâmetros de tensão axial em função do nível de alteração no laboratório (SALLES, 2013).

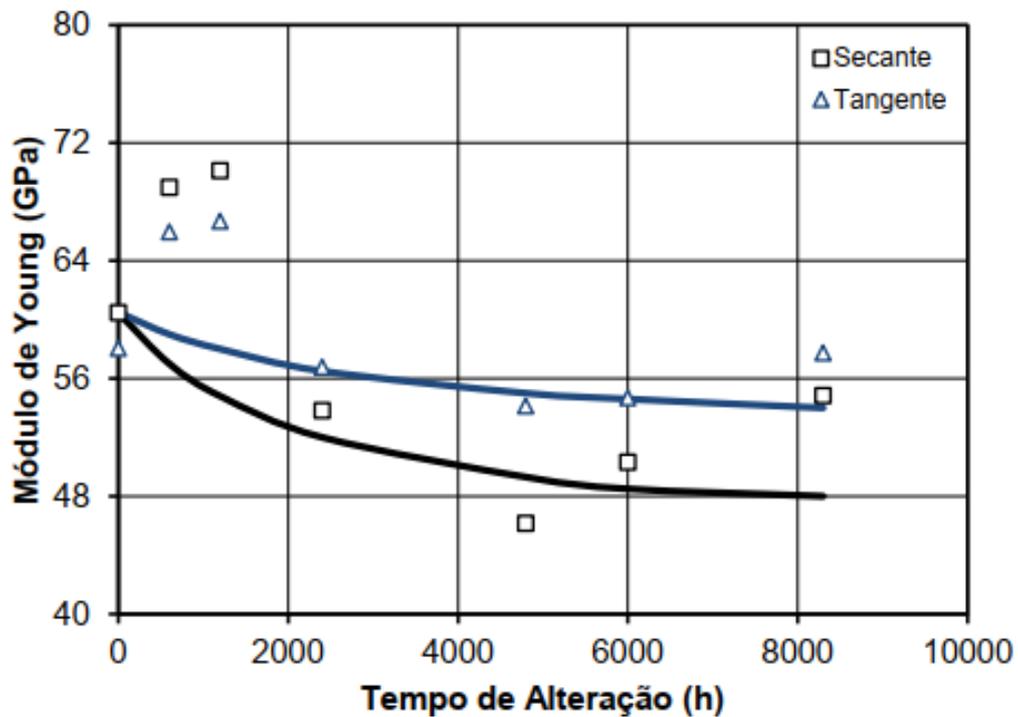


Figura 3.22 – Valores médios dos módulos de Young em função do nível de alteração no laboratório (SALLES, 2013).

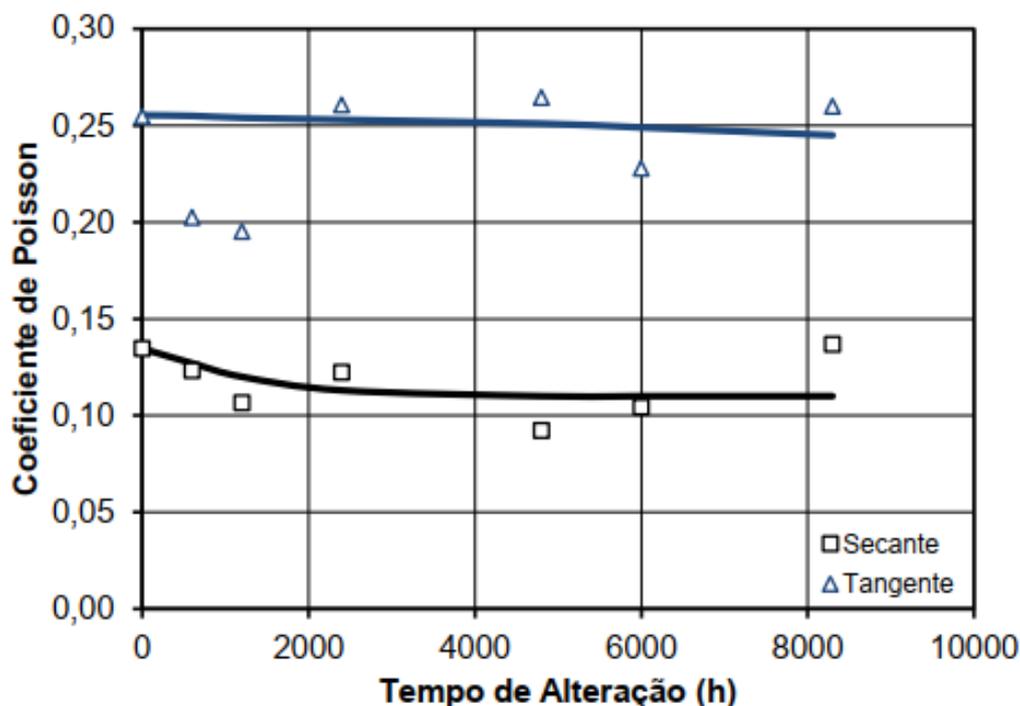


Figura 3.23 – Valores médios dos coeficientes de Poisson em função do nível de alteração no laboratório (SALLES, 2013).

- **Índices de Alteração**

Os índices de alterabilidade permitem uma comparação entre uma determinada característica da rocha no estado intacto e essa mesma característica no estado alterado. Esses índices podem variar de 0 a 100%, sendo 0% correspondente a um material inalterado (com relação ao material de referência) e 100% ao material mais alterado (MAIA, 2001).

SALLES (2013) utilizou os seguintes índices de alteração: de absorção (IA); de resistência à tração na fratura primária ($I\sigma_{FP}$) e secundária ($I\sigma_{FS}$); de resistência à compressão uniaxial ($I\sigma_C$), de tensão no final da Região I ($I\sigma_{RI}$) e de tensão no início da dilatância ($I\sigma_{ID}$); dos módulos de Young secante (IE_S) e tangente (IE_T); e dos coeficientes de Poisson secante ($I\nu_S$) e tangente ($I\nu_T$). Os valores dos índices de alteração em função do tempo de alteração obtidos são apresentados na Tabela 3.10.

Comparando-se os parâmetros do material rochoso no estado intacto com o material de 8300h de alteração, observa-se o aumento da absorção (36,3%), da resistência à tração na fratura primária (PL= 1,9%; PP= 1,7%) e secundária (PL= 27,4%; PP= 5,1%) e da resistência à compressão da região I (11,1%); e a redução da resistência à compressão

na ruptura (15,9%) e no início da dilatação (16,6%), do módulo de Young (Secante= 20,6%; Tangente= 10,7%) e do coeficiente de Poisson (Secante= 18,3%; Tangente= 4,1%).

Tabela 3.10 – Valores dos índices de alteração em função do tempo de alteração (SALLES, 2013).

Nível de alteração	Índices de Alteração (%)											
	IA	I σ _{FP}		I σ _{FS}		I σ _C	I σ _{RI}	I σ _{ID}	IE _S	IE _T	Iv _S	Iv _T
		PL	PP	PL	PP							
600	0,39	1,76	1,09	23,21	6,94	0,11	8,17	0,20	5,71	2,47	5,66	0,14
1200	3,03	2,98	2,13	29,27	8,71	0,11	13,91	0,87	9,35	4,12	10,86	0,53
2400	11,26	3,97	2,19	31,95	8,13	0,10	15,23	0,47	13,98	6,60	16,06	0,92
4800	24,91	2,74	1,10	29,73	6,34	2,92	16,52	2,18	18,44	9,08	18,28	1,71
6000	29,26	1,51	0,08	28,33	5,73	6,61	13,91	6,11	19,44	9,74	18,28	2,49
8300	36,34	1,92	1,72	27,36	5,11	15,91	11,13	16,62	20,60	10,73	18,28	4,06

O parâmetro que se mostrou mais sensível à alteração artificial das amostras foi a absorção e o menos sensível foi a resistência à tração na fratura primária.

Vale ressaltar que apesar da alteração das amostras realizadas no equipamento de percolação para alteração acelerada ter se mostrado satisfatória, a alteração ocorreu no perímetro e nas juntas das amostras, tendo o núcleo permanecido pouco alterado. Portanto, os resultados obtidos refletem o comportamento da parte mais externa (alterada) associada à parte mais interna ainda pouco alterada (OLIVEIRA, 2017).

3.4.3 Ensaios realizados por OLIVEIRA (2017)

OLIVEIRA (2017) utilizou em seu estudo as amostras de testemunho de sondagens selecionadas por SALLES (2013), cedidas pela Furnas Centrais Elétricas S.A. Nesta pesquisa foi desenvolvido um sistema de caracterização e classificação de juntas naturais, com base na resistência destas e por meio de ensaios realizados com Martelo Schmidt.

Os ensaios com Martelo Schmidt foram executados nas juntas naturais de testemunhos sãos e nas que sofreram alteração por processos naturais intrínsecos à área de implantação da barragem. Por meio dos resultados obtidos nestes ensaios, foram

encontrados os valores de resistência à compressão das juntas por correlações do fabricante e de diversos autores e comparados com os valores de resistência à compressão uniaxial de SALLES (2013), obtidos diretamente dos ensaios de compressão em laboratório.

- **Ensaio do Martelo Schmidt**

O equipamento utilizado nos ensaios de OLIVEIRA (2017) foi o Martelo Schmidt HT225, que possui energia de impacto igual a 2,207J e escala de registro de rebote variando de 10 a 100 (Figura 3.24). O ábaco de correlação entre o rebote e a resistência à compressão disponibilizado pelo fabricante do martelo é apresentado na Figura 3.25.

Como o martelo é utilizado em geral para maciços e não para amostras, foi necessário desenvolver um método de fixação das amostras, pois o ensaio em amostras soltas pode acarretar uma determinação baixa ou nula de resistência.



Figura 3.24 –Martelo Schmidt HT225 (OLIVEIRA, 2017).

O sistema consistiu em utilizar uma morsa de bancada para fixação da amostra na horizontal, permitindo que o ensaio com Martelo Schmidt fosse executado na direção perpendicular às extremidades da amostra de testemunho (Figura 3.26a), obtendo a resistência das juntas no topo e na base; e na direção perpendicular à geratriz da amostra (Figura 3.26b), obtendo a resistência superficial lateral do testemunho.

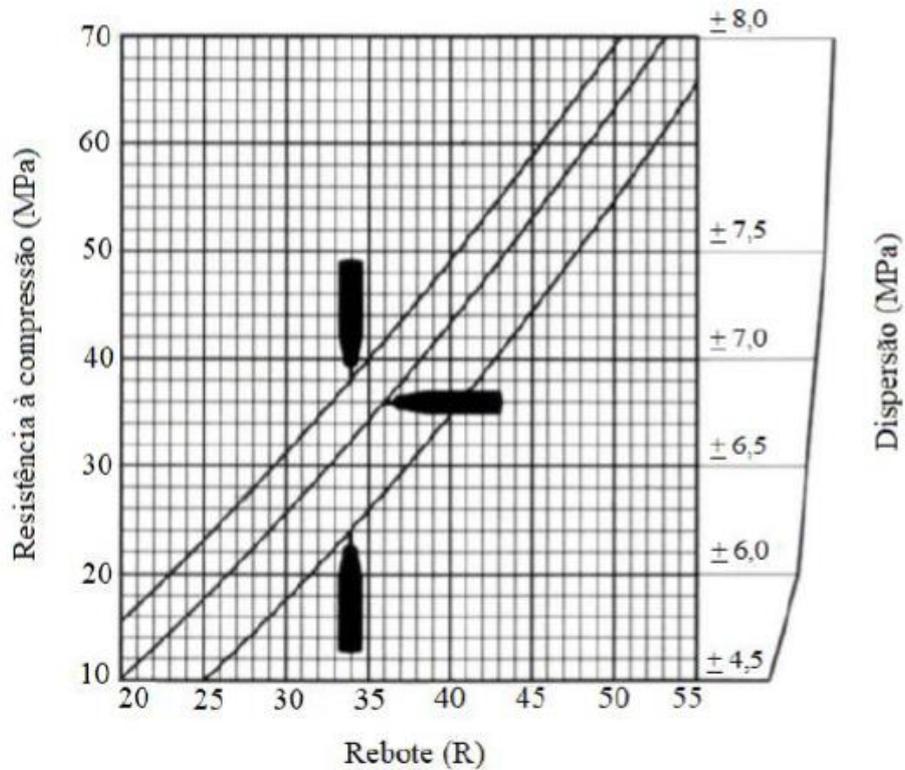


Figura 3.25 – Ábaco de correlação entre o rebote e a resistência à compressão para o Martelo Schmidt HT225 (OLIVEIRA, 2017).

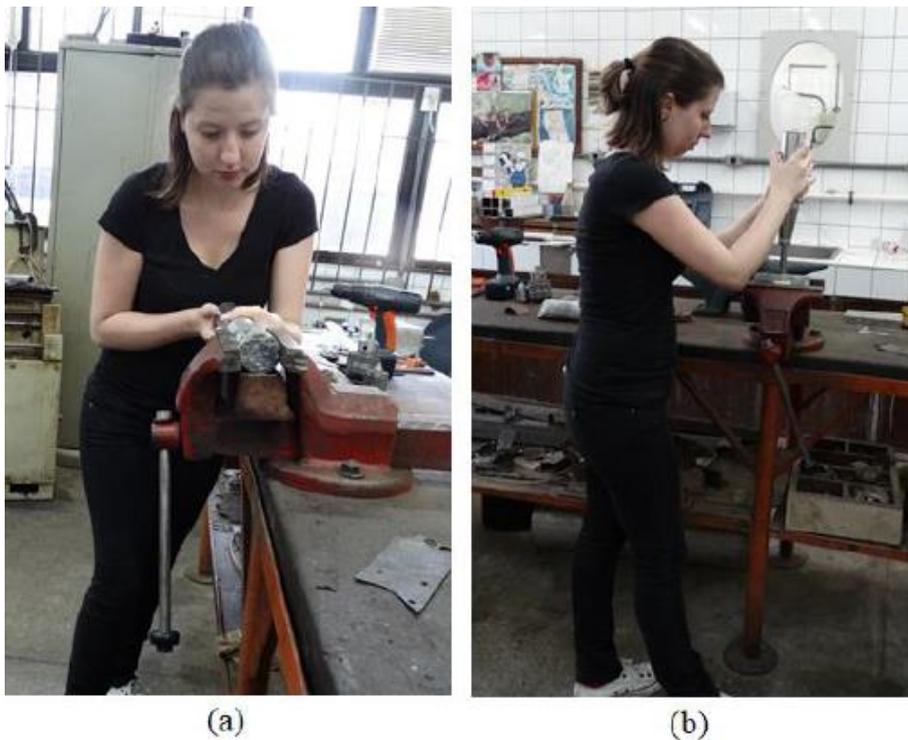


Figura 3.26 – Sistema de fixação da amostra com morsa: (a) medição do rebote das juntas com o martelo na horizontal e (b) medição do rebote da rocha intacta com o martelo na vertical (OLIVEIRA, 2017).

Segundo OLIVEIRA (2017), o método utilizando a morsa apresentou bons resultados e por isso, foi o método usado no ensaio de 40 amostras provenientes do furo de sondagem SR-657. Foram realizadas 10 medições de rebote em cada região da amostra, ou seja, 10 medições no topo, 10 na base e 10 na lateral da amostra, totalizando 30 medições por amostra. Porém, nem sempre foi possível realizar todas as medições devido ao rompimento da amostra, à superfície muito irregular da junta ou à junta da amostra não ser natural e sim originada no processo de manobra e perfuração da sondagem.

As amostras ensaiadas por OLIVEIRA (2017) apresentavam comprimentos variados e diâmetro igual a 4,4cm. A fim de verificar o efeito da alteração natural das amostras nos resultados dos ensaios, as amostras foram classificadas em inalteradas e alteradas.

A classificação em inalterada e alterada foi realizada de forma qualitativa, avaliando a existência de sinais de alteração nas amostras. No caso das juntas, quando alteradas elas apresentam redução da quantidade de minerais máficos e presença de minerais oxidados (amarelados), conforme Figura 3.27. Já no caso da rocha intacta (lateral da amostra), a alteração diminui com a profundidade, além disso, ocorre a redução de máficos (Figura 3.28).

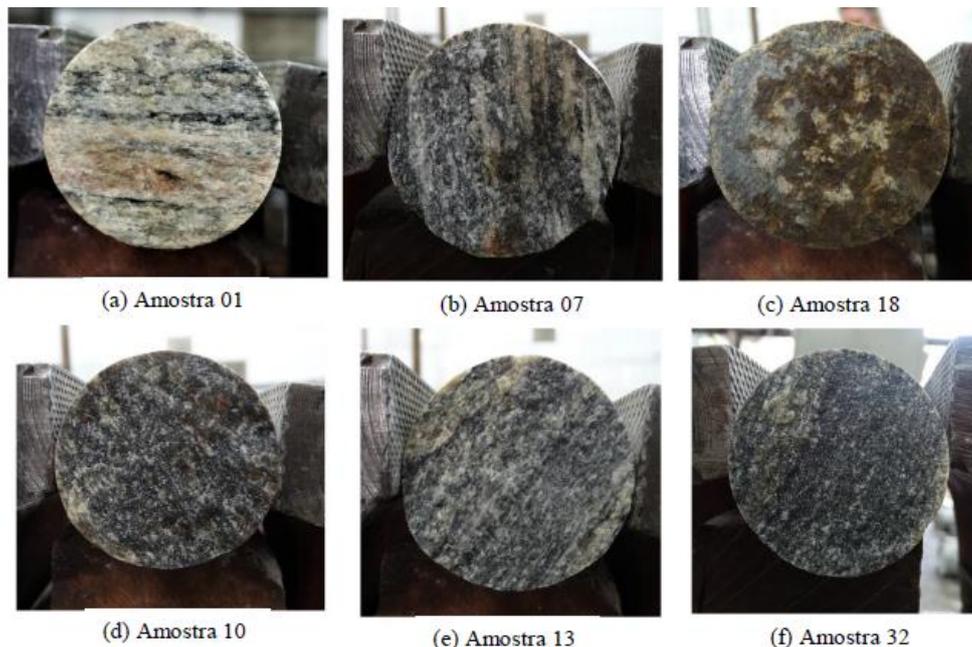


Figura 3.27 – Juntas típicas classificadas em alteradas (a, b, c) e inalteradas (d, e, f) (OLIVEIRA, 2017).

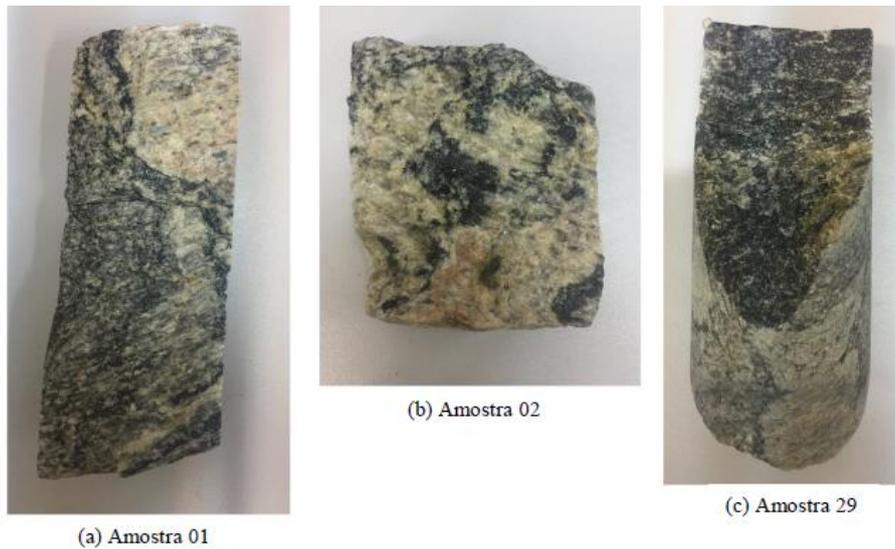


Figura 3.28 – Lateral das amostras classificadas em alteradas (a, b) e inalteradas (c) (OLIVEIRA, 2017).

É possível notar, que o ábaco do fabricante (Figura 3.25), fornece valores de resistência para rebotes máximos de 55. Porém, como foram obtidos valores superiores, OLIVEIRA (2017) optou por construir uma correlação aproximada para o martelo na horizontal (para as juntas) e na vertical (para a rocha intacta). Ambas as correlações foram empregadas na determinação da resistência à compressão das amostras, conforme apresentado na Figura 3.29.

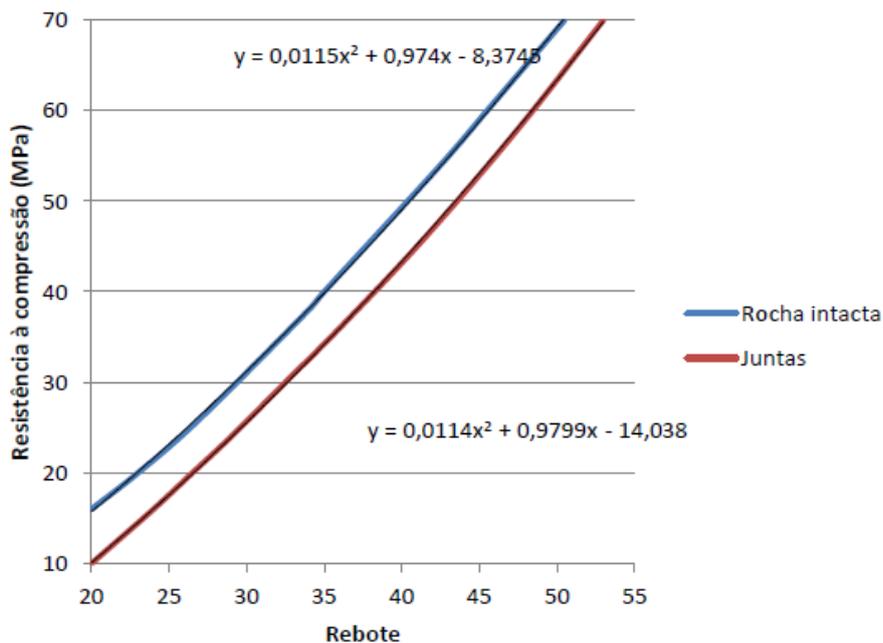


Figura 3.29 – Adaptação do ábaco de correlação disponibilizado pelo fabricante do martelo, com as fórmulas aproximadas para as posições horizontal (juntas) e vertical (rocha intacta) do martelo (OLIVEIRA, 2017).

