

ALTERABILIDADE E COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DE ROCHAS NO AHE SIMPLÍCIO

Alterability and geomechanical behavior of rocks at Simplício Hydroelectric Complex

Patrícia Martins Lopes^a, Eduardo Coutinho Saliba^a, Anna Laura Lopes da Silva Nunes^a

^a COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

RESUMO – A alteração de rochas e juntas provoca variações nas características geotécnicas do maciço rochoso, reduzindo a sua resistência e a segurança das obras de engenharia. O processo de alteração química introduz modificações do material, alterando o comportamento geomecânico originalmente previsto no projeto. A previsão do comportamento das rochas ao longo do tempo é de grande importância para que seja elaborado o plano de manutenção ou de reforço do material rochoso. Este artigo apresenta um estudo detalhado sobre a variação do comportamento mecânico das juntas e dos maciços de rocha gnáissica que compõem o circuito hidráulico do Aproveitamento Hidrelétrico Simplício, em função da alteração natural ao longo do tempo. Foram realizados ensaios com Martelo Schmidt no campo, em rocha nos estados alterado e inalterado e em juntas alteradas, e em laboratório, em rochas e juntas nos estados alterado e inalterado. Os ensaios com Martelo Schmidt mostraram inúmeras vantagens de seu uso na prática, tais como custo reduzido, rapidez, e facilidade de execução. Além disso, o ensaio com martelo mostra versatilidade de aplicação em amostras diversas, com restrições mínimas de área, volume e qualidade da superfície. A análise de outros estudos com o mesmo material de Simplício possibilitou a proposição de relações empíricas para a previsão de comportamento do material em função do tempo de alteração, do valor de rebote do martelo e da resistência à compressão uniaxial.

SYNOPSIS – Weathering of joints modifies the geotechnical properties of rock masses, decreasing its strength and the safety of engineering works. The chemical alteration process introduces several changes in the material and it modifies the geomechanical behavior defined in the original design. Prediction of rock degradation over the time is essential to develop a rock reinforcement and maintenance plan to the project. This paper presents a comprehensive study on the mechanical behavior of the joints and the gneissic mass at the hydraulic circuit of Simplício Hydroelectric Complex. A series of in situ and laboratory Schmidt Hammer tests were carried out to investigate the rock and joints behavior, under natural and weathered conditions. The use of Schmidt Hammer's tests proved to be practical, fast and simple, with low cost and great versatility for use in samples of different sizes, with minimum restrictions of area, volume and surface quality. The review analysis of previous studies on the same Simplício's material resulted in the formulation of empirical relations for predicting the rock behavior with basis on alteration time, hammer's rebound value, and uniaxial compressive strength.

Palavras Chave – Alterabilidade, resistência à compressão uniaxial, Aproveitamento Hidrelétrico Simplício.

Keywords – Alterability, uniaxial compressive strength, Simplício Hydroelectric Complex.

E-mails: pathy.malopes@gmail.com (P. Lopes), eduardo.saliba@coc.ufrj.br (E. saliba), alaura@coc.ufrj.br (A. Nunes)

1 – INTRODUÇÃO

O comportamento dos maciços rochosos vem sendo amplamente estudado ao longo das últimas décadas. 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 das rochas reside na maior compreensão dos processos naturais de alteração e suas consequências no comportamento geomecânico das rochas, possibilitando sua previsão e avaliando a necessidade de intervenções de manutenção e/ou de reforço do maciço.

A alteração é resultado de um processo geológico que ocorre devido à exposição das rochas a agentes intempéricos. Esta exposição provoca modificações físicas e químicas nas propriedades das rochas, que podem levar ao enfraquecimento do maciço em decorrência do surgimento de fissuras, da alteração dos minerais e da redução da resistência do material (Guidicini & Nieble, 1983; Teixeira *et al.*, 2000; Maia, 2001; Maia *et al.*, 2002 e 2003; Press *et al.*, 2006).

Os principais efeitos da alteração das rochas são: a redução da resistência, o aumento da deformabilidade, o aumento da porosidade e a diminuição da coesão entre os minerais do material rochoso (Farjallat, 1972; Barton, 1973; Maia, 2001). Destacam-se as reduções das resistências à compressão e à tração do maciço rochoso e a redução da resistência ao cisalhamento das descontinuidades, essenciais à estabilidade de obras de engenharia em rochas.

Neste contexto, este trabalho procura estudar o comportamento geomecânico das rochas e de suas descontinuidades, condicionado ao processo de 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, 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, rupturas condicionadas pelas estruturas geológicas ocorreram nos taludes dos canais. Para entender o mecanismo que levou estes taludes à ruptura e o comportamento geotécnico dos materiais envolvidos, 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 pioneiros 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 da Barragem Simplício por Machado (2012), Salles (2013), Oliveira (2017), Oliveira *et al.* (2018), Steffens (2018) e Lopes (2019).

As amostras foram ensaiadas com o Martelo Schmidt e os resultados foram analisados em função do grau de alteração da rocha. Foram utilizados ábacos e correlações para estimativa da resistência à compressão uniaxial das amostras. Por meio de uma análise comparativa dos resultados deste trabalho e dos resultados de outras pesquisas desenvolvidas na área do empreendimento de Simplício, foi possível obter correlações de comportamento do gnaiss da região em função do grau e do tempo de alteração do material.

2 – ASPECTOS RELEVANTES SOBRE ALTERAÇÃO

As modificações sofridas pelas rochas devido à sua exposição a agentes ambientais recebem diversos nomes na literatura, sendo intemperismo o mais clássico e mais usado na engenharia. O intemperismo é o conjunto de processos que provocam a desintegração e a decomposição das rochas, quando expostas a processos físicos e químicos de alteração, respectivamente (Teixeira *et al.*, 2000). O termo alteração também é utilizado para denominar estas modificações e é mais utilizado quando tais alterações provocam mudanças no desempenho da rocha, em especial quando afeta o seu comportamento geomecânico (Frazão, 1993).

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 a modificação e/ou dissolução de seus minerais; ou fisicamente, fragmentando a rocha

por processos mecânicos sem que sua composição química 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 fragmentada, maior será a área disponível para ação do intemperismo químico (Press *et al.*, 2006; Arian & Aydin, 2012).

Os principais fatores que atuam como agentes promotores da alteração são: as características e propriedades da rocha; o clima, principalmente as condições de temperatura e umidade; o relevo e a topografia; a presença de fauna e flora; e o tempo de exposição da rocha (Begonha, 1989; Teixeira *et al.*, 2000; Maia, 2001; Press *et al.*, 2006).

Alguns dos principais agentes de alteração das rochas são relacionados aos fatores climáticos como temperatura, precipitação, umidade relativa do ar, vento, pressão atmosférica, potencial hidrogeniônico e potencial de oxirredução (Maia, 2001). A intensidade com que os agentes de alteração atuam em cada ambiente depende do fator climático. Em regiões quentes e úmidas, por exemplo, o intemperismo químico tende a atuar de forma mais intensa, enquanto em regiões glaciais, o intemperismo físico comanda o processo de alteração das rochas.

O 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).

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 (Mišćević & Vlastelica, 2009).

O conceito de alterabilidade define se a rocha tem maior ou menor susceptibilidade aos processos de alteração. A alterabilidade depende das características da rocha, principalmente da estabilidade química de seus minerais constituintes. Quanto mais estáveis quimicamente forem seus minerais, menos alterável será o material (Begonha, 1989; Maia, 2001). A alteração provoca o enfraquecimento das ligações entre cristais, grãos e fragmentos das rochas, reduzindo a resistência e aumentando a deformabilidade. Além disso, o processo pode aumentar o tamanho das fraturas e juntas da rocha, e formar material de preenchimento (Aydan *et al.*, 2014). As modificações microestruturais nas rochas também favorecem o surgimento de manchas, mudança de cor e textura, formação de minerais secundários, microfissuramento, aumento de vazios e perda da coesão entre os grãos (Aydin & Basu, 2005; Gupta & Seshagiri Rao, 1998; Maia, 2001).

O estado de alteração de uma rocha pode ser analisado de maneira qualitativa ou quantitativa. A avaliação qualitativa é subjetiva e insuficiente para estimar propriedades e comportamento mecânico 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 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).

3 – ÁREA E MATERIAL DE ESTUDO

O AHE Simplício está localizado entre os municípios de Três Rios (RJ), Sapucaia (RJ), Chiador (MG) e Além Paraíba (MG), e se estende paralelamente à margem do Rio Paraíba do Sul. O empreendimento 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 que conta com canais, túneis, reservatórios e diques. A Figura 1 apresenta a sequência das obras de interligação desde a UHE Anta até a UHE Simplício: 01 – Canal 1: 1905m; 02/03 – Túnel 1: 1458m; 04 – Canal 2: 1011m; 05 – Dique de Tocaia; 06 – Reservatório de Tocaia; 07 – Canal 3: 565m; 08/09 – Túnel 2: 1755m; 10 – Dique Lourical 1; 11/12 Túnel 2A: 782m; 13 – Reservatório

de Louriçal; 14 – Dique de Louriçal; 15 – Dique Alga 1; 16/17 – Túnel A5: 502m; 18 – Dique Alga 2; 19/20 – Túnel 5: 1590m; 21 – Reservatório de Calçado; 22 – Dique Estaca 1; 23 – Dique Estaca 2; 24 – Canal 6: 73m; 25/26 – Túnel 3: 6030m; 27 – Canal 7: 202m; 28 – Reservatório de Antonina; 29 – Dique Antonina; 30/31 – Túnel 8: 580m; 32 – Reservatório de Peixes; 33 – Dique Sul; 34 – Dique Norte; 35 – Canal de Adução. Este 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 aproveita um desnível natural de 115m (Machado, 2012; Steffens, 2018).

O local onde se encontra o empreendimento está inserido na unidade do Lineamento Além Paraíba, também conhecida como Zona de Cisalhamento do Rio Paraíba do Sul e apresenta rochas ígneas e metamórficas de alto grau (Dehler & Machado, 2002; Viana, 2010). Esta zona de cisalhamento é uma zona de falha transcorrente, e se caracteriza por seu relevo expressivamente alinhado a N60E. A geologia do entorno é composta por substrato cristalino de gnaisses, migmatitos e rochas granitóides, intrudidos por diques de diabásio e recobertos parcialmente por depósitos de solos aluvionares, coluvionares e residuais (Valeriano, 2006; Marinho, 2007).

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 (Marinho, 2007).

Foram realizados neste trabalho, ensaios com Martelo Schmidt em campo e em laboratório. Os ensaios de campo foram realizados em taludes localizados próximos à PCH Anta e à casa de força da UHE Simplício. Em todos os casos, a superfície ensaiada foi a face do talude de rocha nos estados alterado e inalterado, além de juntas no estado alterado.

As amostras ensaiadas em laboratório foram retiradas das áreas de escavações dos canais do empreendimento, principalmente das escavações do Canal 1. Estas amostras foram separadas e armazenadas dentro de recipientes fechados, que permaneceram ao longo dos últimos 10 anos em área aberta do Laboratório de Geotecnia da COPPE-UFRJ, sob a ação de agentes intempéricos como variação de temperatura e umidade. A escolha das amostras para ensaios foi realizada por meio dos seguintes critérios: dimensão, nível de alteração e representatividade do material.

As amostras foram classificadas visualmente em função da cor, dureza, estrutura, textura, granulação e grau de alteração, sendo o último o critério mais importante para o desenvolvimento do trabalho. Além disso, as amostras foram classificadas em pequenas (dimensões entre 5 e 15cm) e grandes (dimensões superiores a 15cm).

O grau de alteração das amostras foi determinado qualitativamente com auxílio da classificação de alteração desenvolvida e proposta por Oliveira (2017) e Oliveira *et al.* (2018), apresentada no Quadro 1. A classificação apresenta cinco níveis de alteração da rocha, sendo expressos qualitativamente por: rocha inalterada, rocha pouco alterada, rocha medianamente alterada, rocha muito alterada e rocha extremamente alterada.

Quadro 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. |

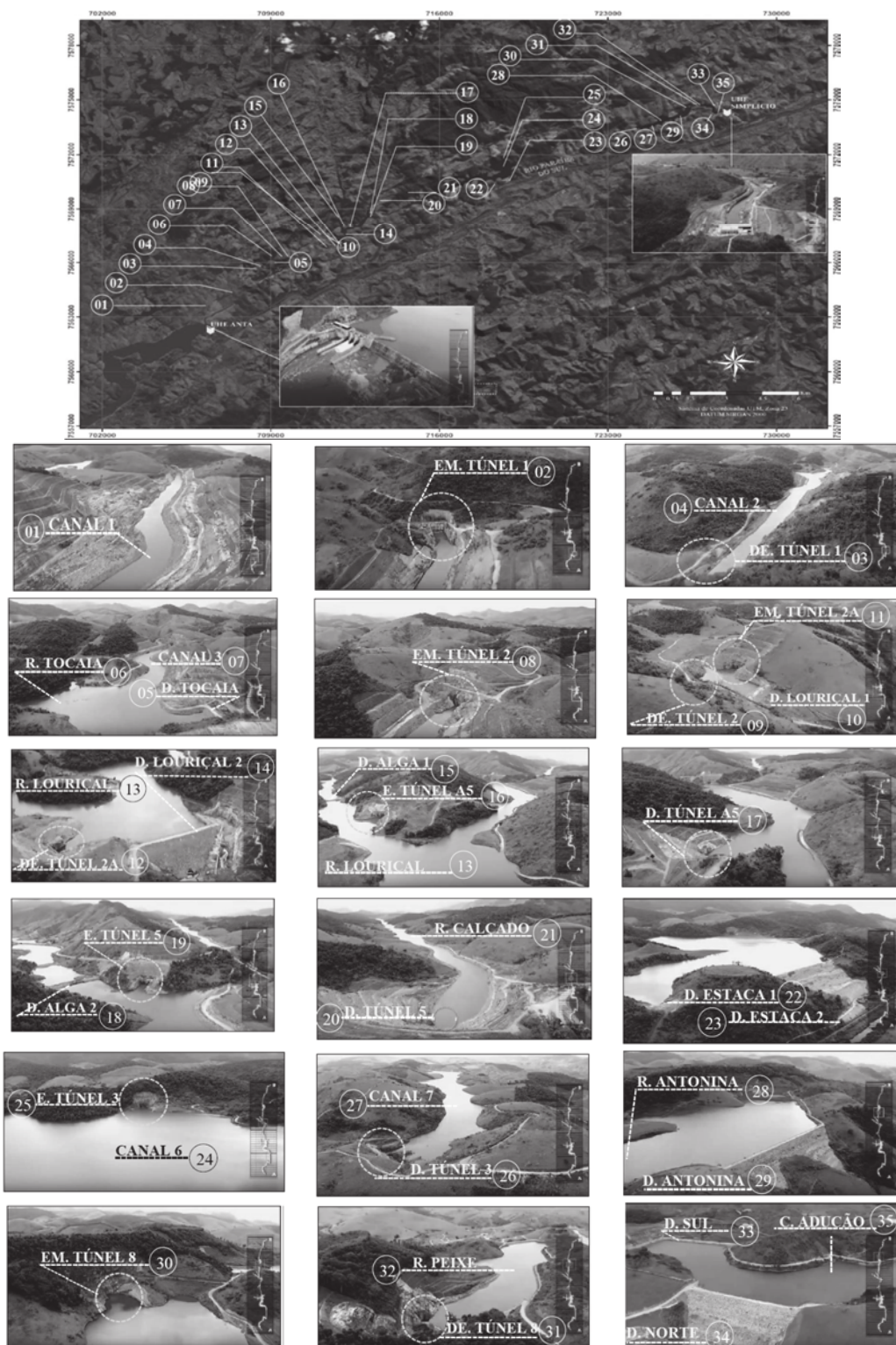


Fig. 1 – Obras de interligação entre UHE Anta e UHE Simplício (adaptado de Steffens, 2018).

4 – ENSAIO COM O MARTELO SCHMIDT

O ensaio com Martelo ou Esclerômetro Schmidt 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 equipamento realiza ensaios não destrutivos, que consistem na aplicação de impacto em uma superfície, a qual responde com uma reação proporcional à sua dureza.

A Figura 2 apresenta o mecanismo de funcionamento do equipamento, que consiste em uma massa presa a duas molas. O sistema de molas permite o pressionamento do pistão do martelo contra uma superfície, liberando a massa que se choca contra a extremidade do pistão, transmitindo o impacto à superfície ensaiada. Ao serem comprimidas e estendidas, as molas funcionam como fonte de energia para que o impacto da massa ocorra.