A partir dos valores de rebote obtidos nos ensaios e das correlações apresentadas na Figura 3.29, foram calculados os valores médios de rebote e resistência à compressão para a junta (média entre os valores obtidos para o topo e para a base) e para a rocha intacta, organizando-as em alteradas e não alteradas. Os resultados são apresentados na Tabela 3.11 e na Tabela 3.12.

As cores utilizadas nestas tabelas indicam o motivo pelo qual a medição do rebote não pôde ser realizada, simbolizando o azul a ruptura das amostras e o verde a superfície muito irregular. Quando da ruptura da amostra resultavam duas partes com comprimento suficiente para realização de novos ensaios em ambas as partes, cada parte era identificada como A ou B.

Tabela 3.11 – Valores médios de rebote e resistência à compressão para as juntas em função do grau de alteração (OLIVEIRA, 2017).

JUNTAS							
ALTERADAS			INALTERADAS				
AMOSTRA		R_m	σ_{cm}	AMOSTRA		R_m	σ_{cm}
1	A	40,6	44,67	10		42,1	47,67
	B	28,3	22,91		11	A	36,7
2*				11		B	36,0
3*					12	A	37,8
4*		25,7	19,47	12		B	32,9
5*		26,7	20,64		13		40,8
6		30,5	26,61	16		A	38,3
7*		27,8	22,67		16	B	43,1
8		21,3	12,06	17			
9		29,7	25,46	19		47,7	58,76
14		28,0	22,52	22			
15*		31,9	29,08	24		35,5	35,12
18		42,6	48,58	25		40,3	44,29
20*				28*			
21	A	33,6	31,89	29			
	B	32,0	28,99		30		36,9
23		34,7	33,94	3			44,4
26*					33		41,4
27		30,3	26,16	34			44,4
31		39,3	42,15		35		37,2
36		38,1	40,27	37			40,0
					38		37,2
				39			37,3
					40		40,5
Média		33,8	32,69	Média			40,1

Tabela 3.12 – Valores médios de rebote e resistência à compressão para a rocha intacta em função do grau de alteração (OLIVEIRA, 2017).

ROCHA INTACTA							
ALTERADAS			INALTERADAS				
AMOSTRA		R_m	σ_{cm}	AMOSTRA	R_m	σ_{cm}	
1	A	47,5	64,32	7*			
	B	43,7	56,36	8	52,0	74,12	
2*				9	48,9	66,93	
3*		34,0	38,30	10	62,7	98,22	
4*		41,5	51,99	11	A	58,5	88,18
5*		47,1	63,58		B	55,6	81,42
6		38,6	46,54	12	A	59,4	90,29
				B	57,6	86,10	
				13		59,5	90,34
				14		62,0	96,37
				15*		60,6	93,04
				16	A	57,0	84,55
					B	59,8	91,33
				17		63,0	98,95
				18		61,3	94,65
				19		54,1	78,16
				20*			
				21	A		
					B		
				22		58,5	88,16
				23		53,9	78,82
				24		46,3	61,60
				25		56,8	84,18
				26*		41,6	52,20
				27		43,0	55,29
				28*		29,0	29,55
				29		60,5	92,79
				30		52,4	74,68
				31		55,3	80,81
				32		54,4	78,82
				33		60,5	92,79
				34		57,7	86,21
				35		62,1	96,72
				36			
				37		59,3	90,09
				38		59,8	91,08
				39		61,7	95,72
				40		58,2	87,39
Média		41,2	51,85	Média		56,7	84,41

Os resultados obtidos mostram uma redução de aproximadamente 26% da resistência à compressão da junta inalterada para a alterada, e de 39% da resistência da rocha inalterada para a alterada. Além disso, comparando os valores de resistência entre juntas e rocha, de acordo com o nível de alteração, houve uma redução de cerca de 37% da rocha alterada para a junta alterada, e de 48% da rocha inalterada para a junta inalterada.

Os valores de resistência obtidos por OLIVEIRA (2017) utilizando o ensaio de Martelo Schmidt foram aproximadamente 49% menores que os valores obtidos por SALLES (2013) por meio do ensaio de compressão uniaxial.

OLIVEIRA (2017) apontou alguns fatores que podem causar dissipação de energia no ensaio do Martelo Schmidt e, por consequência, reduzir os valores de rebote, destacando-se as dimensões do corpo de prova, método de fixação da amostra e direção de impacto do martelo.

Apesar da diferença de resultados, o Martelo Schmidt mostrou-se sensível ao estado de alteração da amostra, o que pode ser observado na Figura 3.30, que apresenta a relação entre resistência à compressão e rebote das juntas e da rocha nos diferentes estados de alteração.

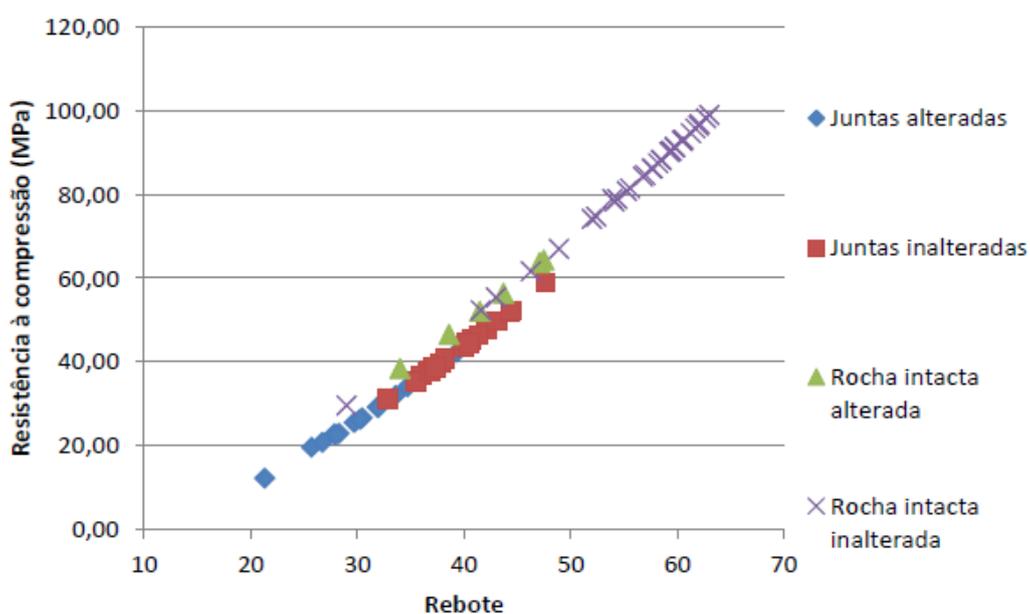


Figura 3.30 – Distribuição das médias de resistência à compressão obtidas para as juntas e para a rocha intacta em função do estado de alteração da amostra (OLIVEIRA, 2017).

OLIVEIRA (2017) também apresenta uma comparação das correlações entre rebote e resistência, publicadas na literatura.

Como a ISRM (1978) sugere que para utilização em rocha seja empregado o Martelo Schmidt do tipo L, muitas dessas correlações são estabelecidas em função apenas deste equipamento. Para que os resultados dos ensaios realizados com um martelo do tipo N sejam utilizados nas correlações de rebote e resistência, alguns trabalhos tentam estabelecer correlações entre os dois tipos de martelo. OLIVEIRA (2017) adotou a relação proposta por AYDIN & BASU (2005), apresentada na Equação (2.1).

A partir dos valores de rebote obtidos, determinou-se a resistência à compressão das juntas e da rocha intacta para cada uma das correlações. Os valores obtidos foram utilizados na construção de curvas de resistência à compressão vs. rebote para cada tipo de amostra e nível de alteração: Juntas alteradas, juntas inalteradas, rocha intacta alterada e rocha intacta sã.

Para uma melhor adequação das curvas de correlação aos resultados obtidos para o Gnaisse Simplício, foram eliminadas as correlações que apresentaram resultados muito subestimados, superestimados, conservadores e/ou não representativos do material.

Após a eliminação das curvas não representativas, foi calculada a média das relações restantes com o intuito de obter uma relação representativa do gnaisse Simplício. A Figura 3.31 apresenta as curvas de correlação compreendidas entre o limite inferior e superior estabelecidos pela autora para cada tipo de material e seu respectivo nível de alteração.

As quatro correlações médias obtidas para juntas e rocha intacta, alteradas e inalteradas, foram reunidas em gráfico para estabelecer uma correlação geral de resistência para o material, em função do rebote do martelo. A partir dessa curva (Figura 3.32), OLIVEIRA (2017) propôs a seguinte correlação entre o rebote do martelo e a resistência à compressão uniaxial para o Gnaisse Simplício:

$$\sigma_c = 3,8181e^{0,056R_N} \quad (3.1)$$

onde, σ_c é a resistência à compressão (MPa).

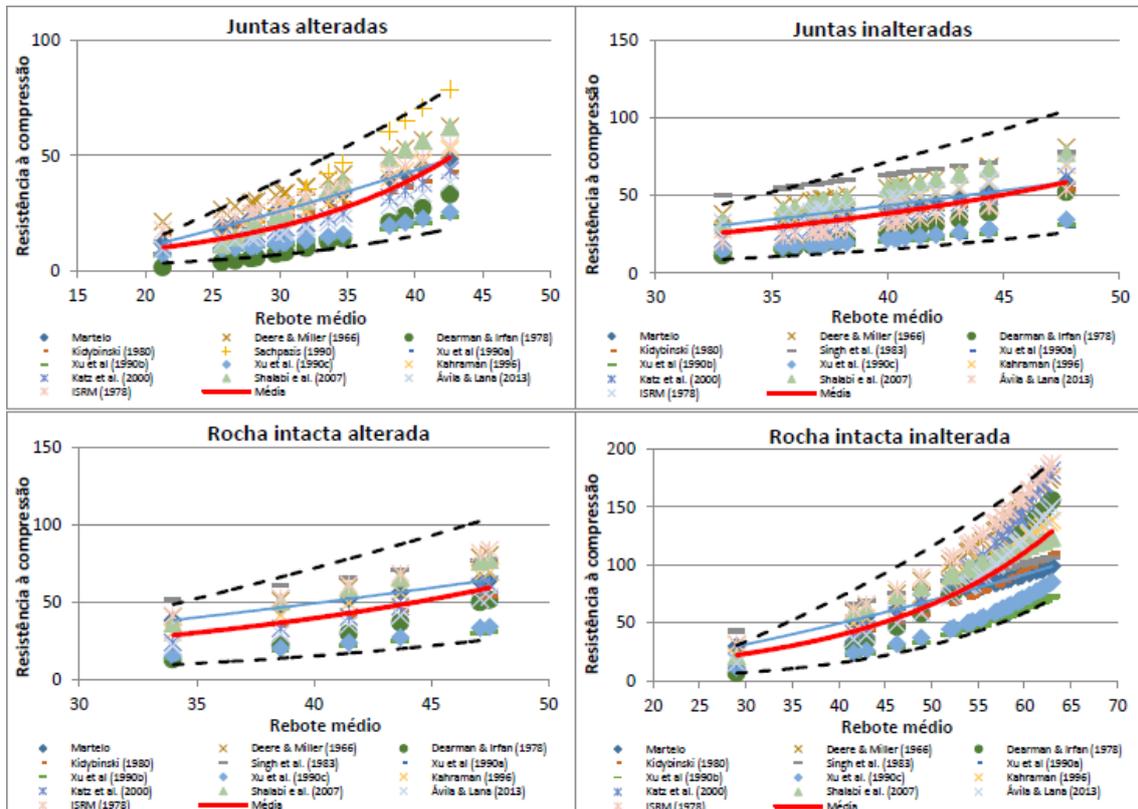


Figura 3.31 – Curvas das correlações entre rebote e resistência à compressão com limites inferior e superior (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

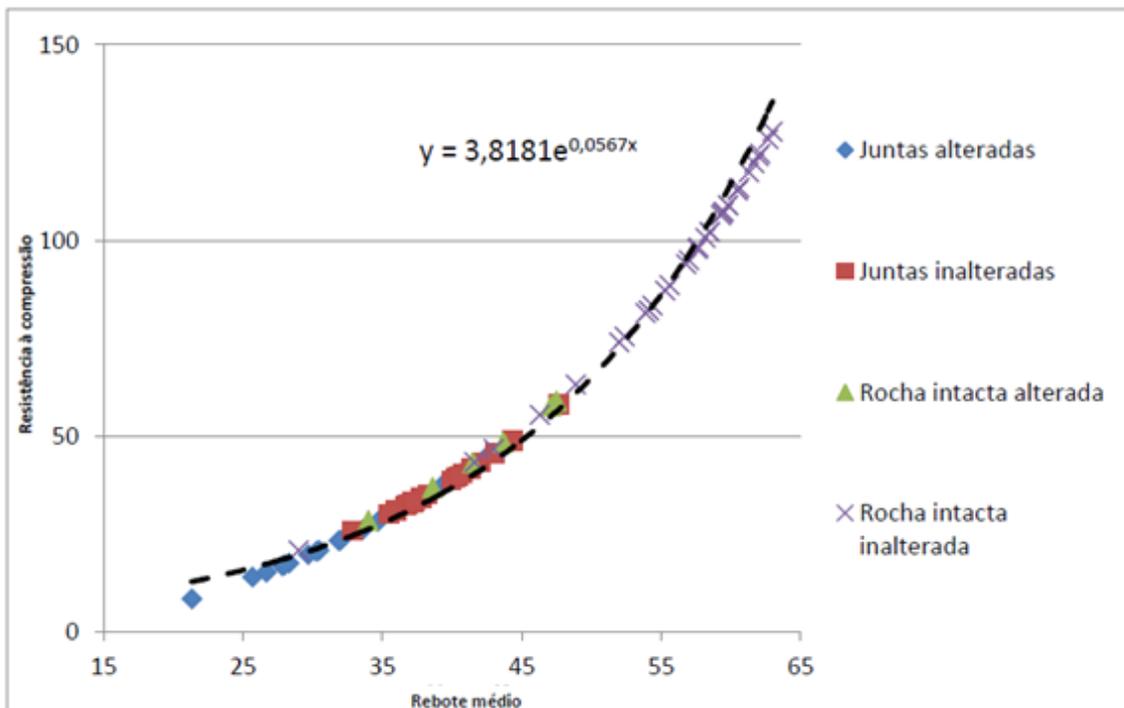


Figura 3.32 – Curvas médias obtidas para junta e rocha intacta alteradas e inalteradas com relação proposta para o Gnaisse Simplício (OLIVEIRA, 2017).

3.4.4 Ensaios realizados por STEFFENS (2018)

O estudo realizado por STEFFENS (2018) teve como objetivo avaliar o comportamento mecânico das juntas rochosas de Simplício, para diferentes níveis de alteração natural e artificial. Foram utilizadas nestes ensaios as amostras obtidas de testemunhos de sondagem retirados do Canal 1 e que foram alteradas em laboratório por SALLES (2013).

Para avaliação do comportamento mecânico das juntas em função do nível de alteração das amostras, foram realizados ensaios de cisalhamento direto das juntas e ensaios de Martelo Schmidt.

Os ensaios de cisalhamento foram realizados em um equipamento de cisalhamento direto do tipo portátil e através de seus resultados foi possível determinar a resistência e o ângulo de atrito das juntas rochosas para cada nível de alteração.

Os ensaios de Martelo Schmidt foram utilizados para determinar por meio dos valores de rebote, uma estimativa de resistência à compressão das juntas em função do grau de alteração da mesma.

- **Caracterização das juntas**

STEFFENS (2018) desenvolveu uma ficha técnica para caracterização das juntas ensaiadas no equipamento de cisalhamento direto. Cada junta foi caracterizada de acordo com: diâmetro da seção transversal do corpo de prova, diâmetro máximo e mínimo da área cisalhante, área cisalhante, distância entre área cisalhante da junta e do material do molde (gesso), análise de fissuras, grau de saturação, teor de umidade, características geológicas relevantes na superfície cisalhante, grau de alteração, coeficiente de rugosidade, classificação qualitativa quanto à cor, granulação, textura, dureza, estrutura.

Com relação ao grau de alteração, a classificação foi realizada de acordo com as recomendações feitas por GUIDICINI & NIEBLE (1983), IPT (1984) E OLIVEIRA (2017). De acordo com estes trabalhos, as amostras podem ser classificadas em quatro ou cinco classes abrangendo o material são até muito alterado.

A classificação das juntas quanto ao grau de alteração foi realizada por comparação entre os grupos de amostras, tomando como referência as amostras intactas. A Tabela 3.13 resume as classificações das amostras.

A partir da classificação das juntas é possível observar que o grau de alteração das amostras aumenta com o aumento do tempo de ensaio no equipamento de percolação. Segundo STEFFENS (2018), houve redução do brilho dos minerais com o aumento da alteração.

Tabela 3.13 – Classificação do grau de alteração das juntas (STEFFENS, 2018).

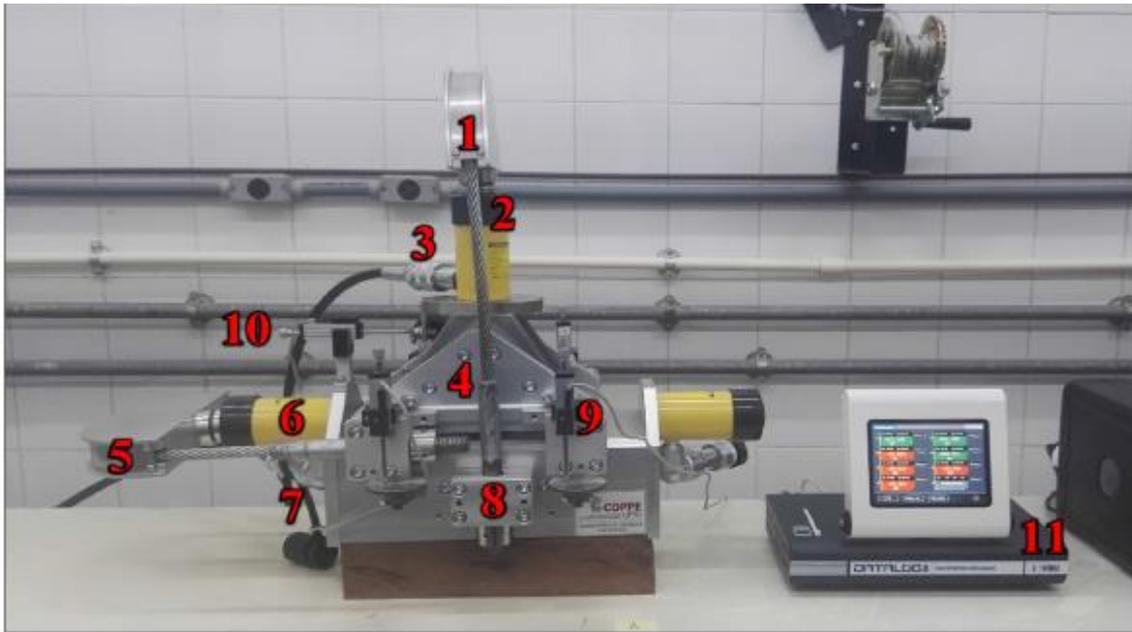
Amostra	Classificação – Grau de alteração		
	Guidicini & Nieble (1983)	IPT (1984)	Oliveira (2017)
0h	Sã a pouco alterada	Sã	Inalterada a pouco alterada
600h	Pouco alterada a medianamente alterada	Sã a medianamente alterada	Pouco alterada a medianamente alterada
1200h	Pouco alterada a medianamente alterada	Sã a medianamente alterada	Pouco alterada a medianamente alterada
2400h	Pouco alterada a medianamente alterada	Sã a medianamente alterada	Inalterada, pouco alterada a medianamente alterada.
4800h	Medianamente alterada	Medianamente alterada a muito alterada	Medianamente alterada
8300h	Medianamente alterada	Medianamente alterada a muito alterada	Medianamente alterada

- **Ensaio de cisalhamento direto**

O equipamento de cisalhamento portátil CONTROLS 45-D0548/D utilizado nos ensaios é composto por uma caixa superior e uma inferior. A descrição detalhada das partes do equipamento é reportada por STEFFENS (2018) e apresentada na Figura 3.33 e na Figura 3.34.

As tensões normal e cisalhante são aplicados por macacos hidráulicos independentes com capacidade máxima de 70MPa, que corresponde a uma força máxima de 50kN.

As caixas superior e inferior são compostas pelos compartimentos nos quais são colocadas as juntas com os moldes de gesso. Estas caixas são acopladas a cilindros hidráulicos que permitem além da aplicação das forças normal e cisalhante, o deslocamento horizontal máximo de 25mm entre as caixas.



Componentes: 1: Coroa vertical para aplicação da força normal; 2: Cilindro hidráulico da força normal; 3: Conexão da mangueira de macaco hidráulico da força normal; 4: Caixa superior de cisalhamento; 5: Coroa horizontal para aplicação da força tangencial; 6: Cilindro hidráulico da força tangencial; 7: Conexão da mangueira de macaco hidráulico da força tangencial; 8: Caixa inferior de cisalhamento; 9: Potenciômetro para medição de deslocamento vertical; 10: Potenciômetro para medição de deslocamento horizontal; 11: *Datalog*.

Figura 3.33 – Equipamento de cisalhamento direto (STEFFENS, 2018).



Componentes: 1: Macaco hidráulico de aplicação de carga tangencial; 2: Célula de carga; 3: Manômetro; 4: Mangueira de conexão; 5: Macaco hidráulico de aplicação de carga normal; 6: Célula de carga; 7: Suporte pneumático de pressão; 8: Manômetro; 9: Mangueira de conexão.

Figura 3.34 – Sistema de aplicação de carga (STEFFENS, 2018).

A preparação das amostras para este ensaio consiste no encapsulamento das mesmas em moldes trapezoidais de gesso compatíveis com as caixas de cisalhamento do equipamento (Figura 3.35).

A medição dos deslocamentos verticais e horizontais é feita com cinco potenciômetros, quatro para medidas verticais e um para medida horizontal. A aquisição de dados é feita pelo *datalog* de modelo CONTROLS 82-P9008.



Figura 3.35 – Contato da junta após encapsulamento em moldes de gesso (STEFFENS, 2018).

Os ensaios de cisalhamento foram executados em três estágios, com tensão normal no primeiro estágio de $0,5\text{kN/A}$, no segundo estágio de $1,0\text{ kN/A}$ e no terceiro estágio de $1,5\text{ kN/A}$, onde A é a área de cisalhamento da junta, que varia para cada corpo de prova. As velocidades médias de ensaio variaram entre $0,2$ a $1,0\text{ mm/min}$.

STEFFENS (2018) determinou os parâmetros de resistência ao cisalhamento das juntas por meio de análises das curvas tensão-deformação e envoltórias por regressão linear adotando-se o critério de Mohr-Coulomb, para cada nível de alteração.

As Figura 3.36 e Figura 3.37 apresentam as curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal e a envoltória de resistência, respectivamente, para uma junta no estado intacto. Um resumo dos parâmetros de resistência obtidos por STEFFENS (2018) é apresentado na Tabela 3.14.

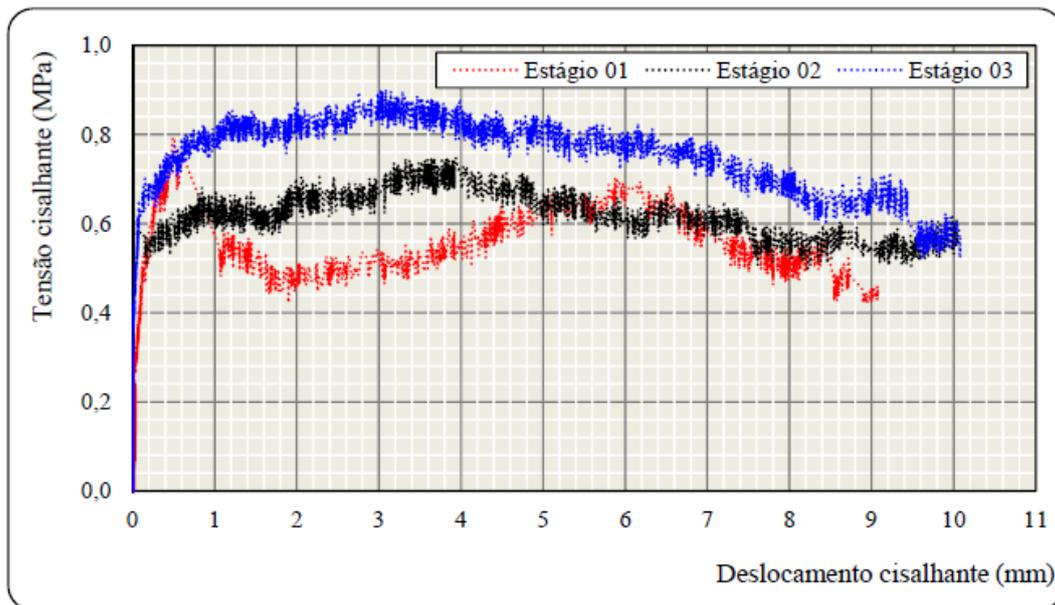


Figura 3.36 – Curvas tensão cisalhante vs. deslocamento horizontal – Junta 0h-2 (STEFFENS, 2018).

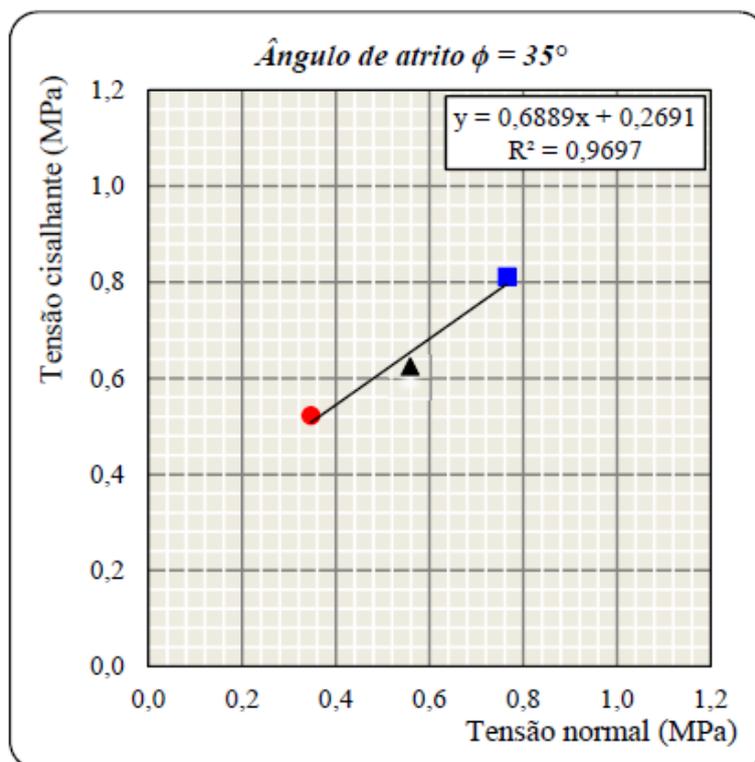


Figura 3.37 – Envoltória de resistência – Junta 0h-2 (STEFFENS, 2018).

Por meio dos resultados obtidos por STEFFENS (2018), nota-se que existe uma tendência de redução dos valores de ângulo de atrito com o aumento do nível de alteração das juntas, e esta redução se mostrou igual a 6° .

Tabela 3.14 – Classificação do grau de alteração das juntas (STEFFENS, 2018).

Grau de alteração	Ângulo de atrito	Ângulo de atrito médio
0h	35°	35°
	34°	
600h	31°	33°
	34°	
1200h	35°	36°
	37°	
	37°	
2400h	37°	37°
	36°	
	37°	
4800h	34°	32°
	33°	
	28°	
8300h	31°	29°
	30°	
	27°	

- **Ensaio de Martelo Schmidt**

O equipamento utilizado nos ensaios de STEFFENS (2018) foi o mesmo utilizado por OLIVEIRA (2017), ou seja, o Martelo Schmidt HT225 do tipo N, com energia de impacto de $2,207J \pm 1J$ e amplitude de rebote de 10 a 100.

As amostras foram ensaiadas utilizando a mesma metodologia de OLIVEIRA (2017), ou seja, as amostras foram fixadas em uma morsa de bancada, com a junta a ser ensaiada na posição vertical e o martelo na posição horizontal.

Foram ensaiados 47 corpos de prova, tendo sido realizadas 12 medições de rebote na face de cada uma das juntas. Dentre as amostras ensaiadas, 17 corpos de prova foram ensaiados apenas com o Martelo Schmidt e 30 foram ensaiados com o Martelo Schmidt após o ensaio de cisalhamento direto.

Os valores de rebote obtidos nos ensaios com Martelo Schmidt estão resumidos e apresentados na Figura 3.38. Observa-se a tendência de redução dos valores de rebote com o aumento do nível de alteração das juntas, porém há também uma grande dispersão de valores para alguns níveis.

Sendo assim, foram traçados os limites superior e inferior dos valores de rebote, os quais abrangem 92% dos resultados e possuem intervalo de valores de rebote igual a $\Delta R_{GA}=32$.

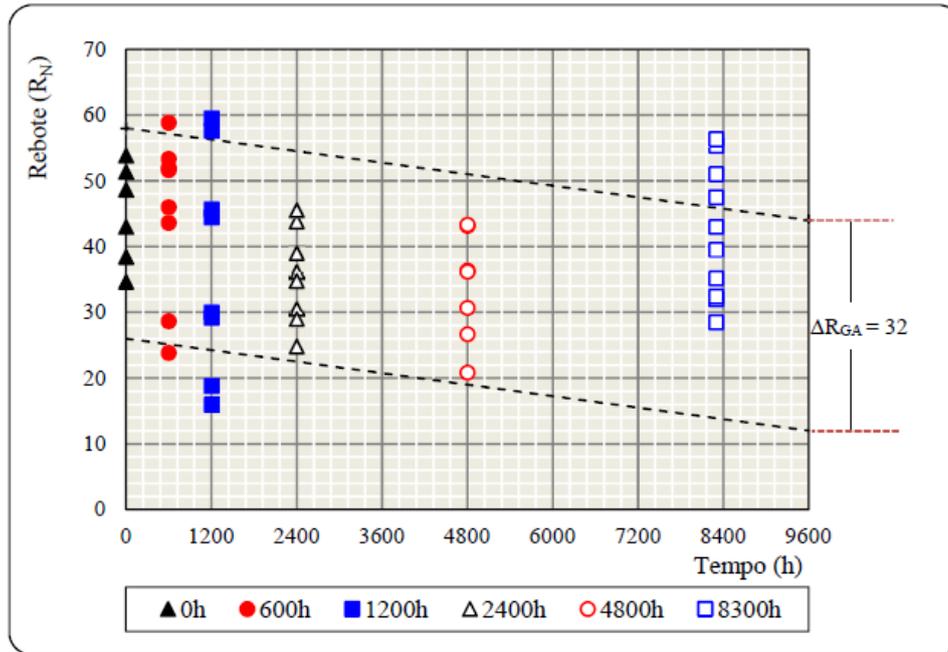


Figura 3.38 – Valores de rebote em função do grau de alteração das juntas (STEFFENS, 2018).

STEFFENS (2018) optou por utilizar apenas seis correlações entre rebote e resistência à compressão das juntas, ao invés de utilizar diversas correlações como fez OLIVEIRA (2017).

A equação adotada por STEFFENS (2018) para corrigir os valores de rebote obtidos com Martelo Schmidt do tipo N para o martelo tipo L, foi a proposta por AYDAY & GÖKTAN (1992):

$$R_L = -1,003 + 0,769R_N \quad (3.2)$$

Para análise da resistência à compressão das juntas em função do rebote obtido nos ensaios, STEFFENS (2018) considerou cada nível de alteração e os valores de rebote em cada uma das correlações adotadas, conforme apresentado na Figura 3.39 e Figura 3.40.

A partir dos valores obtidos nas correlações de rebote e resistência, foi possível notar novamente, que os valores de resistência à compressão obtidos em ensaios de compressão uniaxial são superiores aos determinados por ensaios com Martelo Schmidt (Figura 3.41).

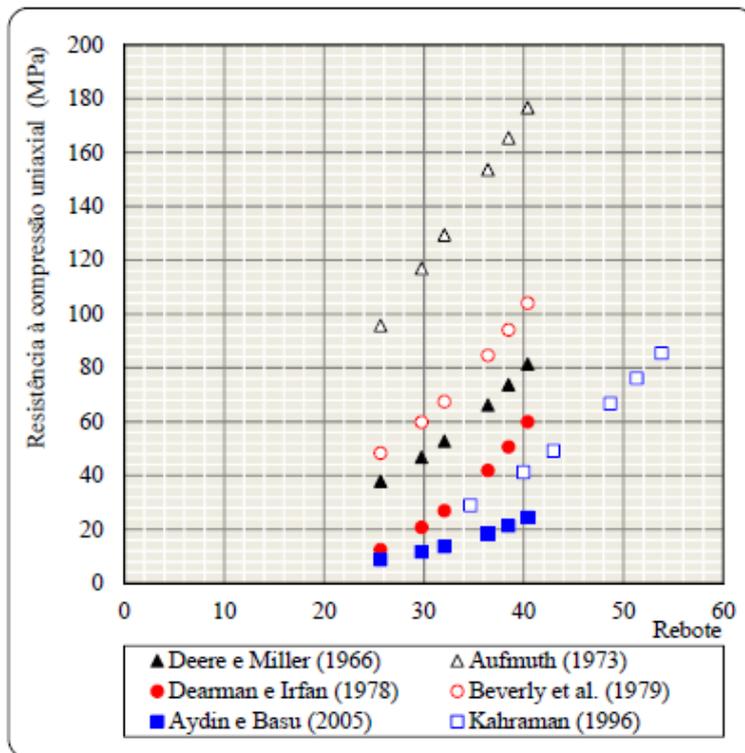


Figura 3.39 – Correlações entre rebote e resistência à compressão – Amostra sem alteração artificial (0h) (STEFFENS, 2018).

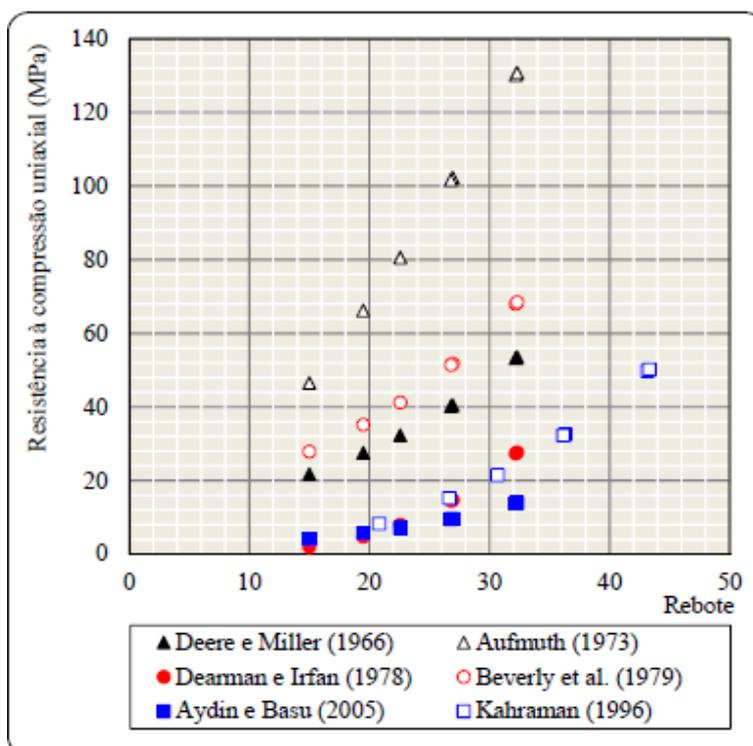


Figura 3.40 – Correlações entre rebote e resistência à compressão – Amostra com 4800h de alteração (STEFFENS, 2018).

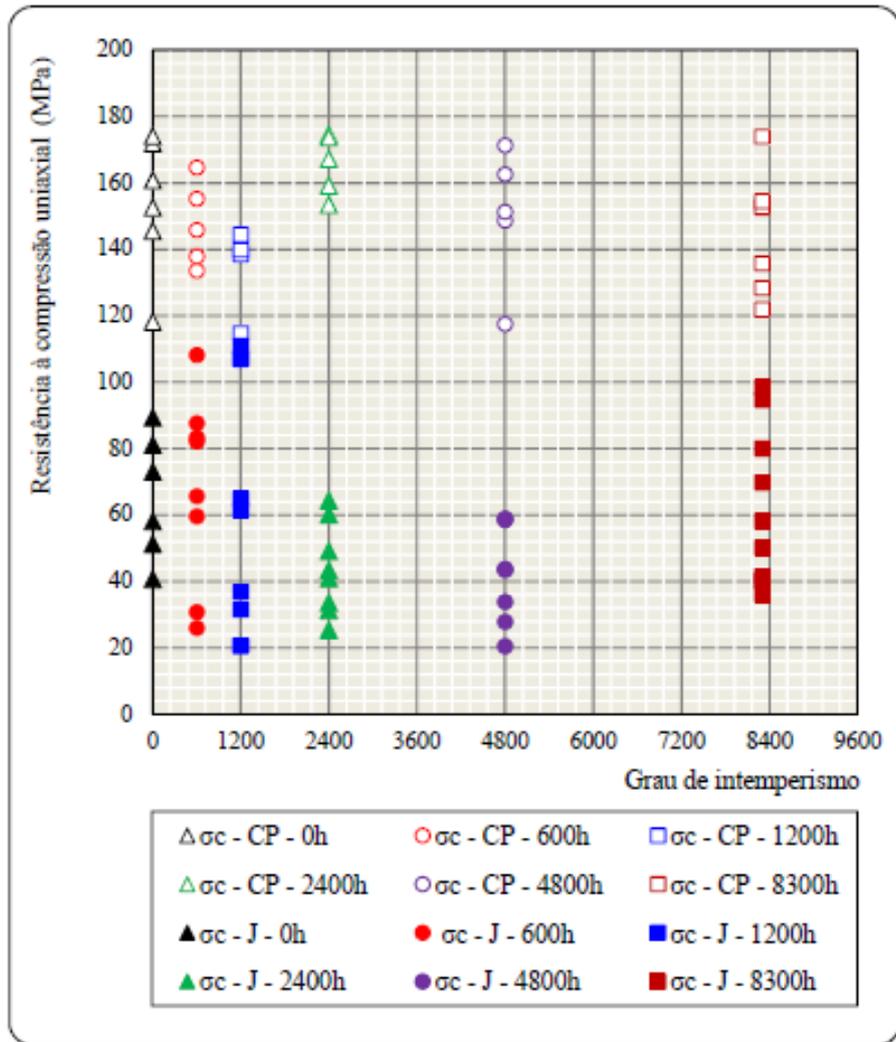


Figura 3.41 – Resistência à compressão determinados em laboratório, CP e por Martelo Schmidt, J (STEFFENS, 2018).

CAPÍTULO 4

4. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho foi dividida em: compilação dos resultados obtidos nos estudos anteriores, reportada no Capítulo 3; ensaios com Martelo Schmidt em campo; escolha e caracterização das amostras a serem ensaiadas em laboratório; ensaios com o Martelo Schmidt em laboratório; análise comparativa dos resultados obtidos com SALLES (2013), OLIVEIRA (2017) e STEFFENS (2018), a fim de formular correlações que possam prever o comportamento do gnaiss Simplício ao longo do tempo. A Figura 4.1 apresenta um fluxograma da metodologia deste trabalho, para melhor compreensão.

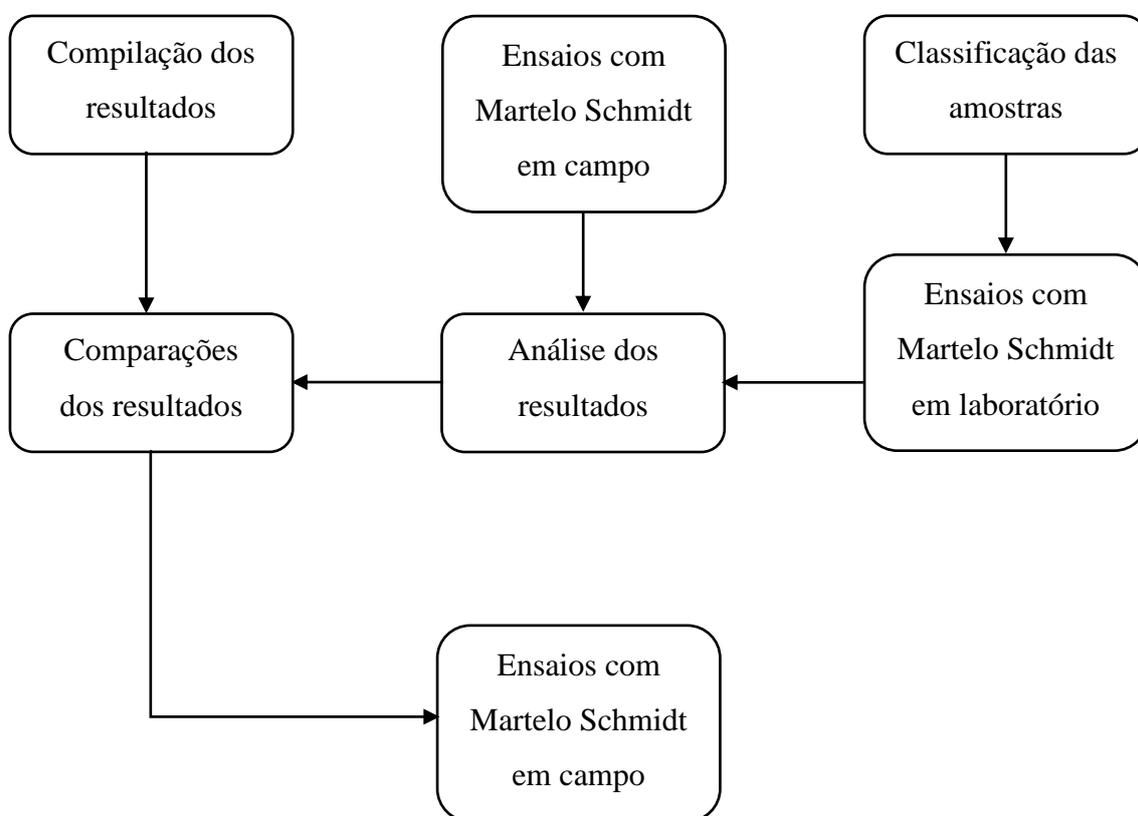


Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia deste trabalho.

4.1 CLASSIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS

Conforme descrito no item 3.3.2 desta pesquisa, as amostras ensaiadas foram retiradas da área do empreendimento em 2008, durante as escavações dos canais. As amostras são do tipo bloco e possuem tamanhos e formatos variados, não existindo, portanto, um padrão de amostras. Sendo assim, decidiu-se separar e classificar um grande número de amostra, para que fosse possível estabelecer um padrão de comportamento com base no conjunto mais numeroso de dados.

O material coletado em Simplício foi separado de acordo com o tamanho e o grau de alteração das amostras, e armazenado dentro de recipientes fechados do tipo bombona (mostrados na Figura 3.16 do capítulo anterior). As bombonas permaneceram tampadas ao longo dos últimos 10 anos em uma área aberta e devido à deterioração das mesmas, foram substituídas por novas uma vez.

Apesar de permanecerem fechadas ao longo dos anos, ao serem abertas, notou-se que o material armazenado sofreu alterações provocadas principalmente pela variação de temperatura e umidade.

Foram selecionadas amostras de sete bombonas distintas, das 15 existentes com material de Simplício, muitas das quais com material muito alterado (decomposto), impossibilitando a realização de ensaios. A Tabela 4.1 apresenta um resumo do número de amostras retiradas de cada bombona.

Tabela 4.1 – Descrição do número de amostras retiradas de cada bombona.

BOMBONA	DIMENSÃO DAS AMOSTRAS	Nº DE AMOSTRAS
1	Pequena	20
2	Pequena	14
3	Pequena	15
4	Grande	15
5	Grande	15
10	Pequena	25
11	Grande	15

As amostras foram escolhidas de forma que suas dimensões fossem iguais ou superiores às dimensões das amostras de testemunho ensaiadas por OLIVEIRA (2017) e STEFFENS (2018), que possuíam um diâmetro de aproximadamente 4,4 cm. Além disso,

a escolha do formato das amostras foi condicionada ao modo de fixação das mesmas na morsa. Outro fator levado em consideração corresponde ao grau de alteração da superfície da amostra, a fim de garantir uma seleção representativa do material. A Figura 4.2 mostra o conjunto total de amostras selecionadas para realização dos ensaios com Martelo Schmidt.



Figura 4.2 – Conjunto de amostras selecionadas para classificação.

O conjunto de amostras foi identificado pelo número da bombona (B1, B2, B3, B4, B5, B10 ou B11), mais o código da amostra (Pn), onde n é o número da amostra. Por exemplo, a amostra identificada como B1-P1 é a amostra número 1, e que foi retirada da bombona número 1.