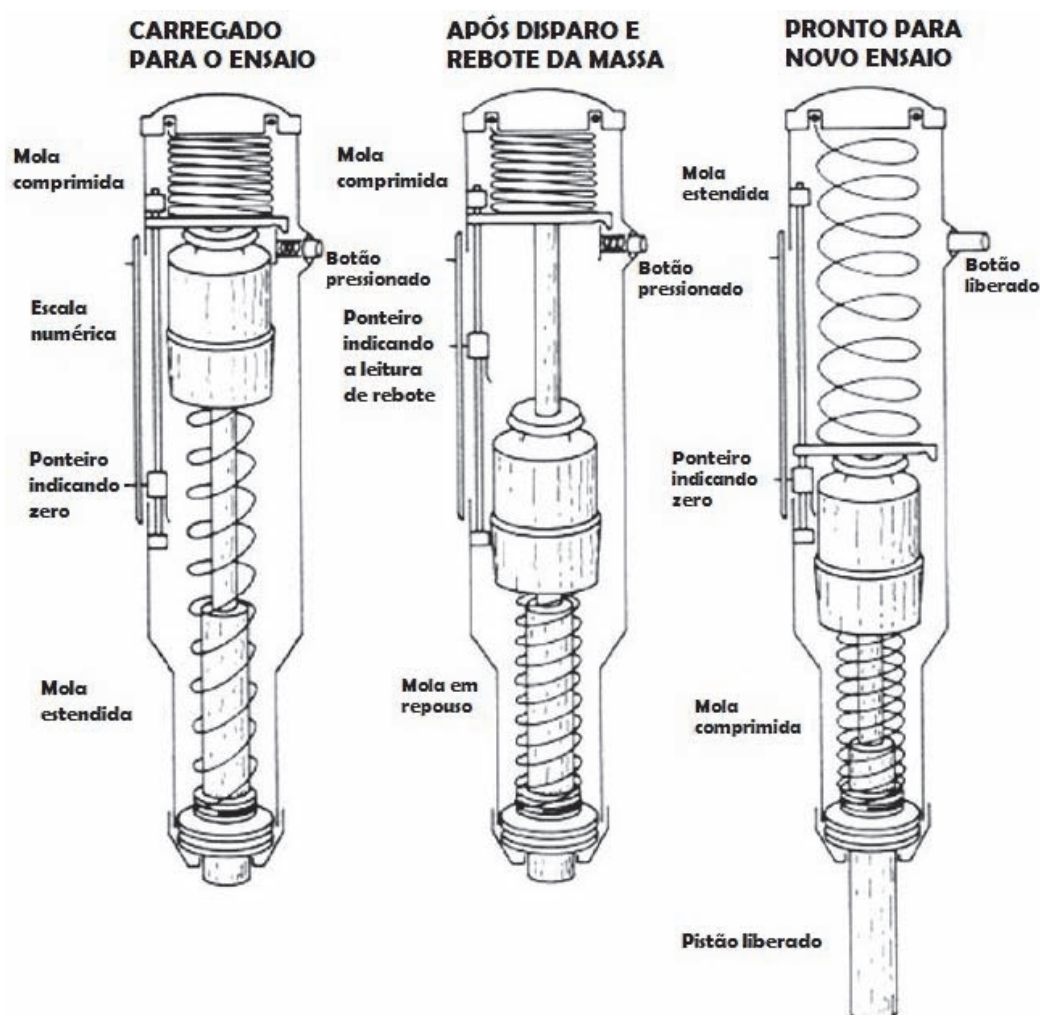


Fig. 2 – Esquema simplificado do funcionamento do Martelo Schmidt (adaptado de Aydin, 2009).

Os martelos tipo L e N possuem energias de impacto de 0,735 e 2,207Nm, respectivamente. 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 para rochas mais brandas. Os dois tipos de martelo 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. Aydin & Basu (2005), Buyuksagis & Goktan (2007) e Aydin (2009) reportam que os dois tipos de martelo apresentam alta sensibilidade quanto às propriedades de resistência e deformabilidade da rocha.

Durante o ensaio, a energia de impacto do equipamento é dividida em três parcelas: uma parcela que é dissipada pela deformação plástica do material, uma que é transformada em som e calor, e outra que é absorvida pela superfície ensaiada e que fornece o valor de rebote do material. A energia absorvida pela superfície durante o impacto é proporcional a sua dureza e resistência. A dureza do material é expressa por meio de uma escala numérica presente no equipamento que varia de 10 a 100 e recebe o nome de rebote. O rebote corresponde à distância em porcentagem percorrida pela massa após o impacto com o pistão (West, 1991; Aydin & Basu, 2005; Aydin, 2009).

O ensaio deve ser realizado com o pistão 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 a ação da gravidade e devem ser normalizados por meio das curvas de correção fornecidas pelos ábacos.

A alteração da rocha e de seus minerais resulta em valores de rebotes geralmente menores e maior dispersão dos resultados, devido ao aumento da heterogeneidade dos minerais da rocha (Aydin, 2009).

Uma das maneiras de correlacionar o valor de rebote e a resistência à compressão uniaxial das rochas é utilizando ábacos e curvas de correlação, que são fornecidos pelos fabricantes dos equipamentos, encontradas nas bibliografias referentes ao tema ou padronizadas pela ISRM (1978). Na Figura 3 pode ser visto um exemplo deste tipo de ábaco de correlação, apresentado por Deere & Miller (1966) e adaptada para as unidades internacionais de medida por Hoek & Bray (1981).

4.1 – Aplicação do ensaio no AHE Simplicio

O equipamento utilizado nos ensaios foi o Martelo Schmidt HT225, que possui energia de impacto igual a 2,207J (Martelo tipo N) e escala de registro de rebote variando de 10 a 100 (Figura 4a). O ábaco de correlação entre o rebote e a resistência à compressão uniaxial disponibilizado pelo fabricante do martelo é apresentado na Figura 4b.

4.1.1 – Ensaios em laboratório

Os ensaios em laboratório com Martelo Schmidt foram realizados com o auxílio de uma morsa de bancada para fixação das amostras (Figura 5a). Foram utilizados calços de madeira para ajuste, visando a minimização da dispersão de energia do ensaio que pode ocorrer devido à má fixação das amostras. A perpendicularidade do Martelo Schmidt foi observada em todos os ensaios, porém a direção de impacto variou de horizontal a vertical em função das irregularidades das superfícies das amostras, que interferem no posicionamento inicial do pistão.

Para realização dos ensaios em laboratório foram selecionadas 119 amostras de rocha, sendo que grande parte das amostras pequenas sofreu 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 muitas amostras romperam, foi realizado o maior número possível de medições em cada amostra intacta, tendo esse valor variado entre 1 e 60, com média de 20 medições por amostra. Observou-se ainda a variação expressiva dos valores de rebote para uma mesma amostra. O alto número de medições teve por objetivo diminuir a dispersão dos resultados após o tratamento estatístico dos dados.