As amostras foram classificadas visualmente, de forma qualitativa e de acordo com critérios tais como tamanho, cor, dureza, estrutura, textura, granulação e grau de alteração, sendo o último o critério o mais importante para o desenvolvimento desta pesquisa.

Quanto ao tamanho, as amostras foram divididas em pequenas e grandes, tendo as amostras pequenas, dimensões variando entre 5 e 15cm; e as amostras grandes, dimensões superiores a 15cm. A medição das dimensões das amostras não pôde ser

realizada devido à complexidade dos formatos dos blocos, porém a diferença entre amostras grandes e pequenas pode ser vista na Figura 4.3. A diferença de tamanho dos blocos também ficou nítida durante os ensaios, pois os procedimentos e respostas de ensaio não foram semelhantes.



Figura 4.3 – Comparação da dimensão entre uma amostra pequena (B1-P03) e uma amostra grande (B4-P11).

Com relação à cor, as amostras foram divididas em coloração homogênea ou heterogênea. No quesito dureza foram separadas em: riscada pelo canivete ou risca o vidro. Quanto à estrutura foram classificadas em estrutura estratificada, foliada ou maciça. A textura foi classificada de acordo com duas características: cristalina ou clástica, e fanerítica ou afanítica. A granulação foi dividida em: finíssima, fina, média, grossa ou muito grossa.

Conforme o Capítulo 2 (Item 2.1.4), o grau de alteração das amostras foi determinado qualitativamente com auxílio da classificação do grau de alteração desenvolvido por OLIVEIRA (2017), e já apresentada na Tabela 2.1. A classificação consistiu na avaliação visual de características como cor e brilho da superfície das amostras. Além disso, foi realizada a análise comparativa das características da superfície de uma amostra com de outras amostras. A Figura 4.4 apresenta uma comparação entre amostras classificadas como intacta (nível de alteração A), levemente alterada (nível B) e moderadamente alterada (nível C).



Figura 4.4 – Comparação entre o grau de alteração de amostras classificadas como: (a) rocha inalterada, (b) rocha levemente alterada, (c) e (d) rocha moderadamente alterada.

4.2 ENSAIOS COM MARTELO SCHMIDT

Foram realizados neste trabalho, ensaios de Martelo Schmidt em campo e em laboratório para comparação do comportamento do maciço confinado com o das amostras desconfinadas, em função do nível de alteração da rocha e das juntas.

O equipamento usado nos ensaios foi o mesmo utilizado por OLIVEIRA (2017) e STEFFENS (2018), ou seja, o martelo HT225 do tipo N, com energia de impacto igual a 2,207J. A descrição do equipamento utilizado encontra-se no Capítulo 3, item 3.4.3 deste trabalho.

4.2.1 Ensaaios em campo

Os ensaios de campo foram realizados durante visita técnica ao AHE Simplício, em taludes localizados próximos à PCH Anta e à casa de força da UHE Simplício. Em todos os casos, a superfície ensaiada foi a da face do talude, na qual foi possível ensaiar superfícies de rocha inalterada e alterada, além de juntas alteradas.

Devido impossibilidade de realizar os ensaios nos taludes dos canais do circuito hidráulico, foram escolhidos 12 pontos distintos para realização dos ensaios de Martelo Schmidt em campo, tendo sido 9 pontos em um talude próximo à PCH Anta (próximo à entrada do Canal 1) e 3 pontos próximos à casa de força da UHE Simplício (Figura 4.5). Foram realizados em cada um destes pontos, um mínimo de 4 e um máximo de 18 ensaios com as respectivas medidas de rebote. A escolha dos pontos ensaiados buscou garantir a representatividade de amostras de rochas inalteradas e alteradas e juntas alteradas, para posterior comparação dos valores de campo com os valores de laboratório.



Figura 4.5 – Realização do ensaio de Martelo Schmidt em campo.

4.2.2 Ensaaios em laboratório

O método para fixação das amostras também foi o mesmo utilizado por OLIVEIRA (2017) E STEFFENS (2018), ou seja, as amostras foram fixadas com auxílio de uma morsa de bancada. Além disso, foram utilizados calços de madeira para o ajuste

das amostras na morsa, visando minimizar a dispersão de energia que pode ocorrer durante o ensaio devido à má fixação das amostras.

A perpendicularidade do Martelo Schmidt foi observada durante todo o ensaio, porém a direção de impacto variou de horizontal a vertical devido à irregularidade das superfícies das amostras.

A Figura 4.6 ilustra o martelo utilizado nos ensaios, o método de fixação das amostras com morsa e a realização do ensaio com observância da perpendicularidade entre a superfície ensaiada e o equipamento.



Figura 4.6 – Realização do ensaio de Martelo Schmidt.

Foram ensaiadas 119 amostras de rocha, sendo que grande parte das amostras pequenas sofreram ruptura durante o processo de fixação ou durante o ensaio. Decidiu-se inicialmente obter, no mínimo, 10 medições de rebote para cada amostra, porém como grande parte das amostras se romperam, foram realizadas em cada amostra o maior número possível de medições, tendo esse valor variado entre 1 e 60. O alto número de medições teve por objetivo diminuir a dispersão dos resultados após o tratamento estatístico dos dados, pois durante os ensaios foram notadas faixas de rebote muito amplas para uma mesma amostra.

O grande número de amostras rompidas, principalmente entre as amostras pequenas, é explicado por alguns aspectos relacionados ao método de fixação e ao grau de alteração da amostra. O método de fixação com morsa se mostrou eficaz. Porém, para que o Martelo Schmidt consiga registrar uma leitura de rebote, a amostra deve estar perfeitamente fixada, exigindo um maior aperto na morsa, o que pode provocar sua ruptura. Além disso, como a alteração da amostra enfraquece a ligação entre seus minerais, ao se realizar o aperto da morsa, a amostra alterada se rompe com mais facilidade. A Figura 4.7 e Figura 4.8 mostram alguns exemplos de amostras rompidas durante o ensaio.



Figura 4.7 – Amostras rompidas durante o ensaio devido ao aperto da morsa.



Figura 4.8 – Amostras rompidas durante o ensaio devido à alteração.

CAPÍTULO 5

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados da caracterização das amostras e dos ensaios de Martelo Schmidt realizados em campo e em laboratório, foram analisados e comparados entre si. De forma similar, foram também analisados e comparados os valores de resistência obtidos a partir dos rebotes, adotando-se os ábacos e correlações apresentados nas Figura 2.14 e Figura 3.25, e na Tabela 2.3.

Além disso, são apresentadas análises conjuntas dos resultados deste trabalho com os resultados de SALLES (2013), OLIVEIRA (2017) e STEFFENS (2018). Por fim, é desenvolvida uma proposta para a previsão de comportamento ao longo do tempo do gnaiss do AHE Simplício.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras foram caracterizadas por meio de critérios como: cor, dureza, estrutura, textura, granulação e grau de alteração. O resultado da classificação e os registros fotográficos de cada uma das amostras, são apresentados em detalhes no Apêndice A deste documento.

De modo geral, as amostras apresentaram:

- Coloração heterogênea predominantemente máfica;
- Dureza variando entre 3 (amostras riscadas pelo canivete) e 10 (amostras que riscam o vidro), conforme Escala de Dureza de Mohs;
- Estrutura foliada característica do gnaiss;
- Textura cristalina variando entre fanerítica e afanítica;
- Granulação variando entre fina e média;
- Grau de alteração variando entre os níveis inalterada (A), pouco alterada (B) e medianamente alterada (C) pela classificação desenvolvida por Oliveira (2017) e já apresentada na Tabela 2.1.

A Tabela 5.1 e Tabela 5.2 apresentam a classe de alteração das amostras pequenas e grandes, respectivamente, separadas de acordo com o número da bombona.

A distribuição do número de amostras classificadas para cada nível de alteração é apresentada na Tabela 5.3.

Tabela 5.1 – Classificação do grau de alteração das amostras pequenas.

Bombona 1		Bombona 2		Bombona 3		Bombona 10	
Amostra	Classe	Amostra	Classe	Amostra	Classe	Amostra	Classe
B1-P1	A	B2-P1	B	B3-P1	A	B10-P1	B
B1-P2	A	B2-P2	B	B3-P2	A	B10-P2	B
B1-P3	A	B2-P3	A	B3-P3	A	B10-P3	B
B1-P4	B	B2-P4	B	B3-P4	A	B10-P4	B
B1-P5	A	B2-P5	B	B3-P5	A	B10-P5	C
B1-P6	A	B2-P6	B	B3-P6	A	B10-P6	C
B1-P7	B	B2-P7	B	B3-P7	B	B10-P7	B
B1-P8	A	B2-P8	B	B3-P8	B	B10-P8	C
B1-P9	B	B2-P9	B	B3-P9	B	B10-P9	C
B1-P10	A	B2-P10	B	B3-P10	B	B10-P10	C
B1-P11	A	B2-P11	B	B3-P11	B	B10-P11	C
B1-P12	A	B2-P12	B	B3-P12	B	B10-P12	C
B1-P13	A	B2-P13	B	B3-P13	B	B10-P13	C
B1-P14	B	B2-P14	B	B3-P14	B	B10-P14	C
B1-P15	B			B3-P15	B	B10-P15	C
B1-P16	B					B10-P16	B
B1-P17	B					B10-P17	C
B1-P18	B					B10-P18	B
B1-P19	B					B10-P19	C
B1-P20	A					B10-P20	C
						B10-P21	C
						B10-P22	C
						B10-P23	C
						B10-P24	C
						B10-P25	C

Tabela 5.2 – Classificação do grau de alteração das amostras grandes.

Bombona 4		Bombona 5		Bombona 11	
Amostra	Classe	Amostra	Classe	Amostra	Classe
B4-P1	B	B5-P1	A	B11-P1	B
B4-P2	A	B5-P2	A	B11-P2	C
B4-P3	B	B5-P3	A	B11-P3	C
B4-P4	A	B5-P4	A	B11-P4	C
B4-P5	A	B5-P5	A	B11-P5	C
B4-P6	B	B5-P6	A	B11-P6	C
B4-P7	A	B5-P7	A	B11-P7	B
B4-P8	B	B5-P8	B	B11-P8	C
B4-P9	C	B5-P9	B	B11-P9	C
B4-P10	B	B5-P10	A	B11-P10	C
B4-P11	A	B5-P11	B	B11-P11	C
B4-P12	A	B5-P12	B	B11-P12	C
B4-P13	A	B5-P13	A	B11-P13	C
B4-P14	A	B5-P14	A	B11-P14	C
B4-P15	B	B5-P15	A	B11-P15	C

Tabela 5.3 – Distribuição do número de amostras por nível de alteração.

Grau de alteração	Número de amostras
A	37
B	51
C	32
D	0
E	0

5.2 ENSAIOS COM MARTELO SCHMIDT REALIZADOS EM CAMPO

Os valores de rebote obtidos nos ensaios realizados em campo foram analisados em função do estado de alteração da rocha e das juntas, possibilitando que os valores médios de rebote fossem calculados. Os resultados obtidos em campo são resumidos na Tabela 5.4, junto aos valores médios de rebote obtidos para as rochas e juntas do AHE Simplício.

Tabela 5.4 – Valores de rebote obtidos nos ensaios de campo.

Local	Classe	Rebote	Rebote médio
PCH Anta	Rocha Inalterada	53	57
		61	
		55	
UHE Simplício	Rocha Inalterada	58	
PCH Anta	Rocha alterada	44	41
		34	
		45	
PCH Anta	Junta alterada	29	31
		36	
UHE Simplício	Junta alterada	27	
		33	

5.3 ENSAIOS COM MARTELO SCHMIDT REALIZADOS EM LABORATÓRIO

Os resultados de rebote obtidos nos ensaios de Martelo Schmidt em laboratório receberam tratamento estatístico por meio da eliminação dos valores que ficaram fora da distribuição normal em relação à média, ou seja, pela eliminação dos valores que ficaram acima e abaixo do valor da média \pm desvio padrão. A distribuição dos valores de rebote, após o tratamento estatístico, para cada nível de alteração das amostras pequenas e grandes são apresentadas nas Figura 5.1 e Figura 5.2.

Uma comparação entre a distribuição dos valores de rebote obtidos para amostras pequenas e grandes é apresentada na Figura 5.3. Observa-se que os resultados das amostras pequenas e grandes possuem o mesmo padrão de comportamento, com valores de rebote muito próximos. Para o nível de alteração C, nota-se uma maior diferença de valores, porém essa diferença pode ter ocorrido devido ao procedimento de fixação das amostras na morsa, visto que o aperto na amostra pequena acarretava a sua ruptura. Além disso, foi possível notar durante os ensaios, que as amostras pequenas sofreram alteração não apenas superficial, mas também interna, o que muito provavelmente reduziu a sua resistência devido à alteração.

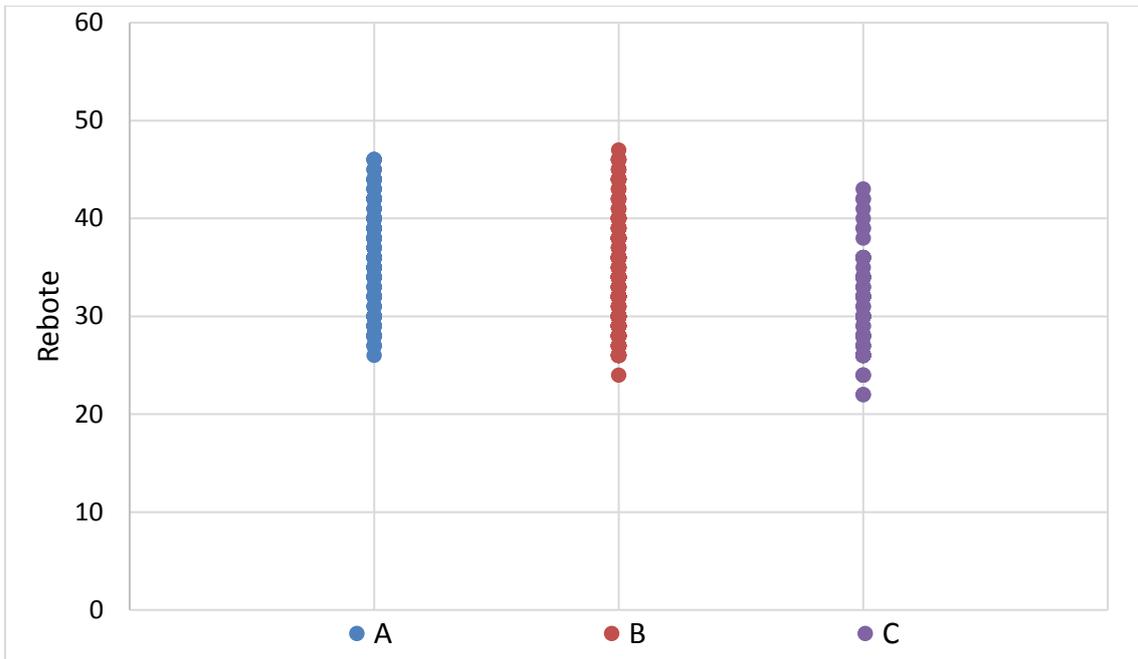


Figura 5.1 - Distribuição dos valores de rebote obtidos nos ensaios de Martelo Schmidt em amostras pequenas em função dos graus de alteração A, B e C.

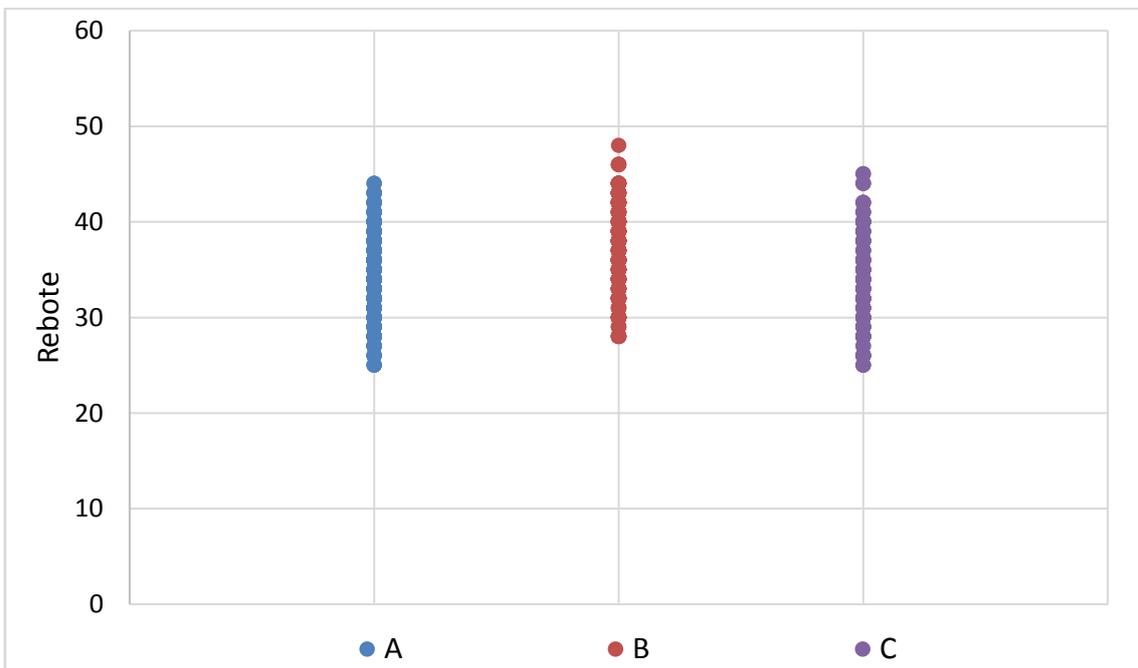


Figura 5.2 - Distribuição dos valores de rebote obtidos nos ensaios de Martelo Schmidt em amostras grandes em função dos graus de alteração A, B e C.

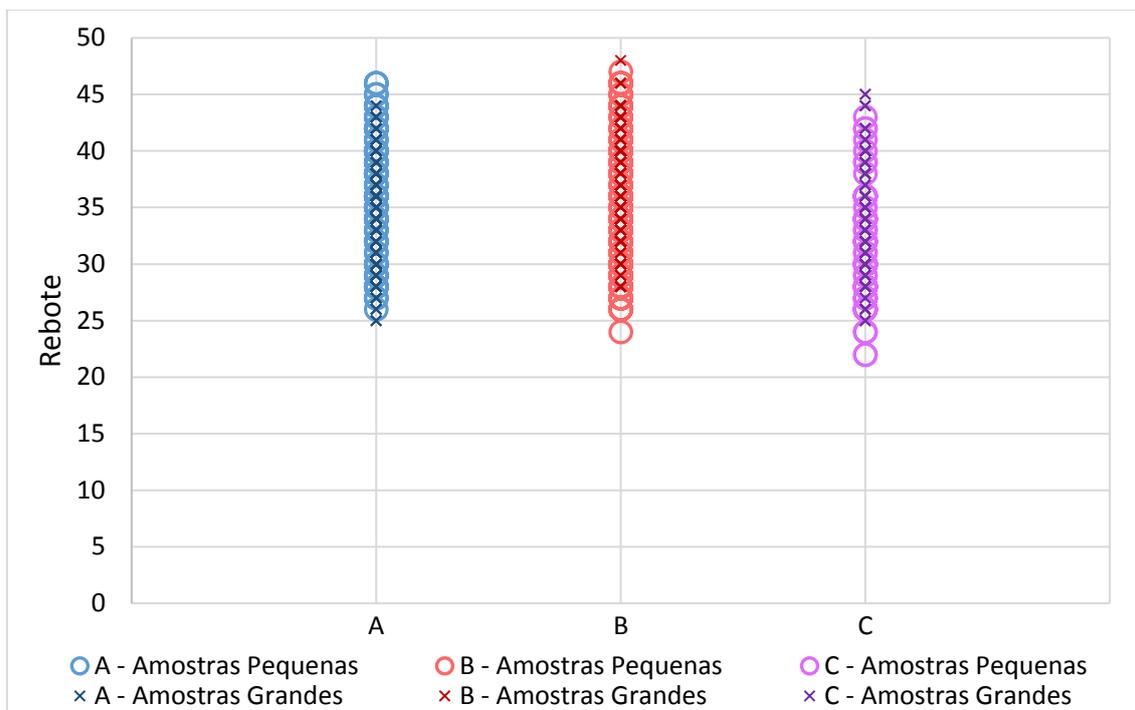


Figura 5.3 - Distribuição dos valores de rebote obtidos nos ensaios de Martelo Schmidt.

Sendo assim, é possível concluir que a dimensão da amostra não possui influência significativa nos valores de rebote obtidos. Por sua vez, a dispersão dos resultados é maior para amostras pequenas (rebotes variaram entre 22 e 47) quando comparada com a de amostras grandes (rebotes variando de 25 a 48).

Após o tratamento estatístico, foi calculado o valor do rebote médio para cada amostra (Tabela 5.5 e 5.6). A fonte em itálico e cor azul indica que as amostras sofreram algum tipo de ruptura durante o processo de ensaio, podendo ou não ter registrado valores de rebote. As amostras rompidas que mantiveram a maior parcela da amostra intacta, tiveram esta parcela ensaiada e receberam a indicação (2) à frente de seu código.

Comparando as duas tabelas, é possível notar que grande parte das amostras pequenas romperam durante os ensaios, enquanto o mesmo ocorreu apenas em poucas amostras grandes. A ruptura das amostras durante o ensaio se deve principalmente ao processo de fixação e/ou ao impacto dado pelo Martelo na superfície da amostra.

As classes de alteração apresentadas na Tabela 5.1 e Tabela 5.2 foram integradas aos resultados dos valores médios de rebote, apresentados na Tabela 5.5 e Tabela 5.6, de forma a resumir os valores médios de rebote em função da classe de alteração da amostra, como mostrado na Tabela 5.7. Foram calculados e apresentados ao final da mesma tabela, os valores de rebote para cada classe de alteração e tamanho de amostra, além da média geral em função do nível de alteração.

Tabela 5.5 - Valores médios de rebote calculados para as amostras pequenas.