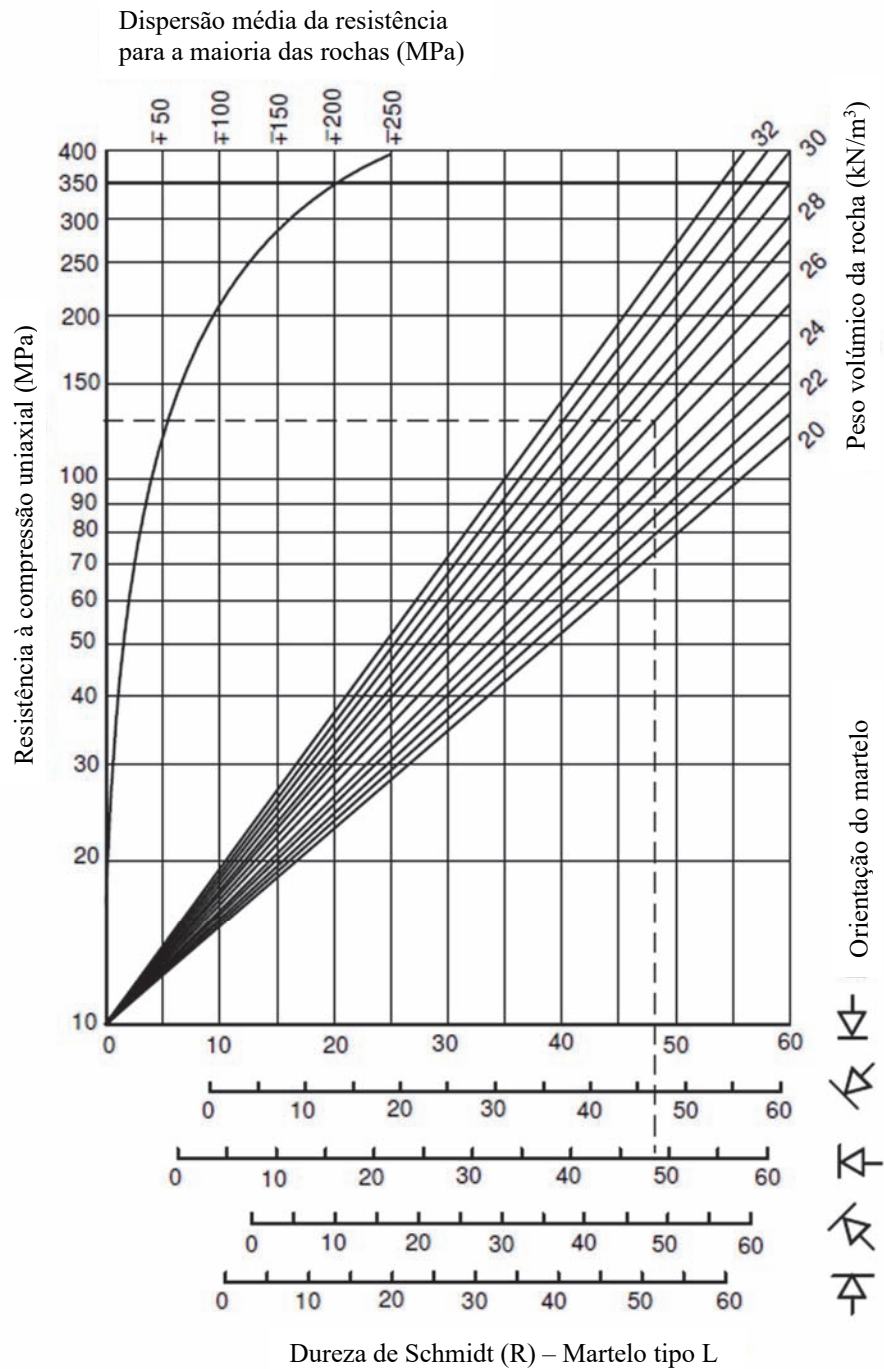


Fig. 3 – Ábaco de correlação entre o valor de rebote (R) e a resistência à compressão uniaxial da rocha (Deere & Miller, 1966; adaptado por Hoek & Bray, 1981).

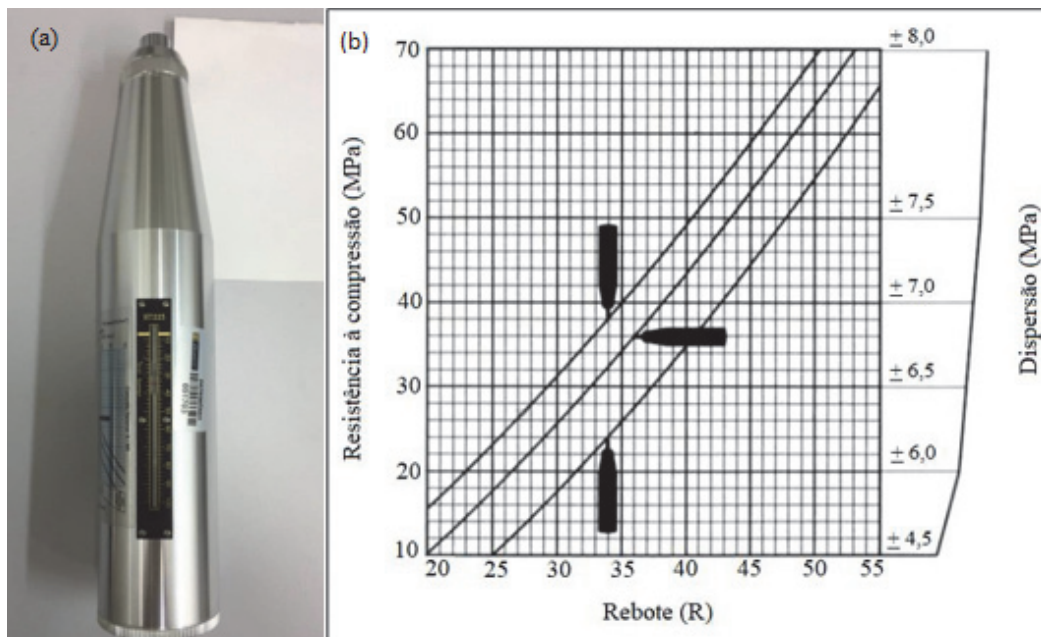


Fig. 4 – Martelo Schmidt: (a) Tipo HT225 e (b) Ábaco de correlação entre rebote e resistência fornecido pelo fabricante (Oliveira et al., 2018).

O grande número de amostras rompidas, principalmente entre as amostras pequenas, pode ser justificado pelo método de fixação e 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 fixa, exigindo maior aperto na morsa, o que pode provocar a ruptura da rocha. Além disso, a alteração da amostra reduz a força de ligação dos minerais e com isto ela se rompe mais facilmente no aperto da morsa.

4.1.2 – Ensaios em campo

Foram escolhidos 14 pontos distintos para realização dos ensaios com Martelo Schmidt em campo, tendo sido 11 pontos em talude próximo à PCH Anta e 3 pontos próximos à casa de força da UHE Simplício (Figura 5b). Foram realizados em cada ponto, 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 dos estados de alteração das rochas e das juntas, para posterior comparação dos valores de campo com os valores de laboratório.

5 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados da caracterização das amostras e dos ensaios com 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 apresentados neste trabalho. Além disso, são apresentadas análises conjuntas dos resultados deste trabalho com os resultados apresentados por Oliveira (2017) e Steffens (2018), a fim de desenvolver uma proposta para a previsão de comportamento ao longo do tempo do gnaiss da região do AHE Simplício.



(a) Ensaios em laboratório

(b) Ensaios em campo

Fig. 5 – Realização dos ensaios com Martelo Schmidt.

5.1 – Caracterização das amostras

De modo geral, as amostras apresentaram: i. coloração heterogênea predominantemente máfica; ii. dureza variando entre 1 e 5 (amostras riscadas pelo canivete) e entre 6 e 10 (amostras riscam o vidro), conforme Escala de Dureza de Mohs; iii. estrutura foliada, característica do gnaiss; iv. textura cristalina variando entre fanerítica e afanítica; v. granulação variando entre fina e média; e vi. grau de alteração variando entre os níveis A, B e C da classificação apresentada no Quadro 1. O Quadro 2 apresenta a distribuição do número de amostras classificadas para cada nível de alteração.

Os resultados de rebote obtidos nos ensaios com Martelo Schmidt em laboratório foram tratados estatisticamente por meio da eliminação dos valores correspondentes à média \pm desvio padrão, ou seja, foram eliminados os valores extremos da distribuição de rebotes, considerados muito abaixo ou muito acima dos valores médios. Desta forma, após o tratamento estatístico de distribuição normal truncada restaram valores de rebote correspondentes a 68% dos resultados de ensaios.

Quadro 2 – Classificação do grau de alteração das rochas conforme Oliveira (2017).

| Grau de alteração | Número de amostras |
|-------------------|--------------------|
| A | 36 |
| B | 51 |
| C | 32 |
| D | 0 |
| E | 0 |

5.2 – Ensaio com Martelo Schmidt realizados em laboratório

A distribuição dos valores de rebote, após o tratamento, para cada nível de alteração das amostras pequenas e grandes é apresentada na Figura 6. Calculou-se o valor do rebote médio para cada uma das classes de alteração em função do tamanho das amostras e a média truncada, na qual foram aproveitados os valores de rebote das amostras pequenas e grandes. Os resultados são sumariados no Quadro 3.

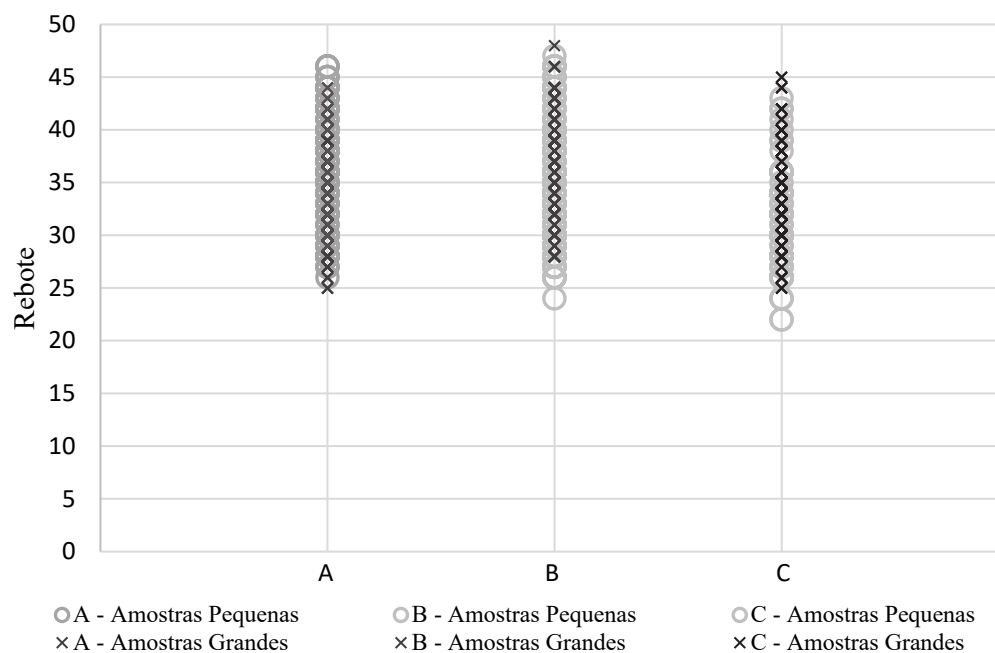


Fig. 6 – Distribuição dos valores de rebote obtidos nos ensaios com Martelo Schmidt tipo N em amostras pequenas e grandes.

Quadro 3 – Valores médios de rebote obtidos para cada nível de alteração das amostras com Martelo Schmidt tipo N.

| Tamanho das amostras | Rebote Nível de alteração - Classe | | |
|----------------------|---------------------------------------|-------------|-------------|
| | A | B | C |
| Pequenas | 36,0 | 33,5 | 28,0 |
| Grandes | 35,0 | 35,5 | 34,0 |
| Média geral | 35,5 | 34,5 | 31,0 |

É possível notar na Figura 6, que os resultados das amostras pequenas e das amostras grandes possuem o mesmo padrão de comportamento, com valores de rebote muito próximos. Nas amostras pequenas os rebotes variam entre 22 e 47 e para as amostras grandes variam de 25 a 48, permitindo concluir que a dimensão da amostra não tem influência significativa no rebote.

As amostras do nível de alteração C apresentam maior diferença entre os valores de rebote, quando comparados aos rebotes dos níveis A e B, menos alterados. Esta diferença pode ser explicada pela redução da resistência das amostras pequenas em decorrência de sua alteração interna. Ao longo do tempo de armazenamento do material, as amostras pequenas sofreram um processo de alteração não somente superficial, mas também interno, diferentemente das amostras grandes com alteração predominantemente superficial. Os sinais de alteração interna foram observados nas amostras pequenas rompidas durante o processo de ensaio, sendo possível notar intensa alteração dos minerais constituintes da rocha, principalmente dos minerais próximos aos planos de foliação.

Os valores de resistência à compressão uniaxial em função dos rebotes das amostras ensaiadas foram determinados com o ábaco de Deere & Miller (1966), já apresentado na Figura 3, em detrimento do ábaco fornecido pelo fabricante. Esta decisão se deve ao fato da resistência à compressão uniaxial máxima do ábaco do fabricante limitar-se a 70MPa. Este valor é muito inferior ao valor de resistência à compressão uniaxial obtido por Salles (2013), os quais correspondem a cerca de 165 MPa para corpos de prova de rocha inalterada.

Além disso, o ábaco do fabricante tem seu uso indicado para ensaios executados em superfícies de concreto, ao contrário do ábaco de Deere & Miller (1966), proposto após uma série de ensaios com Martelo Schmidt tipo L realizados em amostras de 28 tipos diferentes de rochas. A Figura 7 apresenta a distribuição dos valores de resistência à compressão uniaxial obtidos para cada amostra.

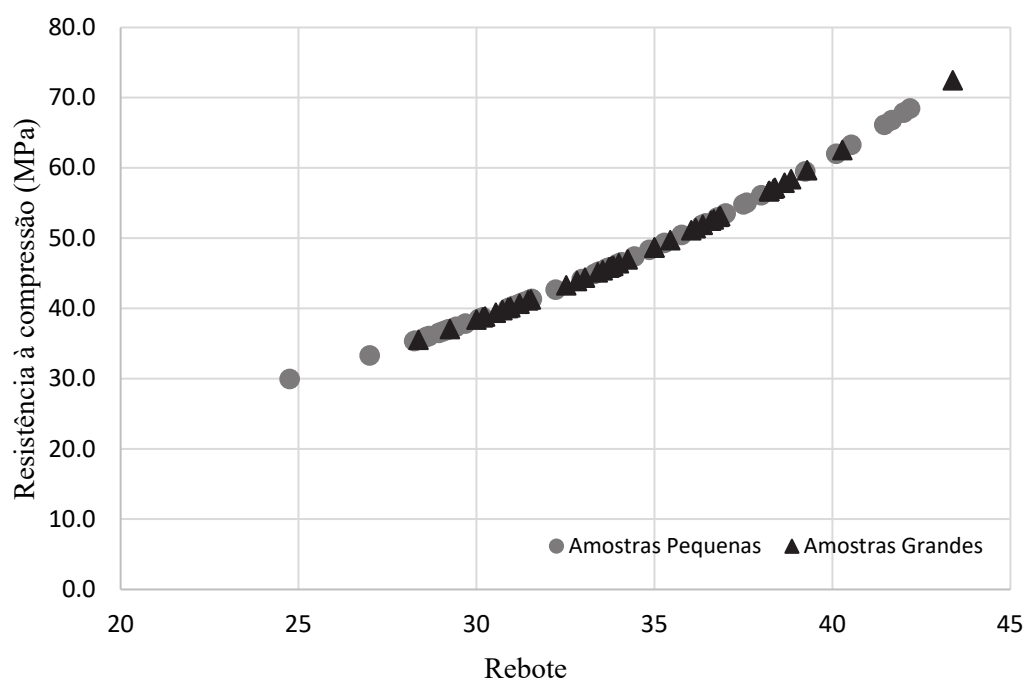


Fig. 7 – Curva de distribuição dos valores de resistência obtidos por meio do ábaco de Deere & Miller (1966).

O emprego do ábaco de Deere & Miller (1996) exigiu a correção dos valores de rebote obtidos nos ensaios com o Martelo Schmidt tipo N para valores de rebote com martelo tipo L. A literatura apresenta algumas correlações entre os martelos tipo L e N. Neste trabalho adotou-se a correlação proposta por Aydin & Basu (2005) para a correção dos valores de rebote, expressa por:

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

onde R_L e R_N são os valores de rebote obtidos por meio do martelo tipo L e N, respectivamente.

5.3 – 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 a estimativa dos valores de rebote médio para cada nível de alteração. Lopes (2019) apresenta os dados de campo referentes a esta pesquisa no Quadro 4.

5.4 – Comparação de resultados obtidos com Oliveira (2017) e Steffens (2018)

Oliveira (2017) realizou ensaios, com Martelo Schmidt tipo N, em amostras de testemunhos de sondagens que foram executadas na área do AHE Simplicio durante a fase de investigação do empreendimento. Foram ensaiadas amostras inalteradas e amostras que sofreram alteração natural ao longo dos anos. Além disso, foram realizados ensaios em rocha sã, correspondente à geratriz do testemunho, e ensaios nas juntas, representadas pelas superfícies das extremidades do testemunho.

Steffens (2018) realizou ensaios, com Martelo Schmidt tipo N, nas juntas de testemunhos de sondagem do AHE Simplicio, que foram alteradas artificialmente em laboratório por Salles (2013) com auxílio de um equipamento de percolação para alteração acelerada. Os níveis de alteração variaram desde o nível natural e são (representado por 0 horas) até os níveis de alteração artificial correspondentes a 600, 1200, 2400, 4800 e 8300 horas de ensaio no equipamento de percolação.