Bombona 1		Bombona 2		Bombona 3		Bombona 10	
Amostra	Rebote	Amostra	Rebote	Amostra	Rebote	Amostra	Rebote
<i>B1-P1</i>	-	B2-P1	33	<i>B3-P1</i>	-	<i>B10-P1</i>	27
B1-P2	30	<i>B2-P2</i>	32	<i>B3-P2</i>	36	<i>B10-P2</i>	33
<i>B1-P3</i>	-	<i>B2-P3</i>	38	<i>B3-P3</i>	-	<i>B10-P3</i>	31
<i>B1-P4</i>	32	<i>B2-P4</i>	-	<i>B3-P4</i>	42	<i>B10-P4</i>	34
<i>B1-P5</i>	-	B2-P5	33	<i>B3-P5</i>	37	B10-P5	35
<i>B1-P6</i>	29	<i>B2-P6</i>	-	<i>B3-P6</i>	36	<i>B10-P6</i>	29
<i>B1-P6 (2)</i>	41	<i>B2-P7</i>	36	B3-P7	29	<i>B10-P7</i>	-
<i>B1-P7</i>	30	<i>B2-P8</i>	-	<i>B3-P8</i>	28	<i>B10-P8</i>	-
<i>B1-P8</i>	33	<i>B2-P9</i>	40	B3-P9	42	<i>B10-P9</i>	-
<i>B1-P9</i>	31	<i>B2-P10</i>	34	B3-P10	37	<i>B10-P10</i>	-
<i>B1-P10</i>	-	B2-P11	29	<i>B3-P11</i>	38	<i>B10-P11</i>	29
<i>B1-P11</i>	32	<i>B2-P12</i>	29	<i>B3-P12</i>	31	<i>B10-P12</i>	-
<i>B1-P12</i>	41	B2-P13	36	B3-P13	39	<i>B10-P13</i>	-
<i>B1-P12 (2)</i>	34	B2-P14	42	<i>B3-P14</i>	35	<i>B10-P14</i>	28
<i>B1-P13</i>	-			<i>B3-P15</i>	-	<i>B10-P15</i>	32
B1-P14	34					<i>B10-P16</i>	-
<i>B1-P15</i>	34					<i>B10-P17</i>	31
<i>B1-P16</i>	29					<i>B10-P18</i>	-
B1-P17	34					<i>B10-P19</i>	25
<i>B1-P18</i>	-					<i>B10-P20</i>	-
<i>B1-P19</i>	-					<i>B10-P21</i>	-
B1-P20	38					B10-P22	30
						<i>B10-P23</i>	-
						<i>B10-P24</i>	31
						<i>B10-P25</i>	-

Tabela 5.6 - Valores médios de rebote calculados para as amostras grandes.

Bombona 4		Bombona 5		Bombona 11	
Amostra	Classe	Amostra	Classe	Amostra	Classe
B4-P1	37	B5-P1	28	B11-P1	33
<i>B4-P2</i>	31	B5-P2	36	B11-P2	33
B4-P3	43	<i>B5-P3</i>	34	B11-P3	34
B4-P4	37	<i>B5-P4</i>	31	B11-P4	30
B4-P5	37	B5-P5	34	B11-P5	31
B4-P6	39	B5-P6	29	B11-P6	40
B4-P7	36	B5-P7	33	B11-P7	30
B4-P8	38	<i>B5-P8</i>	33	B11-P8	34
B4-P9	39	B5-P9	33	B11-P9	30
B4-P10	38	<i>B5-P10</i>	38	B11-P10	34
B4-P11	35	B5-P11	35	B11-P11	35
B4-P12	37	B5-P12	31	B11-P12	31
B4-P13	36	B5-P13	34	B11-P13	32
B4-P14	31	B5-P14	34	B11-P14	38
B4-P15	38	B5-P15	39	<i>B11-P15</i>	-

Este tipo de análise é importante para que seja possível perceber a redução do rebote das amostras em função do aumento do grau de alteração. Além disso, os resultados obtidos nestas análises podem auxiliar na previsão de comportamento da rocha ao longo do tempo.

Tabela 5.7 - Valores médios rebote por classe de alteração.

Dimensão		Amostras pequenas			Amostras grandes		
Classe	A	B	C	A	B	C	
Valores médios de rebote	32	29	25	31	30	30	
	33	29	28	31	33	30	
	34	29	29	31	33	31	
	36	29	29	33	34	31	
	36	30	30	34	37	32	
	37	31	31	34	38	33	
	38	31	31	34	38	34	
	38	31	32	35	38	34	
			32		35	34	
			32		36	35	
			33		36	38	
			33		36		
			33		37		
			34		37		
			34		37		
			34		39		
			34				
			34				
			35				
			36				
		36					
		37					
		38					
Rebote médio	36	34	28	35	36	34	
Classe	A			B		C	
Média geral	36			35		31	

Para o cálculo dos valores de resistência à compressão das amostras ensaiadas, foram utilizados os ábacos apresentados nas Figura 2.14 e Figura 3.25, ou seja, o ábaco proposto por DEERE & MILLER (1966) e o ábaco fornecido pelo fabricante do equipamento. As curvas de resistência à compressão por rebote obtidas utilizando os dois ábacos podem ser vistas na Figura 5.4 e Figura 5.5, para amostras pequenas e grandes respectivamente. O valor de massa específica utilizado para o gnaïsse de Simplício foi de 2,7g/cm³.

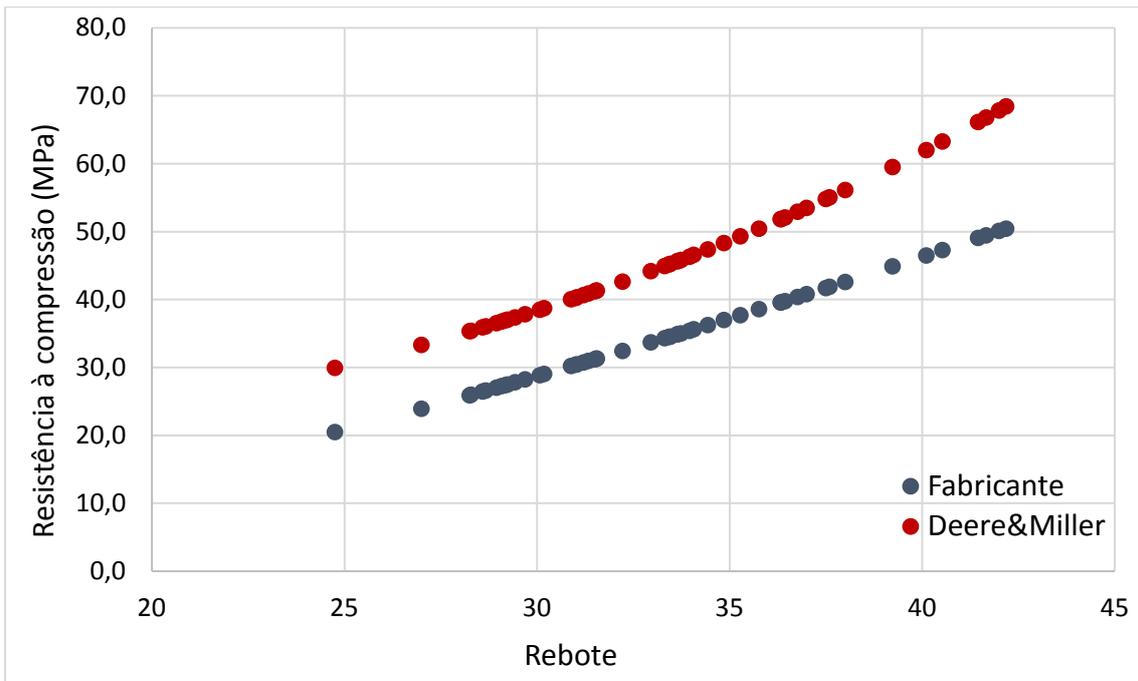


Figura 5.4 – Correlações entre resistência à compressão e rebote conforme DEERE & MILLER (1966) e fabricante do Martelo HT225 - Amostras pequenas.

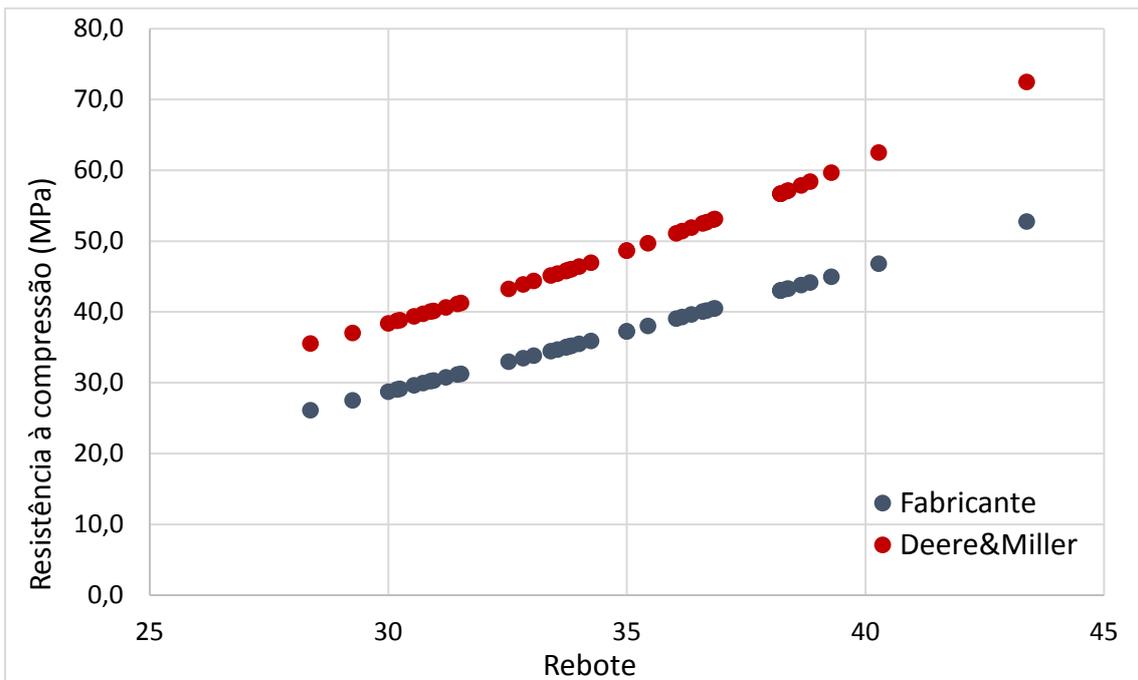


Figura 5.5 – Correlações entre resistência à compressão e rebote conforme DEERE & MILLER (1966) e fabricante do Martelo HT225 - Amostras grandes.

Importante lembrar que, como a direção de ensaio variou entre horizontal e vertical devido à irregularidade das superfícies, optou-se por utilizar no cálculo dos valores de resistência à compressão, a média dos valores obtidos para o martelo na vertical e na horizontal.

Observa-se, a partir das correlações entre resistência à compressão e rebote, que os valores de resistência obtidos por meio do ábaco do fabricante são inferiores aos calculados por DEERE & MILLER (1966). O ábaco do fabricante tem seu uso indicado para ensaios executados em amostras de blocos de concreto, enquanto o ábaco de DEERE & MILLER (1966), foi proposto após uma série de ensaios de Martelo Schmidt realizados em amostras de 28 tipos diferentes de rochas. Além disso, o valor máximo de resistência dado pelo ábaco do fabricante é de 70MPa, o que corresponde a um valor muito inferior ao valor médio de resistência à compressão uniaxial obtido por SALLES (2013), igual a aproximadamente 165 MPa para as amostras inalteradas. Desta forma, optou-se por utilizar o ábaco proposto por DEERE & MILLER (1966) ao invés do ábaco fornecido pelo fabricante nas análises desta pesquisa.

5.3.1 Comparação com as correlações entre rebote e resistência da literatura

Os valores de rebote obtidos nos ensaios de laboratório foram aplicados às correlações de rebote por resistência à compressão disponíveis na literatura e sintetizadas na Tabela 2.3 do Capítulo 2. Como algumas das correlações são em função do rebote do martelo tipo L, os valores obtidos nos ensaios foram corrigidos por meio da Equação 1 e aplicados às correlações em função de R_L . Para as correlações que foram feitas em função do martelo tipo N, não há necessidade de qualquer correção. Adotou-se o valor de $2,7\text{g/cm}^3$ nas correlações que consideram a massa específica do material.

A Figura 5.6 e Figura 5.7 apresentam as curvas de Resistência à compressão por rebote, obtidas para todas as correlações da literatura e conforme o ábaco de DEERE & MILLER (1966), para amostras pequenas e grandes, respectivamente.

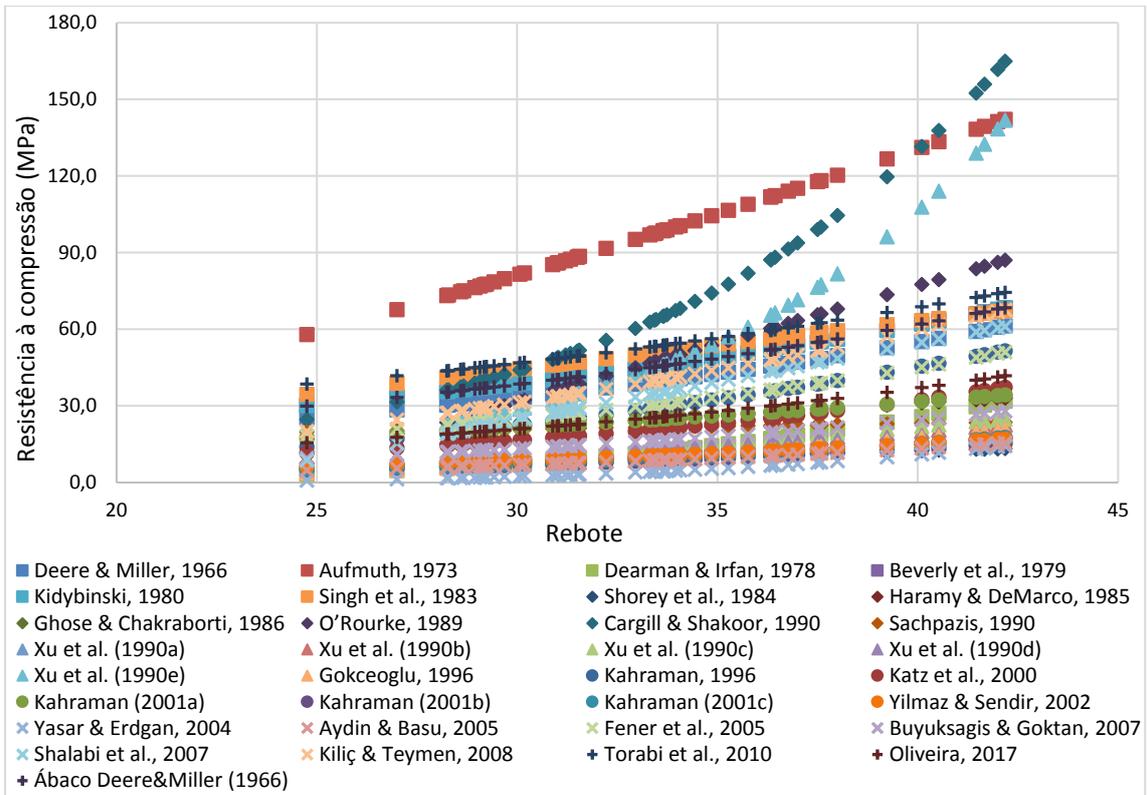


Figura 5.6 – Correlações entre rebote e resistência à compressão uniaxial - Amostras pequenas.

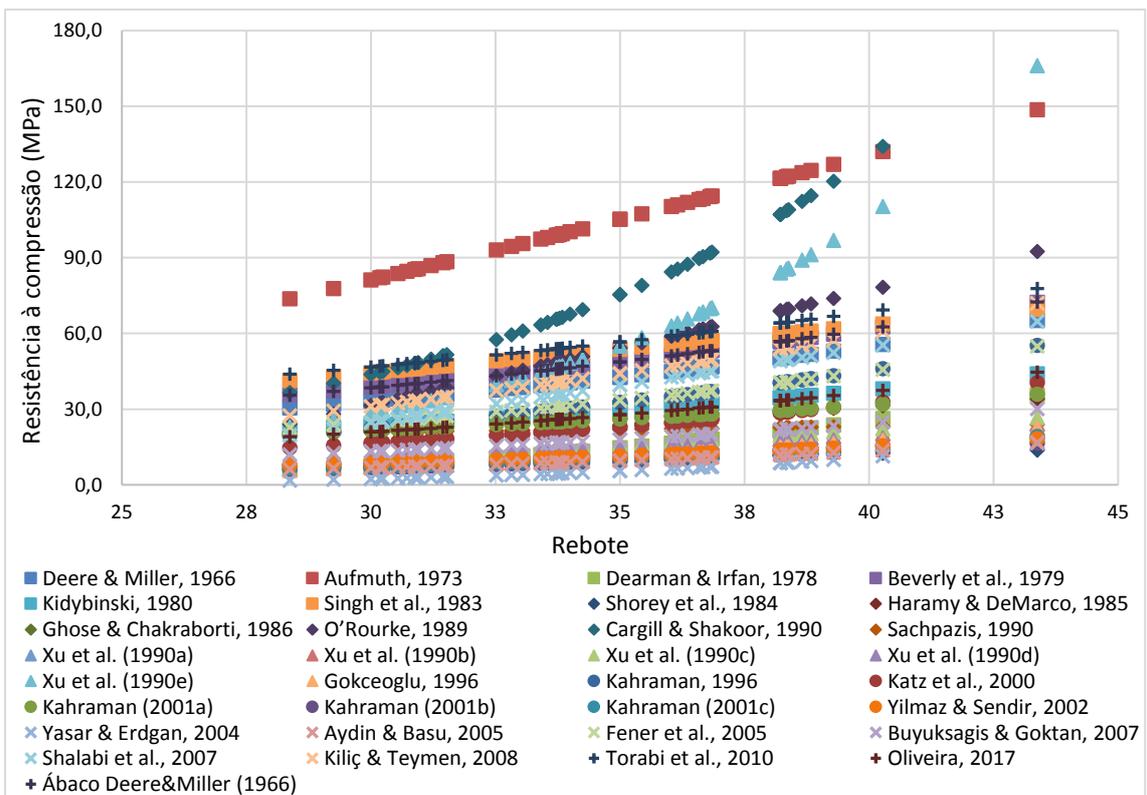


Figura 5.7 – Curvas de correlações entre rebote e resistência à compressão uniaxial para amostras grandes.

As curvas resultantes das correlações da literatura foram analisadas eliminando-se as correlações que apresentaram valores muito restritivos e abaixo dos valores obtidos pelo ábaco de DEERE & MILLER (1966). Desta forma, foram eliminadas, tanto para as amostras pequenas quanto para as amostras grandes as seguintes relações: DEARMAN & IRFAN (1978); SHOREY *et al.*, (1984); GHOSE & CHAKRABORTI (1986), XU *et al.* (1990a, b, c, d); GOKCEOGLU (1996); KAHRAMAN (2001b, c); YILMAZ & SENDIR (2002); YASAR & ERDGAN (2004); AYDIN & BASU (2005); BUYUKSAGIS & GOKTAN (2007); SACHPAZIS (1990).

Foram eliminadas também as correlações que apresentaram um comportamento superestimado ou não representativo do material, ou seja, foram eliminadas as curvas muito afastadas ou com comportamento muito diferente da obtida conforme DEERE & MILLER (1966). Em todos os casos, os resultados de AUFMUTH (1973); CARGILL & SHAKOOR (1990); XU *et al.* (1990e) são superestimados e os de O'ROURKE (1989); KAHRAMAN (2001a); HARAMY & DEMARCO (1985) não são representativos.

O limite inferior dos valores de resistência para o gnaisse estudado foi dado pela correlação de KATZ *et al.* (2000). O limite superior dos valores de resistência foi dado pela correlação de TORABI *et al.* (2011).

Após a eliminação dos valores não representativos do material e da definição dos limites inferior e superior, foram construídos os gráficos apresentados na Figura 5.8 e Figura 5.9, os quais correspondem ao intervalo de valores de resistência e rebote obtidos para o gnaisse da região do AHE Simplício.

As relações consideradas não representativas do material e que foram eliminadas possuem um campo de aplicação muito restritivo e que não corresponde ao comportamento do gnaisse estudado.

A grande variação dos resultados obtidos pelos diversos autores se deve principalmente ao fato de que os materiais ensaiados e as resistências à compressão são muito diferentes quando comparados ao Gnaiss Simplício. Além disso, a alta dispersão do ensaio e o uso de diferentes tipos de martelo também podem influenciar a diferença de resultados.

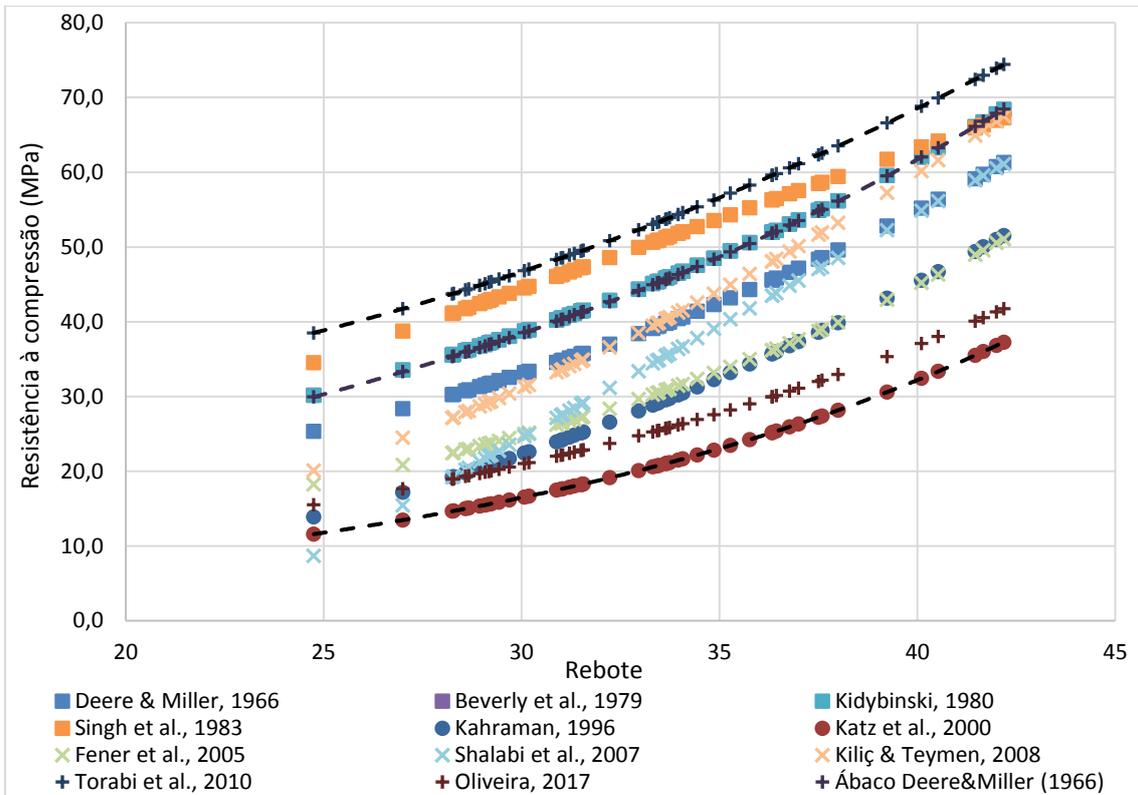


Figura 5.8 – Curvas de correlações entre rebote e resistência à compressão uniaxial compreendidas entre os limites inferior e superior para amostras pequenas.

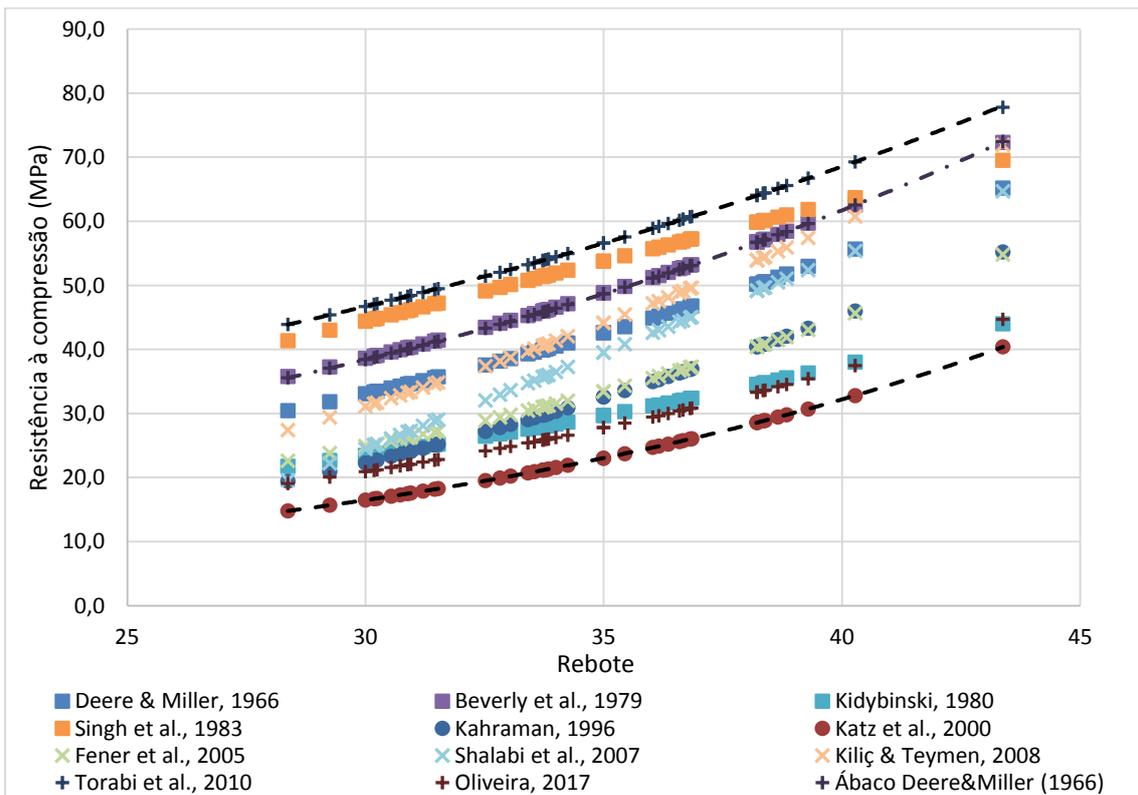


Figura 5.9 – Curvas de correlações entre rebote e resistência à compressão uniaxial compreendidas entre os limites inferior e superior para amostras grandes.

5.4 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS OBTIDOS COM OLIVEIRA (2017) E STEFFENS (2018)

OLIVEIRA (2017) realizou ensaios de Martelo Schmidt em amostras de testemunhos de sondagens que foram executadas na área do AHE Simplício durante a fase de investigação do empreendimento. Foram ensaiadas amostras de rocha e juntas, inalteradas e que sofreram alteração natural ao longo dos anos.

STEFFENS (2018) realizou ensaios de Martelo Schmidt nas juntas de testemunhos de sondagem do AHE Simplício, que foram alteradas artificialmente em laboratório por SALLES (2013) em um equipamento de percolação para alteração acelerada. Os níveis de alteração artificial variaram entre 0 e 8300h de ensaio no equipamento de percolação.

Os resultados de rebote obtidos por OLIVEIRA (2017) e STEFFENS (2018) são apresentados na Tabela 5.8, assim como os resultados obtidos nos ensaios de campo e de laboratório desta pesquisa, todos acompanhados da classificação do nível de alteração ou do tempo de alteração em laboratório.

Tabela 5.8 – Resultados dos ensaios de rebote em campo e laboratório comparados com resultados de OLIVEIRA (2017) e STEFFENS (2018).

Oliveira (2017)		Steffens (2018)		Ensaio em campo		Ensaio em laboratório	
Classe	Rebote	Tempo	Rebote	Classe	Rebote	Classe	Rebote
Rocha não alterada	57	0h	47	Rocha não alterada	57	A	36
Rocha alterada	41	600h	46	Rocha alterada	41	B	35
Junta não alterada	40	1200h	39	Junta alterada	31	C	31
Junta alterada	34	2400h	33				
		4800h	32				
		8300h	31				

A partir da Tabela 5.8 observam-se os mesmos valores de rebote obtidos para as amostras com 8300h de alteração acelerada em laboratório, amostras de junta alterada em campo e amostras de nível de alteração C dos ensaios de laboratório, iguais a 31. Nota-se também a redução dos valores de rebote com o aumento da alteração das amostras, sejam

alteradas artificialmente em equipamento de percolação, sejam alteradas naturalmente e representadas pelos testemunhos de sondagens e taludes na área de Anta e Simplício.

Os valores de resistência para os rebotes apresentados na Tabela 5.8 foram calculados de acordo com o ábaco de DEERE & MILLER (1966), respeitando a direção de ensaio para cada caso (Tabela 5.9). No caso dos resultados de OLIVEIRA (2017) e STEFFENS (2018), a direção de ensaio foi horizontal para as juntas e vertical para as superfícies de rocha do testemunho. Para as rochas e juntas ensaiadas em campo, a direção de ensaio foi horizontal, visto que as faces dos taludes ensaiadas eram verticais. No caso das amostras de laboratório, a direção de ensaio variou entre horizontal e vertical devido às irregularidades das superfícies. Desta forma, decidiu-se calcular a média entre os valores de resistência ensaiados tanto na vertical quanto horizontal, como explicado anteriormente.

Tabela 5.9 – Valores de resistência à compressão conforme DEERE & MILLER (1966).

Oliveira (2017)		Steffens (2018)		Ensaio em campo		Ensaio em laboratório	
Rebote	σ_C (MPa)	Rebote	σ_C (MPa)	Rebote	σ_C (MPa)	Rebote	σ_C (MPa)
57	138,6	47	89,2	57	138,7	36	49,8
		46	85,3				
41	61,0	39	62,6	41	68,4	35	48,7
		33	48,1				
40	65,5	32	46,0				
		31	44,0	31	44,0	31	40,3
34	50,2						

A partir dos valores de resistência à compressão obtidos para cada valor de rebote, foi desenvolvida a relação apresentada na Figura 5.10 e a linha de tendência com melhor ajuste aos dados. A linha de tendência representa a variação da resistência à compressão do material em função do valor do rebote, que por sua vez varia com a alteração da amostra.

Importante salientar também, que os valores de resistência foram calculados a partir dos valores de rebote do martelo tipo L, obtidos pela Equação 2.1, porém o gráfico apresentado da Figura 5.10 foi construído utilizando os valores de rebote do martelo tipo N no conjunto das abcissas. Portanto, a equação proposta para a previsão de comportamento do gnaíse estudado em função da variação de resistência à compressão e do rebote obtido com o martelo tipo N, é dada por:

$$\sigma_c = 10,121 * e^{0,046 * R_N} \quad (5.1)$$

onde, σ_c é a resistência à compressão da rocha em MPa e R_N é o valor do rebote obtido com o martelo tipo N.

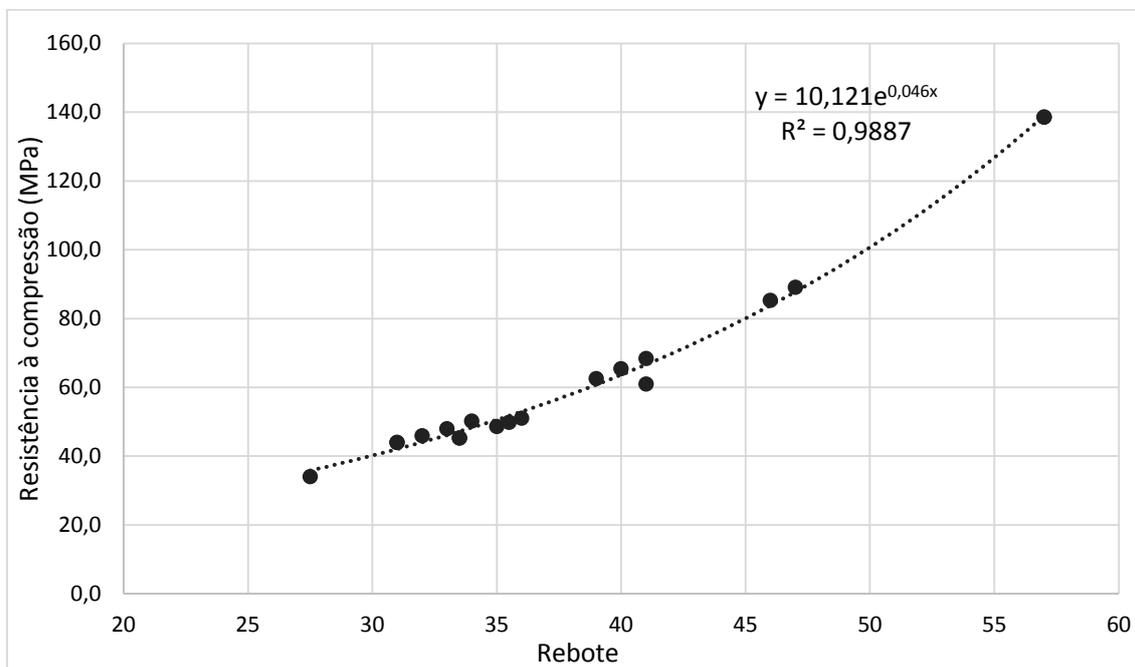


Figura 5.10 - Proposta de equação para a previsão do comportamento do gnaiss da região de Simplício em função da variação da resistência à compressão e do valor de rebote.

A previsão de comportamento do material em função do tempo foi desenvolvida utilizando-se o conceito de índice de alteração ou índice de qualidade apresentado no Capítulo 2 (item 2.2.4). Os índices de alteração são índices empregados para comparar uma determinada característica da rocha em seu estado intacto e em seu estado alterado. Estes índices permitem comparar diferentes níveis de alteração em diferentes amostras de uma mesma rocha e simular a variação de cada propriedade da rocha com o aumento do seu grau de alteração. O índice de alteração usado nas análises desta pesquisa é expresso por:

$$I_R = \frac{R_{inalterada} - R_{alterada}}{R_{inalterada}} * 100 \quad (5.2)$$

onde, I_R é o índice de alteração do rebote em percentagem; $R_{inalterada}$ é o valor de rebote para uma amostra que não sofreu alteração e, portanto, é o valor de referência; $R_{alterada}$ é o valor de rebote da amostra alterada que se deseja comparar.

Foram calculados os índices de alteração do rebote das amostras alteradas por lixiviação no equipamento de percolação em laboratório e ensaiadas por STEFFENS (2018) e os valores do índice de alteração do rebote das amostras naturais ensaiadas com Martelo Schmidt em laboratório (Tabela 5.10). O valor de referência foi o rebote da rocha inalterada obtido em campo nesta pesquisa e em laboratório por OLIVEIRA (2017) também para a rocha não alterada (rebote = 57).

Tabela 5.10 – Índices de alteração do rebote em função do nível e tipo de alteração das amostras.

Amostras alteradas artificialmente		Amostras alteradas naturalmente	
Tempo	Índice de alteração	Classe	Índice de alteração
0h	17,5	A	37,7
600h	19,3		
1200h	31,6	B	39,5
2400h	42,1		
4800h	43,9	C	45,6
8300h	45,6		

Para um mesmo índice de alteração das amostras alteradas natural e artificialmente, é possível determinar o tempo de lixiviação em laboratório equivalente, ou seja, o tempo de lixiviação em laboratório necessário para produzir um determinado nível de alteração. Para isso, foi construída a curva de variação do rebote pelo tempo de lixiviação para os resultados obtidos por STEFFENS (2018) e calculados os tempos de lixiviação equivalentes para os níveis A, B e C (Figura 5.11).

Os valores de índice de alteração para os níveis A e B (37,7 e 39,5), foram obtidos por interpretação da curva e os tempos de lixiviação equivalentes encontrados foram iguais a 1710h e 2000h, respectivamente. Por sua vez, o valor de índice de alteração do nível C (45,6) é igual ao índice de alteração da amostra que sofreu 8300h de lixiviação, portanto, este ponto foi obtido experimentalmente. A partir destes valores, foi desenvolvido a correlação de rebote por tempo de lixiviação apresentada na Figura 5.12 e traçada a linha de tendência que melhor se ajusta aos resultados. Esta linha de tendência representa uma proposta de equação para a previsão do comportamento do gnaiss em estudo, em função do tempo de alteração do material.

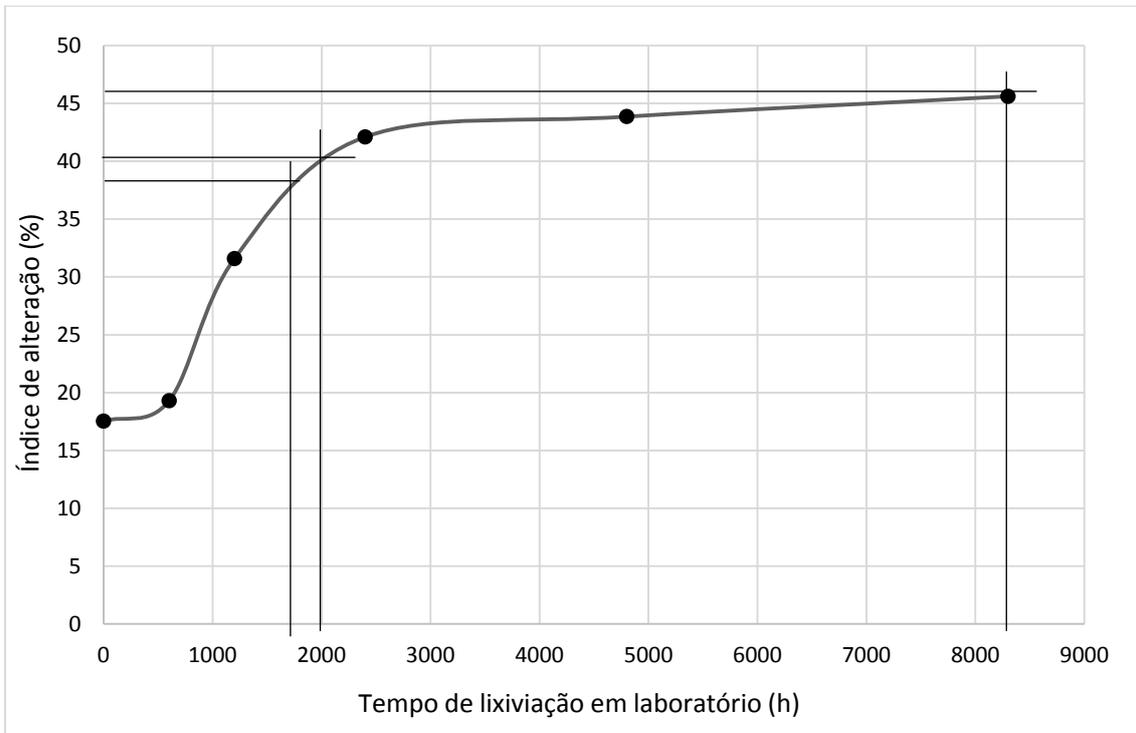


Figura 5.11 – Curva de variação do índice de alteração em função do tempo de lixiviação em laboratório.

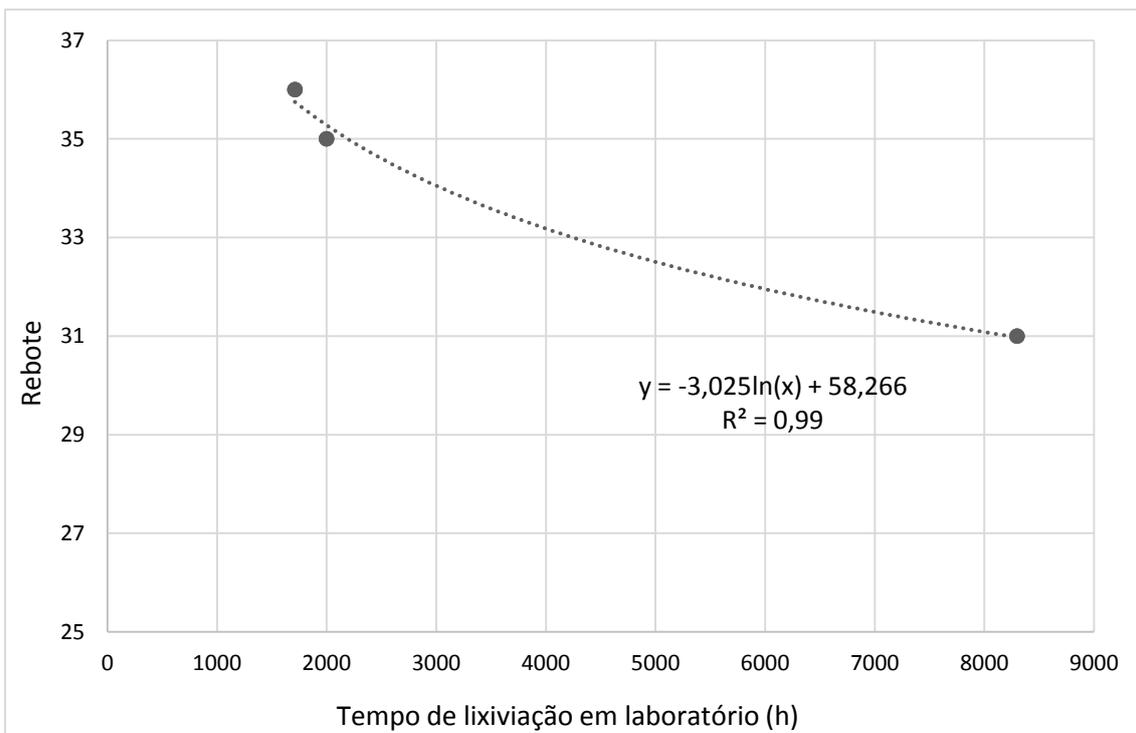


Figura 5.12 – Proposta de equação para a previsão da variação do rebote do gnaíse de Simplicio em função do tempo de lixiviação em laboratório.

A proposta desenvolvida corresponde a uma curva de tendência traçada através de três pontos. O reduzido número de pontos existentes foi condicionado ao modo de tratamento dos dados desta pesquisa. Na caracterização dos materiais resultaram apenas amostras representativas das três primeiras classes de alteração e, portanto, esse fator se tornou um condicionante da análise dos resultados.

De acordo com a correlação apresentada na Figura 5.12, a equação proposta para a previsão da variação de rebote para o Gnaisse Simplício, em função do tempo de lixiviação em laboratório, é dada por:

$$R_N = -3,025 * \ln(t) + 58,266 \quad (5.3)$$

onde, R_N é o valor do rebote obtido com o martelo tipo N e t é o tempo de lixiviação em laboratório dado em horas.

Desta forma, o valor de rebote da amostra com aproximadamente 1 ano de alteração em laboratório é igual ao valor de rebote da amostra com nível de alteração C, que sofreu alteração natural durante cerca de 10 anos. Pode-se assumir então, que cerca de 1 ano de alteração em laboratório equivale a cerca de 10 anos de alteração em campo. Portanto, é possível utilizar esta proposta de previsão de comportamento do material para prever a redução do valor de rebote e, conseqüentemente, da resistência à compressão do gnaisse do AHE Simplício ao longo dos anos (Tabela 5.11).

Tabela 5.11 - Proposta de previsão de comportamento do material ao longo do tempo.

Tempo de alteração em laboratório (anos)	Tempo de alteração em campo (anos)	Rebote	Resistência à compressão (MPa)
1	10	31	41,7
2	20	29	37,9
3	30	28	35,8
4	40	27	34,4
5	50	26	33,4

O valor de referência da resistência à compressão da rocha é de aproximadamente 138,7 MPa, enquanto o valor previsto para 50 anos de alteração em campo corresponde a cerca de 33,4MPa. A diminuição da resistência à compressão do gnaisse estudado, calculada pelas equações propostas neste trabalho, foi de 105MPa ao

longo de 50 anos de alteração natural, ou seja, uma redução de resistência de aproximadamente 76%.

SALLES (2013) também avaliou a previsão de comportamento do Gnaiss Simplício, ensaiado no equipamento de percolação para alteração artificial por meio de ensaios tais como análises petrográficas, ensaios de absorção e ensaios de compressão uniaxial e diametral. A autora apresentou uma proposta de previsão de comportamento do material, considerando:

- Resultados dos ensaios de compressão uniaxial realizados nos corpos de prova do Gnaiss Simplício alterados artificialmente;
- Correlações entre os resultados obtidos para o material de Simplício e os resultados de FERREIRA (2004) e MAIA e SALLES (2006) para um gnaiss de comportamento similar, o gnaiss Pedra Madeira, de Santo Antônio de Pádua/RJ.

Segundo a proposta apresentada por SALLES (2013), em 50 anos de alteração natural em campo, a redução da resistência à compressão do gnaiss da região de Simplício seria aproximadamente 92MPa. O valor da resistência à compressão da rocha inalterada obtido pela autora é igual a 164,8MPa e o da rocha alterada durante 50 anos é igual a 72,9MPa, ou seja, previsão de uma redução de 56% no valor da resistência à compressão.