O Quadro 4 resume os valores de rebote médio referentes à cada classe de amostras obtidos por Oliveira (2017), além dos valores de rebote associados a cada tempo de lixiviação em laboratório obtidos por Steffens (2018). Esses valores podem ser comparados aos valores de rebote deste trabalho, correspondentes a cada classe de amostras ensaiadas em campo e em laboratório. Os valores de rebote são associados à classificação do nível ou do tempo de alteração.

Quadro 4 – Comparação de valores de rebote médio com Martelo Schmidt tipo N deste trabalho com rebotes de Oliveira (2017) e Steffens (2018).

| Oliveira (2017) | | Steffens (2018) | | Lopes (2019) | | | |
|--------------------|--------------|-----------------|--------------|--------------------|--------------|------------------------|--------------|
| | | | | Ensaios em campo | | Ensaios em laboratório | |
| Classe | Rebote Médio | Tempo | Rebote Médio | Classe | Rebote Médio | Nível de alteração | Rebote Médio |
| Rocha não alterada | 57,0 | 0h | 47,0 | Rocha não alterada | 57,0 | A | 35,5 |
| Rocha alterada | 41,0 | 600h | 46,0 | Rocha alterada | 41,0 | B | 34,5 |
| | | 1200h | 39,0 | | | | |
| Junta não alterada | 40,0 | 2400h | 33,0 | Junta alterada | 31,0 | C | 31,0 |
| Junta alterada | 34,0 | 4800h | 32,0 | | | | |
| | | 8300h | 31,0 | | | | |

A partir do Quadro 4 observa-se a redução dos valores de rebote com o aumento da alteração das amostras. Além disso, nota-se que os valores de rebote foram iguais a 31,0 para as amostras com 8300h de alteração acelerada em laboratório, para as amostras de junta alterada em campo e para as amostras de nível de alteração C dos ensaios de laboratório.

Os valores médios de rebote sumariados no Quadro 4 foram adotados para estimativa dos valores de resistência à compressão uniaxial por meio do ábaco de Deere & Miller (1966), respeitando-se a direção de ensaio para cada caso. Nos ensaios de Oliveira (2017) e Steffens (2018) a direção de ensaio foi horizontal para as juntas e vertical para as superfícies de rocha do maciço. No atual trabalho, para as rochas e juntas ensaiadas em campo, a direção de ensaio foi horizontal, visto que as faces dos taludes eram verticais. Já no caso das amostras de laboratório, a direção de ensaio variou entre horizontal e vertical devido à irregularidade das superfícies. Desta forma, para os ensaios de laboratório, decidiu-se utilizar a média entre os valores de resistência obtidos do ábaco para ensaio com o martelo na posição vertical e horizontal.

A Figura 8 apresenta a correlação entre valores de resistência à compressão em função dos rebotes desse trabalho, de Oliveira (2017) e de Steffens (2018), incluindo a linha de tendência que apresentou melhor ajuste aos dados. A linha de tendência, representa a variação da resistência à compressão uniaxial do material em função do valor do rebote obtido com martelo tipo N, que por sua vez varia com o grau de alteração das amostras.

Importante salientar que os valores de resistência à compressão uniaxial foram obtidos por meio do ábaco de Deere & Miller (1966), em função dos valores de rebote dos ensaios com martelo tipo N e corrigidos para o martelo tipo L (Equação 1). Contudo, a relação foi construída diretamente com os valores de rebote do martelo tipo N, visando a simplicidade do uso em função do martelo disponível.

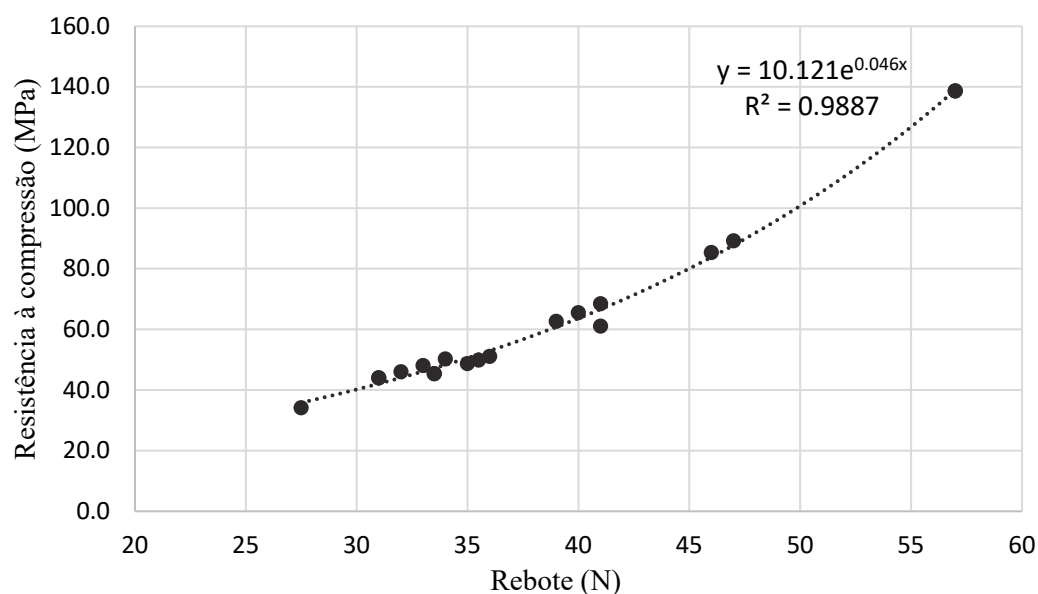


Fig. 8 – Correlação entre resistência à compressão uniaxial e valor de rebote com martelo tipo N para o gnaisse da região de Simplicio.

Portanto, os resultados apresentados na Figura 8 possibilitam propor uma expressão para a estimativa da resistência à compressão uniaxial em função do rebote obtido com o martelo tipo N, para o gnaisse Simplicio em níveis de alteração distintos, dada por:

$$\sigma_c = 10,121 * e^{0,046 * R_N} \quad (2)$$

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

6 – PREVISÃO DO COMPORTAMENTO COM O TEMPO

A previsão de comportamento do material em função do tempo foi desenvolvida utilizando-se o conceito de índice de alteração ou índice de qualidade. O índice de alteração é empregado para comparar uma determinada característica da rocha no estado intacto em relação ao estado alterado, indicando a sua variação com o aumento do grau de alteração do material. O índice de alteração é geralmente usado na quantificação de propriedades mensuráveis como resistência, absorção, desgaste, porosidade, massa específica, propagação de ondas e granulometria (Maia, 2001; Salles, 2013). O índice de alteração usado nas análises deste trabalho é expresso por:

$$I_R = \frac{R_{inalterada} - R_{alterada}}{R_{inalterada}} * 100 \quad (3)$$

onde I_R é o índice de alteração do rebote dado 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.

O Quadro 5 apresenta os índices de alteração calculados com os valores de 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. O valor de referência adotado ($R_{inalterada}$) corresponde ao rebote da rocha intacta obtida em campo neste trabalho e igual a 57. Note-se que o mesmo valor de rebote foi encontrado por Oliveira (2017) nos ensaios de martelo executados na geratriz dos testemunhos de gnaiss de Simplício, considerada como representativa da rocha não alterada. Do Quadro 5 é possível concluir que houve uma redução de 45,6% do valor de rebote para as amostras que foram submetidas à 8300h de lixiviação em laboratório e que foram ensaiadas por Steffens (2018). A mesma redução de rebote foi encontrada para as amostras pertencentes ao nível de alteração C e que foram ensaiadas no presente trabalho.

Quadro 5 – 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 (%) | Nível de alteração | 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 | | |

Considerando o índice de alteração das amostras alteradas natural e artificialmente, é possível determinar o tempo equivalente de lixiviação em laboratório. Ele representa o tempo de lixiviação necessário para produzir em laboratório, um nível de alteração equivalente ao produzido naturalmente na rocha *in situ*. Para tanto é necessário desenvolver uma relação de variação do rebote em função do tempo de lixiviação. A curva apresentada na Figura 9 foi obtida por meio dos dados de Steffens (2018), na qual foram plotados os índices de alteração produzidos em laboratório pelo tempo de lixiviação correspondente. Em seguida, os valores dos índices de alteração calculados para os níveis A, B e C (37,7%; 39,5%; 45,6%) foram projetados na curva a fim de obter o tempo de lixiviação equivalente para cada um dos níveis.

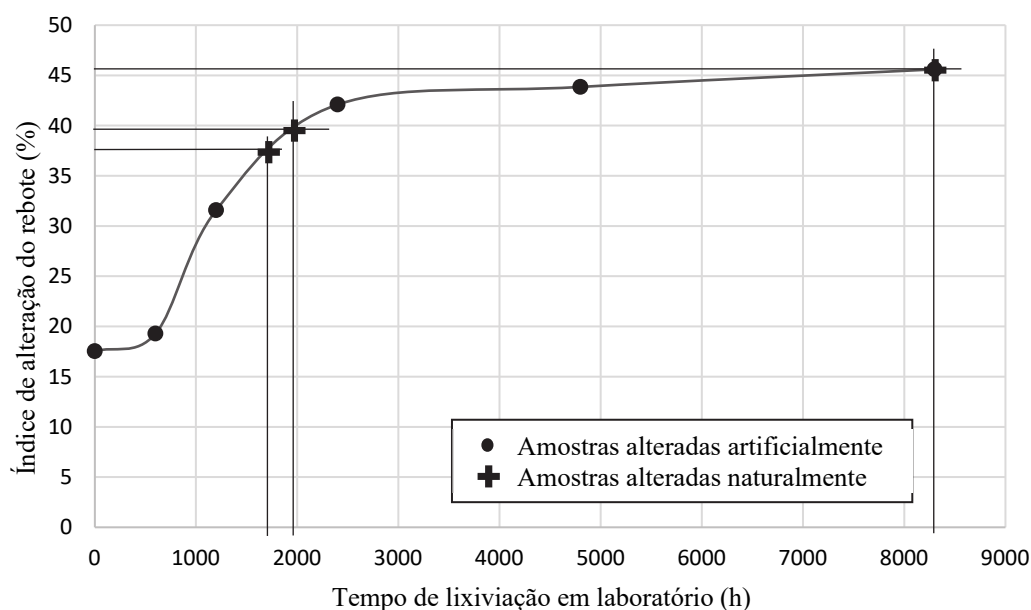


Fig. 9 – Variação do índice de alteração do rebote em função do tempo de lixiviação em laboratório.

Com base na Figura 9, os valores de índice de alteração dos níveis A igual a 37,7% e B igual a 39,5% fornecem tempos de lixiviação equivalentes a 1700h e 1950h, respectivamente. Por sua vez, o valor de índice de alteração do nível C igual a 45,6% é igual ao índice de alteração da amostra que sofreu 8300h de lixiviação em laboratório (Steffens, 2018), portanto, este ponto foi obtido experimentalmente. Com esses valores determinou-se a relação entre rebote e tempo de lixiviação e a linha de tendência que melhor se ajustou aos resultados, apresentada na Figura 10. Esta linha de tendência representa uma proposta preliminar para a previsão do comportamento do gnaíse de Simplicio em função do tempo de alteração do material.

A proposta desenvolvida corresponde a uma curva de tendência traçada através de três pontos somente. O reduzido número de pontos é consequência da forma com que os dados desta pesquisa foram obtidos e analisados. A caracterização dos materiais resultou em amostras representativas de três classes de alteração, amostra não alterada (Nível A), amostra pouco alterada (Nível B) e amostra medianamente alterada (Nível C) e, portanto, esse fator se tornou um condicionante da análise dos resultados e da proposta preliminar de previsão do comportamento ao longo do tempo de alteração.

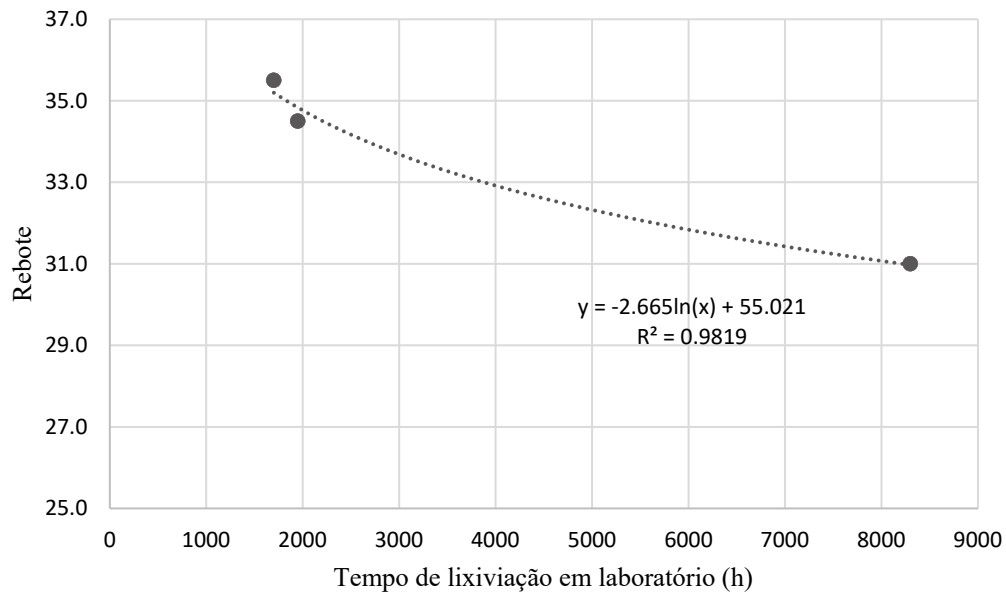


Fig. 10 – Proposta de relação para a previsão da variação do rebote do gnaiss de Simplício em função do tempo de lixiviação em laboratório.

Portanto, a equação proposta para a previsão da variação de rebote para o gnaiss estudado, em função do tempo de lixiviação em laboratório, é dada por:

$$R_N = -2,665 * \ln(t) + 55,021 \quad (4)$$

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

Com base nas Equações 2 e 4, e no valor de resistência à compressão uniaxial da rocha não alterada (139,3 MPa), é possível propor ainda, uma equação de variação da resistência à compressão uniaxial do gnaiss Simplício em função do tempo de alteração em campo, sendo ela:

$$\Delta\sigma_C = 139,3 - 10,121 * e^{-0,1226*\ln(t)+2,531} \quad (5)$$

onde $\Delta\sigma_C$ é a redução da resistência à compressão uniaxial da rocha em MPa, e t é o tempo de alteração natural, em horas.

O valor de rebote obtido por Steffens (2018) para a amostra submetida à 8300h de lixiviação em laboratório (cerca de 1 ano), é igual ao valor de rebote encontrado nesta pesquisa para a amostra com nível de alteração C, que sofreu alteração natural durante aproximadamente 10 anos. Sendo assim, em termos de rebote e resistência à compressão uniaxial, foi possível observar que o período de 1 ano de alteração artificial em laboratório conseguiu produzir o mesmo nível de alteração das amostras do nível C, as quais foram submetidas à alteração natural durante 10 anos. Portanto, pode-se assumir que a alteração produzida no período de 1 ano em laboratório equivale a 10 anos de alteração natural. Desta forma, é possível utilizar esta proposta de previsão de comportamento do

material para prever a redução do valor de rebote e da resistência à compressão uniaxial do gnaiss do AHE Simplicio ao longo dos anos conforme apresentado no Quadro 6.

Quadro 6 – 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 uniaxial (MPa) |
|---|---|---------------|--|
| 1 | 10 | 31,0 | 41,8 |
| 2 | 20 | 29,0 | 38,4 |
| 3 | 30 | 27,9 | 36,5 |
| 4 | 40 | 27,1 | 35,3 |
| 5 | 50 | 26,5 | 34,3 |

A resistência à compressão uniaxial das amostras foi calculada por meio da Equação 2. O valor utilizado como referência para a rocha não alterada foi o obtido em campo por esta pesquisa, que corresponde a um rebote igual a 57 e resistência à compressão uniaxial de aproximadamente 139,3 MPa. O rebote previsto para 50 anos de alteração em campo foi de 26,5, correspondendo a uma resistência à compressão uniaxial de cerca de 34,3 MPa. A diminuição da resistência à compressão uniaxial do gnaiss estudado, calculada pelas relações propostas neste trabalho, foi de 105,0 MPa ao longo de 50 anos de alteração natural, ou seja, uma redução de resistência de aproximadamente 75%.