Ressalta-se que, os valores de resistência à compressão obtidos com Martelo Schmidt são menores que os valores encontrados nos ensaios de compressão uniaxial. Alguns fatores relacionados à diminuição do rebote podem estar ligados à esta diferença de valores, como a dissipação de energia que ocorre durante o ensaio de Martelo Schmidt; o método de fixação das amostras, que foi realizado com apoio em base de madeira e não em base metálica como é recomendado; e a velocidade de carregamento, que ocorre quase instantaneamente no ensaio de Martelo Schmidt e continuamente no ensaio de compressão uniaxial.

A redução da resistência obtida pela proposta de SALLES (2013) foi de 92MPa e a do presente trabalho foi igual à 105MPa, o que representa uma diferença de 13 MPa (12%) entre as duas previsões. Apesar da diferença de valores de resistência, a redução da resistência obtida pelas duas propostas apresenta grandezas muito similares, o que auxilia a corroborar e fortalecer o uso de ambas as previsões propostas para a avaliação de comportamento de materiais similares ao gnaiss da região de Simplício.

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O principal objetivo desta pesquisa foi estabelecer propostas de previsão de comportamento do gnaiss da região do AHE Simplício ao longo do tempo, com ensaios simples, rápidos e baixo custo realizados com Martelo Schmidt, visando uma melhor compreensão do processo de alteração de rochas e juntas. O comportamento do material foi analisado por meio de ensaios de campo e laboratório, e da comparação com os resultados obtidos por SALLES (2013), OLIVEIRA (2017) e STEFFENS (2018).

Este capítulo apresenta e resume as principais conclusões obtidas neste trabalho e as sugestões para pesquisas futuras.

6.1 CONCLUSÕES

Em relação ao equipamento utilizado para os ensaios de resistência à compressão e à metodologia de ensaio adotada, as principais conclusões são:

- i. O uso do Martelo Schmidt para a determinação da resistência à compressão de amostras de rochas e juntas mostrou-se satisfatório;
- ii. A metodologia utilizada para a realização dos ensaios pode ser considerada adequada;
- iii. Apesar da dispersão dos resultados, o Martelo Schmidt foi sensível ao nível de alteração das amostras, sendo possível estabelecer tendências de comportamento das amostras;
- iv. O método de fixação das amostras por meio de uma morsa de bancada mostrou-se eficaz, porém o processo de aperto da morsa pode causar a ruptura das amostras, principalmente as de pequenas dimensões.

Os resultados obtidos nos ensaios com Martelo Schmidt permitem concluir que:

- i. Os valores de rebote obtidos para amostras pequenas são similares aos obtidos para amostras grandes, indicando que o tamanho da amostra não tem influência significativa nos valores de rebote obtidos;
- ii. Os ensaios realizados em amostras pequenas apresentam maior dispersão de valores que a dos ensaios em amostras grandes;

iii. A alteração das amostras pequenas é mais invasiva que a de amostras grandes, sendo observados sinais de alteração tanto na superfície quanto no interior;

iv. Os resultados obtidos mostraram que o equipamento foi capaz de detectar o efeito da alteração na resistência à compressão das amostras.

Quanto aos ábacos disponíveis na literatura e o fornecido pelo fabricante é possível concluir que:

i. O ábaco do fabricante apresenta valores muito reduzidos de resistência à compressão, mesmo para altos valores de rebote;

ii. O ábaco proposto por DEERE & MILLER (1966) apresentou valores de resistência à compressão mais coerentes que o do fabricante ao serem aplicados ao gnaiss de Simplício;

iii. O uso do ábaco fornecido pelo o fabricante é recomendado para ensaios realizados em concreto, enquanto o proposto por DEERE & MILLER (1966) foi baseado em uma série de estudos realizados em amostras de 28 litologias distintas.

Quanto às correlações entre rebote e resistência à compressão uniaxial, conclui-se que:

i. Os resultados obtidos com o ábaco de DEERE & MILLER (1966) foram consistentes com as correlações da literatura, indicando que a metodologia utilizada é satisfatória para avaliação da resistência do material;

ii. Eliminando-se os resultados não representativos, foi possível identificar os limites dentro dos quais o comportamento do Gnaiss Simplício está inserido.

A partir da comparação dos resultados desta pesquisa com os obtidos por SALLES (2013), OLIVEIRA (2017) e STEFFENS (2018), concluiu-se que:

i. A comparação com OLIVEIRA (2017) e STEFFENS (2018), possibilitou o desenvolvimento de uma proposta de previsão do comportamento mecânico do gnaiss Simplício em função do rebote obtido com Martelo Schmidt e da alteração do material ao longo do tempo;

ii. A partir do conceito de índices de alteração e da variação da alteração das amostras, foi possível propor uma relação de previsão da redução do valor de rebote em função do tempo de lixiviação em laboratório;

iii. A relação de previsão indicou que o nível de alteração atingido em cerca de 1 ano de alteração acelerada no equipamento de percolação de SALLES (2013), é equivalente ao nível de alteração alcançado em aproximadamente 10 anos de alteração natural em campo;

iv. A previsão de comportamento do Gnaisse Simplício apontou uma redução da resistência à compressão da rocha de aproximadamente 105MPa (76%) em 50 anos de alteração natural;

v. A comparação de resultados obtidos pela proposta de previsão apresentada por SALLES (2013) e por este trabalho mostra que os valores de resistência obtidos com o martelo Schmidt são menores que os obtidos no ensaio de compressão uniaxial, sendo a diferença justificada principalmente pela dissipação de energia do ensaio com martelo;

vi. As previsões de redução da resistência à compressão do gnaisse Simplício conforme SALLES (2013) e este trabalho apresentaram resultados bastante similares, com diferença de 13% para 50 anos de alteração natural.

6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Este trabalho buscou avaliar o comportamento do material em função de sua alteração ao longo do tempo. A partir dos resultados e análises, são apresentadas sugestões para pesquisas futuras:

i. Realizar ensaios com o Martelo Schmidt tipo L em amostras alteradas em diferentes níveis, para avaliar o efeito da energia do martelo na determinação da resistência à compressão do gnaisse do AHE Simplício;

ii. Realizar ensaios com o Martelo Schmidt tipo L em amostras pequenas e grandes para avaliar se o efeito do tamanho das amostras também não apresenta influência nos resultados;

iii. Realização de ensaios com os martelos tipo L e N em amostras de diferentes litologias, para obtenção de correlações entre os resultados dos dois tipos de martelo;

iv. Desenvolver relações de previsão de comportamento ao longo do tempo para diferentes litologias adotando-se valores de rebote obtidos com Martelo Schmidt.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AREL, E.; TUGRUL, A. Weathering and its relation to geomechanical properties of Cavusbasi granitic rocks in northwestern Turkey. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 60, p. 123–133, 2001.
- ARIKAN, F.; AYDIN, N. Influence of Weathering on the Engineering Properties of Dacites in Northeastern Turkey. **ISRN Soil Science**, p. 1–15, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6502: Rochas e solos**. Rio de Janeiro, 1993.
- ASTM – D5873 – 00. Standard Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000.
- AUFMUTH, R. E. A systematic determination of engineering criteria for rocks. *Bull. Assoc. Eng. Geol.*, v. 11, p. 235-245, 1973.
- AYDAN, Ö.; ULUSAY, R.; TOKASHIKI, N. A new Rock mass quality rating system: Rock Mass Quality Rating (RMQR) and its application to the estimation of geomechanical characteristics of rock masses. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 47, p. 1255–1276, 2014.
- AYDAY, C.; GOKTAN, R. M. Correlations between L and N-type Schmidt hammer rebound values obtained during field testing. *Rock Characterization: ISRM Symposium, Eurock '92*, Chester, UK, p. 14–17, 1992.
- AYDIN, A. ISRM Suggested Method for Determination of the Schmidt Hammer Rebound Hardness: Revised Version. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 46, p. 627–634, 2009.
- AYDIN, A.; BASU, A. The schmidt hammer in rock material characterization. **Engineering Geology**, v. 81, p. 1–14, 2005.
- BARTON, N. Review of a new shear-strength criterion for rock joints. **Engineering Geology**, v. 7 (4), p. 287–332, 1973.
- BARTON, N.; CHOUBEY, V. The shear strength of rock joints in theory and practice. **Rock Mechanics**, v. 10 (1), n. 1–2, p. 1–54, 1977.
- BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. **Rock Mechanics**, v. 6, p. 189–236, 1974.
- BEGONHA, A. J. S. **Alteração das Rochas Graníticas do Norte e Centro de Portugal**. 1989. Dissertação (mestrado), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade

Nova de Lisboa, Porto.

- BEVERLY, B. E.; SCHOENWOLF, D. A.; BRIERLY, G. S. Correlations of rock index values with engineering properties and the classification of intact rock. 1979.
- BRADY, B. H. G. .; BROWN, E. T. **Rock mechanics for underground mining**. 3. ed. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Springer Science + Business Media, Inc., v. 279, 2005.
- BRANDI, I.; BARBOSA, M.; GUIMARÃES, R. **Resistência geomecânica de cavidades naturais subterrâneas em terrenos ferríferos , Carajás- Pa. V. 2113**, p. 627–634, 2015.
- BUYUKSAGIS, I. S.; GOKTAN, R. M. The effect of Schmidt hammer type on uniaxial compressive strength prediction of rock. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, v. 44, p. 299–307, 2007.
- CARGIL, J. S.; SHAKOOR, A. Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, v. 27, p. 495-503, 1990.
- CRUZ, P. T. DA. **100 Barragens Brasileiras: Casos históricos, Materiais de Construção, Projeto**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 1996.
- DEARMAN, W. R.; IRFAN, T. Y. Assessment of the degree of weathering in granite using petrographic and physical index tests. *In: Int. Symp. on Deterioration and Protection of Stone Monuments*. Unesco, Paris, p. 1-35, 1978.
- DEERE, D. U.; MILLER, R. P. **Engineering classification and index properties for intact rock**. Technical report No. AFWL-TR-65-116, New Mexico, p. 300, 1966.
- DEHLER, N. M.; MACHADO, R. Geometria e cinemática da aba sul da estrutura divergente do Rio Paraíba do Sul ao longo da seção Areal-Três Rios , Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 32, n. 4, p. 481–490, 2002.
- DIAS, I. O. **Procedimentos para implantação de uma pequena central hidrelétrica, do estudo de inventário à outorga**. 2014. 97 p. Monografia (Graduação em engenharia civil) - Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro.
- FARJALLAT, J. E. S. **Estudos experimentais sobre a degradação de rochas basálticas: Basaltos da Barragem de Capivara, Rio Paranapanema**. 1971. 128 p. Tese de doutoramento – Instituto de Geociências e Astronomia, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo.

- FARJALLAT, J. E. S.; DE BARROS, F. P. .; YOSHIDA, R. .; DE OLIVEIRA, J. A. N. Alguns problemas de desagregação dos basaltos da Barragem de Capivara, Rio Paranapanema. *In: 4ª Semana Paulista de Geologia Aplicada*, v. II A, p. 73–102, 1972.
- FARRAN, J.; THÉNOZ, B. L'alterabilité des roches, ses facteurs as prévision. **Annales de L'Inst. Tech. Du Batim. et des Trav. Publ.**, Paris, no 215, p.1534-1548, 1965.
- FENER, M.; KAHRAMAN, S.; BILGIL, A.; GUNAYDIN, O. A Comparative Evaluation of Indirect Methods to Estimate the Compressive Strength of Rocks. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 38, n. 4, p. 329–343, 2005.
- FERREIRA, G. S. **Estudo de estabilidade e tensões in situ na extração de rochas ornamentais no município de Santo Antônio de Pádua – RJ**. 2004. Dissertação (mestrado), Laboratório de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro.
- FLEURY, S. V.; OLKOWSKI, G. F.; KUROKAWA, E. Proposta de metodologia para diferenciação de rochas duras e brandas em auditorias com o uso do Esclerômetro Silver Schmidt. **Encontro Técnico Nacional de Auditoria e Obras Públicas - ENAOP**, p. 1–12, 2012.
- FRASCÁ, M. H. B. O., SARTORI, P. L. P. Minerais e Rochas. *In: Oliveira, A. M. S., Brito, S. N. A. (eds), Geologia de Engenharia*, 1 ed. São Paulo, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia - ABGE, 1998.
- FRAZÃO, E. B.; CARUSO, L. G. Síntese do conhecimento sobre alterabilidade de rochas basálticas como material de construção em algumas barragens da Bacia do Alto Paraná. *In: Simpósio sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná*, 1983, v. 2A, p. 21-33, São Paulo.
- FRAZÃO, E. B. **Metodologia para avaliação da alterabilidade de rochas a partir do estudo experimental em amostras de basaltos da U.H.E. de Três Irmãos – Estado de São Paulo**. 1993. 178 p. Tese (Doutorado em geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - USP, São Carlos.
- FRAZÃO, E. B. **Tecnologia de rochas na construção civil**. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia - ABGE, 2002.
- FRAZÃO, E. B. **Alteração de Rochas – Como Critério de Seleção de Agregados**. 2. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia - ABGE, 2012.
- GHOSE, A. K.; CHAKRABORTI, S. Empirical strength indices of Indian coals – an

- investigation. *In: 27th US Symp. on Rock Mech.*, Rotterdam, p. 59-61, 1986.
- GOKCEOGLU, C.; ZORLU, K.; CERYAN, S.; NEFESLIOGLU, H. A. A comparative study on indirect determination of degree of weathering of granites from some physical and strength parameters by two soft computing techniques. **Materials Characterization**, v. 60(11), p. 1317-1327, 2009.
- GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidades de taludes naturais e de escavação**. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 1983.
- GUERREIRO, H. J. P. **Exploração subterrânea de mármore – Aspectos geotécnicos**. 2000. Dissertação de M.Sc., Georrecursos – Área de Geotecnia, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal.
- GUPTA, A. S. .; SESHAGIRI RAO, K. Index properties of weathered rocks: inter-relationships and applicability. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 57, p. 161–172, 1998.
- HACK, R.; PRICE, D.; RENGERS, N. A new approach to rock slope stability - a probability classification (SSPC). **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 62, n. 2, p. pp 167-184., 2002.
- HARAMY, K. Y.; DEMARCO, M. J. Use of Schmidt hammer for rock and coal testing. *In: 26th US Symp. on Rock Mech.*, 26-28 June, Rapid City, Balkema, Rotterdam, p. 549-555, 1985.
- HEIDARI, M.; MOMENI, A. A.; NASERI, F. New weathering classifications for granitic rocks based on geomechanical parameters New weathering classifications for granitic rocks based on geomechanical parameters. **Engineering Geology**, v. 166, n. November, p. 65–73, 2013.
- HOEK, E. & BRAY, J. W. (1981). **Rock slope engineering**. Institution of Mining and Metallurgy, London, p. 358.
- IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Estudos geológico-geotécnicos para caracterização e classificação de maciços rochosos para projetos de engenharia (túneis, lavra a céu aberto e barragens)**. São Paulo (IPT – Relatório, 19569), 1984.
- ISRM – International Society for Rock Mechanics. **Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks**. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Geomech. Abstr.*, p. 89-97, 1978.

- ISRM – International Society for Rock Mechanics. **Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks.** Rock characterization, testing and monitoring. ISRM suggested Methods. Oxford: Pergamon, p. 95–6, 1981.
- KAHRAMAN S.; KORKMAZVE, S.; AKCAY, M.. The reliability of using Schmidt hammer and point load strength test in assessing uniaxial compressive strength. **K.T.U. Department of Geological Engineering 30th year symposium book,** Trabzon, p. 362– 369, 1996.
- KAHRAMAN, S. Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. **International Journal of Rock Mechanics e Mining Sciences**, v. 38(7), p. 981–994, 2001.
- KATZ, O. .; RECHES, Z. .; ROEGIERS, J.-C. Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science**, v. 37, p. 723–728, 2000.
- KIDYBINSKI, A. Method of investigation, estimation and classification of roofs in the USA for the selection of suitable mechanized support for long walls, Project No. 14-01-0001-1450, Central Mining Institute, Katowice, Poland, p. 25, 1980.
- KILIC, A.; TEYMEN, A. Determination of mechanical properties of rocks using simple methods. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 67(2), p. 237- 244, 2008.
- LIMA, C; MENEZES, J. E.; Propriedades Índice e Classificação das Rochas: Textos de apoio da matéria Geologia de Engenharia ministrada na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - FEUP, Portugal, 2008. Disponível em: <http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_3_GE.pdf>. Acesso em 27/12/2018.
- LOPES, M. C. **Comportamento geotécnico e mecanismos mina Córrego do Sítio.** 2006. 94 p. Dissertação (mestrado em engenharia mineral) – Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.
- MACHADO, D. L. **Comportamento Geomecânico de Estruturas Reliquiarias de um Solo Residual de Gnaisse da AHE Simplicio.** 2012. 143 p. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2012.
- MACIEL FILHO, C. L. **Introdução à geologia de engenharia.** 2. ed. Santa Maria: Editora da Universidade Federal de Santa Maria, 1997.

- MAIA, P. C. A. **Avaliação do Comportamento Geomecânico e de Alterabilidade de Enrocamentos**. 2001. 289 p. Tese (Doutorado em ciências em engenharia civil: geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC, Rio de Janeiro, 2001.
- MAIA, P. C. de A.; SAYÃO, A. S. F. J.; NUNES, A. L. L. S.; CAPRONI JR., N. Compressibilidade de enrocamentos basálticos. In: **XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens**, 2002, pp. 81–92.
- MAIA, P. C. de A.; SAYÃO, A. S. F. J.; NUNES, A. L. L. S. Considerações sobre a alteração de enrocamentos. In: **XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens**, 2003, pp. 1–15, 2003.
- MAIA, P. C. A.; SALLES, R. O. Estudo experimental da durabilidade de rochas ornamentais através de procedimentos especiais de laboratório. In: **XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, 2006, Curitiba/PR.
- MARCHESI, V. R. **Modelagem geomecânica tridimensional de maciços rochosos para análise bidimensional da estabilidade dos taludes de escavação da casa de força do AHE-Simplício**. 2008. 129 p. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Programa de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC, Rio de Janeiro.
- MARINHO, C. A. S. **Estudos geológicos-geotécnicos do AHE Simplício**. 2007. 98 p. Monografia (Graduação em geologia) - Departamento de Geociências, Instituto de Agronomia, UFRRJ, Seropédica, RJ, Brasil.
- MIŠČEVIĆ, P.; VLASTELICA, G. Shear strength of weathered soft rock – proposal of test method additions. **Regional Symposium of the International Society for Rock Mechanics - Eurock 2009**, p. 303–308, 2009.
- NUNES, A. L. L. S. **Apostila: Princípios Básicos de Mecânica das Rochas**. Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.
- OLIVEIRA, J. R. **Classificação e resistência de juntas rochosas sãs e alteradas**. 2017. 167 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2017.

- OLIVEIRA, J. R.; STEFFENS, A. H. D.; NUNES, A. L. L. DA S. Resistência de juntas rochosas alteradas com Martelo Schmidt. Em F. Sousa (Presidência), **16º Congresso Nacional de Geotecnia**, Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC) dos Açores & Sociedade Portuguesa de Geotecnia (SPG), Ponta Delgada, Açores, Portugal, p. 12, 2018.
- O'ROURKE, J. E. Rock index properties for geoen지니어ing in underground development, *Min. Eng.*, p. 106-110, 1989.
- ÖZVAN, A.; DINÇER, I.; ACAR, A.; ÖZVAN, B. The effects of discontinuity surface roughness on the shear strength of weathered granite joints. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 73, n. 3, p. 801–813, 2014.
- PELTIER, L. C. The geographic cycle in periglacial regions as it is related to climate geomorphology. *In: Annals of the association of American Geographers*, v. 40, p. 214-236, 1950.
- PRESS, F.; SIEVER, R.; GROTZINGER, J.; JORDAN, T. H. **Para entender a terra**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- QUEIROZ, R. C. **Geologia e Geotecnia Básica para Engenharia Civil**. 1 ed. São Carlos: editora RiMa, 2009.
- ROKO, R. O. .; DAEMEN, J. J. K.; MYERS, D. E. Variogram characterization of joint surface: morphology and asperity deformation during shearing. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 34, n. 1, p. 71–84, 1997.
- SACHPAZIS, C. I. Correlating Schmidt hardness with compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks. **Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.**, v. 42, p. 75-83, 1990.
- SALLES, R. O. **Comportamento geomecânico e de alterabilidade da rocha gnáissica da obra do AHE Simplício**. 2013. 206 p. Tese (Doutorado em engenharia civil) - Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.
- SHALABI, F. I.; CORDING, E. J.; AL-HATTAMLEH, O. H. Estimation of rock engineering properties using hardness tests. v. 90, p. 138–147, 2007.
- SHOREY, P. R.; BARAT, D.; DAS, M. N.; MUKHERJEE, K. P.; SINGH, B. Schmidt hammer rebound data for estimation of large scale in situ coal strength. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Geomech. Abstr.**, v. 21, p. 39-42, 1984.
- SIGNER, S. **Estudo Experimental da Resistência ao Cisalhamento dos Basaltos Desagregados e Desagregáveis de Capivara**. 1973. Dissertação (Mestrado),

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP.

- SINGH, R. N.; HASSANI, F. P.; ELKINGTON, P. A. S. The application of strength and deformation index testing to the stability assessment of coal measures excavations, *In: 24th US Symp. On Rock Mech.*, Texas A and M Univ. AEG, Balkema, Rotterdam, p. 599-609, 1983.
- STEFFENS, A. H. D. **Resistência de juntas de rocha naturais e alteradas artificialmente**. 2018. 222 p. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2018.
- TEIXEIRA, W.; TOLEDO, C.; FAIRCHILD, T.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. Reimpressão. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.
- TORABI, S. R.; ATAELI, M.; JAVANSHIR, M. Application of Schmidt rebound number for estimating rock strength under specific geological conditions. v. 1, n. 2, p. 1–8, 2010.
- VALERIANO, C. M. **Reconhecimento Geológico-Estrutural da Área do AHE Simplício (RJ)**. 2006. Relatório técnico.
- VALLEJO, L. I. G. D.; FERRER, M.; ORTUÑO, L.; OTEO, C. **Ingeniería Geológica**. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, 2002.
- VIANA, L. L. **Individualização de orto e paragneisses que ocorrem no sítio de obras do AHE Simplício Queda – Única, Rio de Janeiro, RJ**. 2010. 41 p. Monografia (Graduação em geologia) - Departamento de Geociências, Instituto de Agronomia, UFRRJ, Seropédica, RJ, Brasil.
- WEST, G. **The field description of engineering soils and rocks**. Geological Society of London Professional Handbook, Open University Press. Milton Keynes, Philadelphia, 1991.
- WILLIAMS, R. B. G.; ROBINSON, D. A. The effect of surface texture on the determination of the surface hardness of rock using the schmidt hammer. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 8, n. 3, p. 289–292, 1983.
- XU, S.; GRASSO, P.; MAHTAB, A. Use of Schmidt hammer for estimating mechanical properties of weak rock. *In: 6th International IAEG Congress*, v. 1, Balkema, Rotterdam, p. 511-519, 1990.
- YASAR, E.; ERDOGAN, Y. Estimation of rock physiomechanical properties using hardness methods, **Eng. Geol.**, v. 71, p. 281-288, 2004.

YILMAZ, I.; SENDIR, H. Correlation of Schmidt hardness with unconfined compressive strength and Young's modulus in gypsum from Sivas (Turkey). **Eng. Geol.**, v. 66, p. 211-219, 2002.

APÊNDICE I – FICHAS DE CLASSIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS

Quadro AI.1 – Ficha de classificação – Amostra B1-P01

Ficha de classificação		
Amostra	B1-P01	
Tamanho	Pequena	
Cor	Heterogênea	
Dureza	Risca o vidro	
Estrutura	Foliada	
Textura	Cristalina	
	Fanerítica	
Granulação	Fina a média	
Grau de alteração	Inalterada	

Quadro AI.2 – Ficha de classificação – Amostra B1-P02

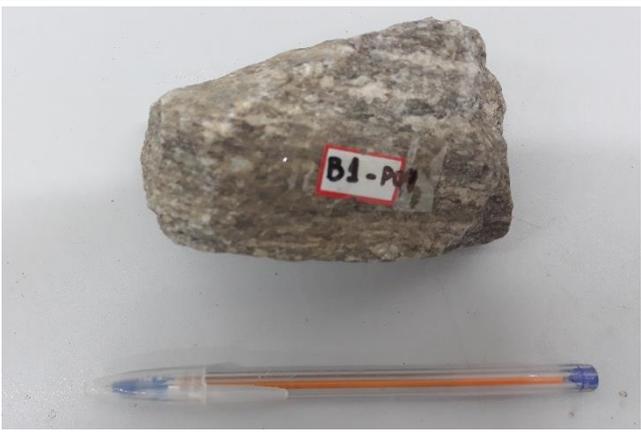
Ficha de classificação		
Amostra	B1-P02	
Tamanho	Pequena	
Cor	Heterogênea	
Dureza	Risca o vidro	
Estrutura	Foliada	
Textura	Cristalina	
	Afanítica	
Granulação	Fina a média	
Grau de alteração	Inalterada	

Quadro AI.3 – Ficha de classificação – Amostra B1-P03

Ficha de classificação		
Amostra	B1-P03	
Tamanho	Pequena	
Cor	Heterogênea	
Dureza	Risca o vidro	
Estrutura	Foliada	
Textura	Cristalina	
	Fanerítica	
Granulação	Fina a média	
Grau de alteração	Inalterada	

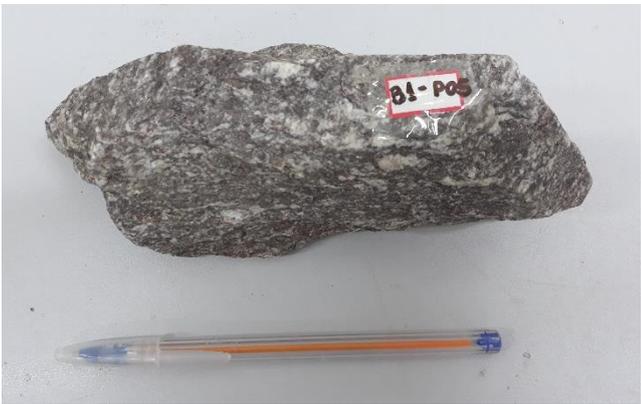
Quadro AI.4 – Ficha de classificação – Amostra B1-P04

Ficha de classificação	
Amostra	B1-P04
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a média
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.5 – Ficha de classificação – Amostra B1-P05

Ficha de classificação	
Amostra	B1-P05
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a média
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.6 – Ficha de classificação – Amostra B1-P06

Ficha de classificação	
Amostra	B1-P06
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.7 – Ficha de classificação – Amostra B1-P07

Ficha de classificação	
Amostra	B1-P07
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscada pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.8 – Ficha de classificação – Amostra B1-P08

Ficha de classificação	
Amostra	B1-P08
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a média
Grau de alteração	Inalterada



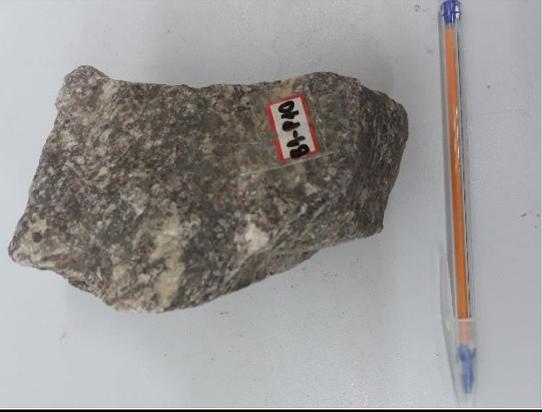
Quadro AI.9 – Ficha de classificação – Amostra B1-P09

Ficha de classificação	
Amostra	B1-P09
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Levemente alterada



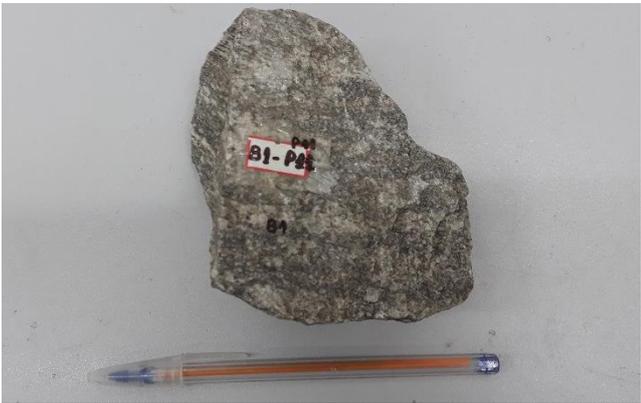
Quadro AI.10 – Ficha de classificação – Amostra B1-P10

Ficha de classificação	
Amostra	B1-P10
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.11 – Ficha de classificação – Amostra B1-P11

Ficha de classificação	
Amostra	B1-P11
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a média
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.12 – Ficha de classificação – Amostra B1-P12

Ficha de classificação	
Amostra	B1-P12
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a média
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.13 – Ficha de classificação – Amostra B1-P13

Ficha de classificação	
Amostra	B1-P11
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a média
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.14 – Ficha de classificação – Amostra B1-P14

Ficha de classificação	
Amostra	B1-P14
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscada pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a média
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.15 – Ficha de classificação – Amostra B1-P15

Ficha de classificação	
Amostra	B1-P15
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscada pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.16 – Ficha de classificação – Amostra B1-P16

Ficha de classificação		
Amostra	B1-P16	
Tamanho	Pequena	
Cor	Heterogênea	
Dureza	Risca o vidro	
Estrutura	Foliada	
Textura	Cristalina	
	Afanítica	
Granulação	Fina a média	
Grau de alteração	Levemente alterada	

Quadro AI.17 – Ficha de classificação – Amostra B1-P17

Ficha de classificação		
Amostra	B1-P17	
Tamanho	Pequena	
Cor	Heterogênea	
Dureza	Riscada pelo canivete	
Estrutura	Foliada	
Textura	Cristalina	
	Afanítica	
Granulação	Fina	
Grau de alteração	Levemente alterada	

Quadro AI.18 – Ficha de classificação – Amostra B1-P18

Ficha de classificação		
Amostra	B1-P18	
Tamanho	Pequena	
Cor	Heterogênea	
Dureza	Riscada pelo canivete	
Estrutura	Foliada	
Textura	Cristalina	
	Afanítica	
Granulação	Fina	
Grau de alteração	Levemente alterada	

Quadro AI.19 – Ficha de classificação – Amostra B1-P19

Ficha de classificação	
Amostra	B1-P19
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.20 – Ficha de classificação – Amostra B1-P20

Ficha de classificação	
Amostra	B1-P20
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.21 – Ficha de classificação – Amostra B2-P01

Ficha de classificação	
Amostra	B2-P01
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina a média
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.22 – Ficha de classificação – Amostra B2-P02

Ficha de classificação	
Amostra	B2-P02
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.23 – Ficha de classificação – Amostra B2-P03

Ficha de classificação	
Amostra	B2-P03
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a média
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.24 – Ficha de classificação – Amostra B2-P04

Ficha de classificação	
Amostra	B2-P04
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.25 – Ficha de classificação – Amostra B2-P05

Ficha de classificação	
Amostra	B2-P05
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.26 – Ficha de classificação – Amostra B2-P06

Ficha de classificação	
Amostra	B2-P06
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Média
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.27 – Ficha de classificação – Amostra B2-P07

Ficha de classificação	
Amostra	B2-P07
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Média
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.28 – Ficha de classificação – Amostra B2-P08

Ficha de classificação	
Amostra	B2-P08
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.29 – Ficha de classificação – Amostra B2-P09

Ficha de classificação	
Amostra	B2-P09
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscada pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.30 – Ficha de classificação – Amostra B2-P10

Ficha de classificação	
Amostra	B2-P10
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Média
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.31 – Ficha de classificação – Amostra B2-P11

Ficha de classificação	
Amostra	B2-P11
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.32 – Ficha de classificação – Amostra B2-P12

Ficha de classificação	
Amostra	B2-P12
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscada pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a média
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.33 – Ficha de classificação – Amostra B2-P13

Ficha de classificação	
Amostra	B2-P13
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.34 – Ficha de classificação – Amostra B2-P14

Ficha de classificação	
Amostra	B2-P14
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscada pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Média
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.35 – Ficha de classificação – Amostra B3-P01

Ficha de classificação	
Amostra	B3-P01
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a Média
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.36 – Ficha de classificação – Amostra B3-P02

Ficha de classificação	
Amostra	B3-P02
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Média
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.37 – Ficha de classificação – Amostra B3-P03

Ficha de classificação	
Amostra	B3-P03
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a Média
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.38 – Ficha de classificação – Amostra B3-P04

Ficha de classificação	
Amostra	B3-P04
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a Média
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.39 – Ficha de classificação – Amostra B3-P05

Ficha de classificação	
Amostra	B3-P05
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a Média
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.40 – Ficha de classificação – Amostra B3-P06

Ficha de classificação	
Amostra	B3-P06
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a Média
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.41 – Ficha de classificação – Amostra B3-P07

Ficha de classificação	
Amostra	B3-P07
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscada pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a Média
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.42 – Ficha de classificação – Amostra B3-P08

Ficha de classificação	
Amostra	B3-P08
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscada pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a Média
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.43 – Ficha de classificação – Amostra B3-P09

Ficha de classificação	
Amostra	B3-P09
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.44 – Ficha de classificação – Amostra B3-P10

Ficha de classificação	
Amostra	B3-P10
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.45 – Ficha de classificação – Amostra B3-P11

Ficha de classificação	
Amostra	B3-P11
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.46 – Ficha de classificação – Amostra B3-P12

Ficha de classificação	
Amostra	B3-P012
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.47 – Ficha de classificação – Amostra B3-P13

Ficha de classificação	
Amostra	B3-P13
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.48 – Ficha de classificação – Amostra B3-P14

Ficha de classificação	
Amostra	B3-P14
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.49 – Ficha de classificação – Amostra B3-P15

Ficha de classificação	
Amostra	B3-P15
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.50 – Ficha de classificação – Amostra B4-P01

Ficha de classificação	
Amostra	B4-P01
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscada pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a Média
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.51 – Ficha de classificação – Amostra B4-P02

Ficha de classificação	
Amostra	B4-P02
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a Média
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.52 – Ficha de classificação – Amostra B4-P03

Ficha de classificação	
Amostra	B4-P03
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.53 – Ficha de classificação – Amostra B4-P04

Ficha de classificação	
Amostra	B4-P04
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Média
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.54 – Ficha de classificação – Amostra B4-P05

Ficha de classificação	
Amostra	B4-P05
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Média
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.55 – Ficha de classificação – Amostra B4-P06

Ficha de classificação	
Amostra	B4-P06
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscada pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.56 – Ficha de classificação – Amostra B4-P07

Ficha de classificação	
Amostra	B4-P07
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscada pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Média
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.57 – Ficha de classificação – Amostra B4-P08

Ficha de classificação	
Amostra	B4-P08
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.58 – Ficha de classificação – Amostra B4-P09

Ficha de classificação	
Amostra	B4-P09
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



Quadro AI.59 – Ficha de classificação – Amostra B4-P10

Ficha de classificação	
Amostra	B4-P10
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscada pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.60 – Ficha de classificação – Amostra B4-P11

Ficha de classificação	
Amostra	B4-P11
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.61 – Ficha de classificação – Amostra B4-P12

Ficha de classificação	
Amostra	B4-P12
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.62 – Ficha de classificação – Amostra B4-P13

Ficha de classificação	
Amostra	B4-P13
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a média
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.63 – Ficha de classificação – Amostra B4-P14

Ficha de classificação	
Amostra	B4-P14
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Média
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.64 – Ficha de classificação – Amostra B4-P15

Ficha de classificação	
Amostra	B4-P15
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscada pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.65 – Ficha de classificação – Amostra B5-P01

Ficha de classificação	
Amostra	B5-P01
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a Média
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.66 – Ficha de classificação – Amostra B5-P02

Ficha de classificação	
Amostra	B5-P02
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a Média
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.67 – Ficha de classificação – Amostra B5-P03

Ficha de classificação	
Amostra	B5-P03
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a Média
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.68 – Ficha de classificação – Amostra B5-P04

Ficha de classificação	
Amostra	B5-P04
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a Média
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.69 – Ficha de classificação – Amostra B5-P05

Ficha de classificação	
Amostra	B5-P05
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a Média
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.70 – Ficha de classificação – Amostra B5-P06

Ficha de classificação	
Amostra	B5-P06
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a Média
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.71 – Ficha de classificação – Amostra B5-P07

Ficha de classificação	
Amostra	B5-P07
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a Média
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.72 – Ficha de classificação – Amostra B5-P08

Ficha de classificação	
Amostra	B5-P08
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.73 – Ficha de classificação – Amostra B5-P09

Ficha de classificação	
Amostra	B5-P09
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.74 – Ficha de classificação – Amostra B5-P10

Ficha de classificação	
Amostra	B5-P10
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a Média
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.75 – Ficha de classificação – Amostra B5-P11

Ficha de classificação	
Amostra	B5-P11
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a Média
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.76 – Ficha de classificação – Amostra B5-P12

Ficha de classificação	
Amostra	B5-P12
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a Média
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.77 – Ficha de classificação – Amostra B5-P13

Ficha de classificação	
Amostra	B5-P13
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a Média
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.78 – Ficha de classificação – Amostra B5-P14

Ficha de classificação	
Amostra	B5-P14
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a Média
Grau de alteração	Inalterada



Quadro AI.79 – Ficha de classificação – Amostra B5-P15

Ficha de classificação		
Amostra	B5-P15	
Tamanho	Grande	
Cor	Heterogênea	
Dureza	Riscado pelo canivete	
Estrutura	Foliada	
Textura	Cristalina	
	Afanítica	
Granulação	Fina	
Grau de alteração	Inalterada	

Quadro AI.80 – Ficha de classificação – Amostra B10-P01

Ficha de classificação		
Amostra	B10-P01	
Tamanho	Pequena	
Cor	Heterogênea	
Dureza	Riscado pelo canivete	
Estrutura	Foliada	
Textura	Cristalina	
	Afanítica	
Granulação	Fina	
Grau de alteração	Levemente alterada	

Quadro AI.81 – Ficha de classificação – Amostra B10-P02

Ficha de classificação		
Amostra	B10-P02	
Tamanho	Pequena	
Cor	Heterogênea	
Dureza	Riscado pelo canivete	
Estrutura	Foliada	
Textura	Cristalina	
	Afanítica	
Granulação	Fina	
Grau de alteração	Levemente alterada	

Quadro AI.82 – Ficha de classificação – Amostra B10-P03

Ficha de classificação	
Amostra	B10-P03
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina a Média
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.83 – Ficha de classificação – Amostra B10-P04

Ficha de classificação	
Amostra	B10-P04
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.84 – Ficha de classificação – Amostra B10-P05

Ficha de classificação	
Amostra	B10-P05
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



Quadro AI.85 – Ficha de classificação – Amostra B10-P06

Ficha de classificação	
Amostra	B10-P06
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



Quadro AI.86 – Ficha de classificação – Amostra B10-P07

Ficha de classificação	
Amostra	B10-P07
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.87 – Ficha de classificação – Amostra B10-P08

Ficha de classificação	
Amostra	B10-P08
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



Quadro AI.88 – Ficha de classificação – Amostra B10-P09

Ficha de classificação	
Amostra	B10-P09
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



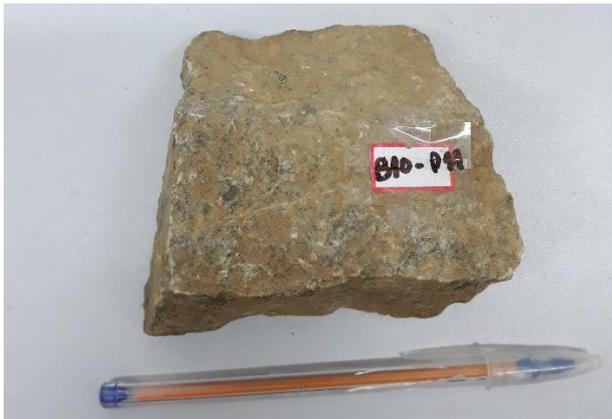
Quadro AI.89 – Ficha de classificação – Amostra B10-P10

Ficha de classificação	
Amostra	B10-P10
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



Quadro AI.90 – Ficha de classificação – Amostra B10-P11

Ficha de classificação	
Amostra	B10-P11
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



Quadro AI.91 – Ficha de classificação – Amostra B10-P12

Ficha de classificação	
Amostra	B10-P12
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



Quadro AI.92 – Ficha de classificação – Amostra B10-P13

Ficha de classificação	
Amostra	B10-P13
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



Quadro AI.93 – Ficha de classificação – Amostra B10-P14

Ficha de classificação	
Amostra	B10-P14
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



Quadro AI.94 – Ficha de classificação – Amostra B10-P15

Ficha de classificação	
Amostra	B10-P15
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



Quadro AI.95 – Ficha de classificação – Amostra B10-P16

Ficha de classificação	
Amostra	B10-P16
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.96 – Ficha de classificação – Amostra B10-P17

Ficha de classificação	
Amostra	B10-P17
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Fanerítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



Quadro AI.97 – Ficha de classificação – Amostra B10-P18

Ficha de classificação	
Amostra	B10-P18
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscada pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.98 – Ficha de classificação – Amostra B10-P19

Ficha de classificação	
Amostra	B10-P19
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



Quadro AI.99 – Ficha de classificação – Amostra B10-P20

Ficha de classificação	
Amostra	B10-P20
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



Quadro AI.100 – Ficha de classificação – Amostra B10-P21

Ficha de classificação	
Amostra	B10-P21
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



Quadro AI.101 – Ficha de classificação – Amostra B10-P22

Ficha de classificação	
Amostra	B10-P22
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



Quadro AI.102 – Ficha de classificação – Amostra B10-P23

Ficha de classificação	
Amostra	B10-P23
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



Quadro AI.103 – Ficha de classificação – Amostra B10-P24

Ficha de classificação	
Amostra	B10-P24
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



Quadro AI.104 – Ficha de classificação – Amostra B10-P25

Ficha de classificação	
Amostra	B10-P25
Tamanho	Pequena
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



Quadro AI.105 – Ficha de classificação – Amostra B11-P01

Ficha de classificação	
Amostra	B11-P01
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Levemente alterada



Quadro AI.106 – Ficha de classificação – Amostra B11-P02

Ficha de classificação	
Amostra	B11-P02
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



Quadro AI.107 – Ficha de classificação – Amostra B11-P03

Ficha de classificação	
Amostra	B11-P03
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



Quadro AI.108 – Ficha de classificação – Amostra B11-P04

Ficha de classificação	
Amostra	B11-P04
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



Quadro AI.109 – Ficha de classificação – Amostra B11-P05

Ficha de classificação	
Amostra	B11-P05
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



Quadro AI.110 – Ficha de classificação – Amostra B11-P06

Ficha de classificação	
Amostra	B11-P06
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Risca o vidro
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



Quadro AI.111 – Ficha de classificação – Amostra B11-P07

Ficha de classificação	
Amostra	B11-P07
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



Quadro AI.112 – Ficha de classificação – Amostra B11-P08

Ficha de classificação	
Amostra	B11-P08
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



Quadro AI.113 – Ficha de classificação – Amostra B11-P09

Ficha de classificação	
Amostra	B11-P09
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



Quadro AI.114 – Ficha de classificação – Amostra B11-P10

Ficha de classificação	
Amostra	B11-P10
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



Quadro AI.115 – Ficha de classificação – Amostra B11-P11

Ficha de classificação	
Amostra	B11-P11
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



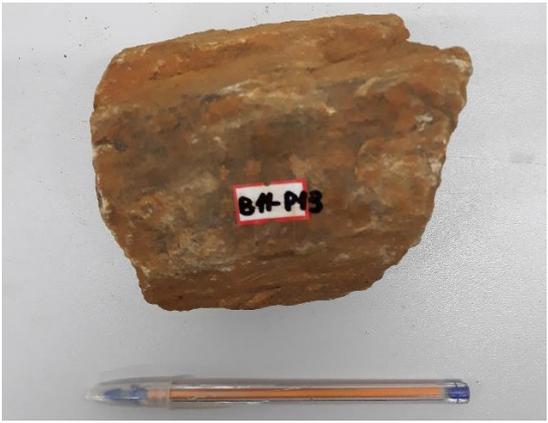
Quadro AI.116 – Ficha de classificação – Amostra B11-P12

Ficha de classificação	
Amostra	B11-P12
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



Quadro AI.117 – Ficha de classificação – Amostra B11-P13

Ficha de classificação	
Amostra	B11-P13
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



Quadro AI.118 – Ficha de classificação – Amostra B11-P14

Ficha de classificação	
Amostra	B11-P14
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada



Quadro AI.119 – Ficha de classificação – Amostra B11-P15

Ficha de classificação	
Amostra	B11-P15
Tamanho	Grande
Cor	Heterogênea
Dureza	Riscado pelo canivete
Estrutura	Foliada
Textura	Cristalina
	Afanítica
Granulação	Fina
Grau de alteração	Moderadamente alterada