Salles (2013) também avaliou a variação do comportamento do gnaiss Simplicio com a alteração promovida pelo equipamento de percolação para alteração artificial. A autora considerou resultados de análises petrográficas, ensaios de absorção e ensaios de compressão uniaxial e diametral de corpos de prova sãos e alterados artificialmente no equipamento de percolação. Destaca-se a proposta de previsão de comportamento do material, baseada nos resultados dos ensaios de compressão uniaxial realizados pela autora no gnaiss de Simplicio e nos resultados apresentados por 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 uniaxial do gnaiss da região de Simplicio seria aproximadamente igual a 92 MPa. O valor da resistência à compressão uniaxial da rocha inalterada obtido pela autora foi igual a 164,8 MPa e o da rocha alterada durante 50 anos foi igual a 72,9 MPa, ou seja, redução prevista de 56% no valor da resistência.

A redução da resistência obtida pela proposta de Salles (2013) foi de aproximadamente 92 MPa e a do presente trabalho igual a 105 MPa, o que representa uma diferença de 13 MPa (12,4%) entre as duas previsões. A diferença pode ser explicada por diversos fatores. Os valores de resistência à compressão uniaxial obtidos com Martelo Schmidt tipo N são menores que os valores obtidos nos ensaios de compressão uniaxial de corpos de prova realizados por Salles (2013). Isto pode ser relacionado à diferença do carregamento dos dois tipos de ensaios. Note-se que o carregamento é aumentado progressivamente no ensaio de compressão uniaxial, enquanto no ensaio com Martelo Schmidt o carregamento ocorre quase instantaneamente. Além disso, o método utilizado para fixação das amostras pode ter gerado dissipação de energia no ensaio com martelo, causando a redução do rebote e da resistência à compressão uniaxial.

Apesar dos valores de resistência à compressão uniaxial estimados pelas duas propostas serem diferentes, é importante observar que apresentam grandezas similares, o que incentiva o uso de ambas previsões para a avaliação preliminar do comportamento ao longo do tempo do gnaiss de Simplicio e de rochas de propriedades similares.

7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados e análises deste trabalho permitem ressaltar as seguintes considerações: i. o uso do Martelo Schmidt para a estimativa da resistência à compressão uniaxial de amostras de rochas e juntas se mostrou satisfatório; ii. apesar da dispersão dos resultados, o Martelo Schmidt foi sensível ao nível de alteração das amostras, indicando tendências de comportamento; iii. o método de fixação das amostras com morsa de bancada foi eficaz, porém pode causar ruptura, principalmente de amostras pequenas e muito alteradas; iv. os valores de rebote de amostras pequenas e grandes são similares, indicando influência desprezível de tamanho; v. a alteração das amostras pequenas ao longo do tempo de armazenamento é mais invasiva que a das amostras grandes; vi. a comparação dos valores de rebote deste trabalho, de Oliveira (2017) e Steffens (2018) possibilitou o desenvolvimento de uma proposta de previsão do comportamento da resistência à compressão uniaxial do gnaiss Simplício em função do rebote do Martelo Schmidt e da alteração no tempo; vii. a associação dos índices de alteração de rebote com a variação da alteração artificial e natural das amostras possibilitou o desenvolvimento de relação de previsão da redução do valor de rebote em função do tempo de lixiviação em laboratório; viii. a relação indica que o nível de alteração acelerada no equipamento de percolação no período de 1 ano é equivalente ao nível de alteração natural em campo atingido no período de 10 anos; ix. a previsão de comportamento aponta para uma redução da resistência à compressão uniaxial do gnaiss Simplício de aproximadamente 105 MPa (75%) em 50 anos de alteração natural; x. as previsões de redução da resistência à compressão uniaxial do gnaiss Simplício deste trabalho e de Salles (2013) apresentaram resultados similares, com diferença de 12,4% para 50 anos de alteração natural.

8 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Empresa Furnas S.A. pela disponibilização de informação e material do empreendimento da Barragem de Simplício. Agradecem também os apoios financeiros do CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, indispensáveis para o desenvolvimento das pesquisas que originaram este trabalho. Finalmente, os autores agradecem a colaboração dos colegas do Grupo de Pesquisa de Alterabilidade de Rochas da PUC-Rio e COPPE-UFRJ, com especial menção ao Prof. Coordenador Alberto Sayão.

9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arikan, F.; Aydin, N. (2012). *Influence of Weathering on the Engineering Properties of Dacites in Northeastern Turkey*. ISRN Soil Science, v. 2012, pp. 1–15.
- Aydan, Ö.; Ulusay, R.; Tokashiki, N. (2014). *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, pp. 1255–1276.
- Aydin, A. (2009). *ISRM Suggested Method for Determination of the Schmidt Hammer Rebound Hardness: Revised Version*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 46, pp. 627–634.
- Aydin, A.; Basu, A. (2005). *The Schmidt hammer in rock material characterization*. Engineering Geology, v. 81, pp. 1–14, 2005.
- Barton, N. (1973). *Review of a new shear-strength criterion for rock joints*. Engineering Geology, v. 7, pp. 287–332.

- Begonha, A. J. S. de. (1989). *Alteração das Rochas Graníticas do Norte e Centro de Portugal*. Universidade Nova de Lisboa, Porto.
- Brady, B. H. G.; Brown, E. T. (2005). *Rock mechanics for underground mining*. 3. ed. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Springer Science + Business Media, Inc. v. 279.
- Brandi, I.; Barbosa, M.; Guimarães, R. (2015). *Resistência Geomecânica De Cavidades Naturais Subterrâneas Em Terrenos Ferríferos, Carajás- Pa*. v. 2113, pp. 627–634.
- Buyuksagis, I. S.; Goktan, R. M. (2007). *The effect of Schmidt hammer type on uniaxial compressive strength prediction of rock*. v. 44, pp. 299–307.
- Deere, D. U.; Miller, R. P. (1966). *Engineering classification and index properties for intact rock*. Technical report n. AFWL-TR-65-116, New Mexico. pp. 300.
- Dehler, N. M.; Machado, R. (2002). *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, pp. 481–490.
- Frazão, E. B. (1993). *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*. pp. 178. Tese (Doutorado em geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - USP, São Carlos.
- Farjallat, J. E. S.; De Barros, F. P.; Yoshida, R.; De Oliveira, J. A. N. (1972). *Alguns Problemas de Desagregação dos Basaltos da Barragem de Capivara, Rio Paranapanema*. 4ª Semana Paulista de Geologia Aplicada, São Paulo, vol. II A, pp. 73-102.
- Ferreira, G. S. (2004). *Estudo de estabilidade e tensões in situ na extração de rochas ornamentais no município de Santo Antônio de Pádua – RJ*. Dissertação (mestrado), Laboratório de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro.
- Guidicini, G.; Nieble, C. M. (1983). *Estabilidades de taludes naturais e de escavação*. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher.
- Gupta, A. S.; Seshagiri Rao, K. (1998). *Index properties of weathered rocks: inter-relationships and applicability*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, v. 57, pp. 161–172.
- Heidari, M.; Momeni, A. A.; Naseri, F. (2013). *New weathering classifications for granitic rocks based on geomechanical parameters*. Engineering Geology, v. 166, n. November, pp. 65–73.
- Hoek, E. & Bray, J. W. (1981). *Rock slope engineering*. Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 358.
- ISRM. (1978). *Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks*. In: Brown ET editor. Rock characterization, testing and monitoring. ISRM suggested Methods. Oxford: Pergamon. pp. 95–6.
- Katz, O.; Reches, Z.; Roegiers, J. C. (2000). *Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, v. 37, pp. 723–728.
- Lopes, M. C. (2006). *Comportamento geotécnico e mecanismos de ruptura em rochas brandas - Mina Córrego do Sítio*. Pp. 94. Dissertação (Mestrado em engenharia mineral) - Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.

- Lopes, P. M. (2019). *Alterabilidade e comportamento geomecânico de rochas no AHE Simplicio*. Dissertação (mestrado em engenharia civil) - Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Machado, D. L. (2012). *Comportamento Geomecânico de Estruturas Reliquiarias de um Solo Residual de Gnaiss da AHE Simplicio*. Pp. 143. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Maia, P. C. A. (2001). *Avaliação do Comportamento Geomecânico e de Alterabilidade de Enrocamentos*. Pp. 289. Tese (Doutorado em ciências em engenharia civil: geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC, Rio de Janeiro.
- Maia, P. C. de A.; Sayão, A. S. F. J.; Nunes, A. L. L. S.; Caproni JR., N. (2002). *Compressibilidade de enrocamentos basálticos*. XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, pp. 81–92.
- Maia, P. C. de A.; Sayão, A. S. F. J.; Nunes, A. L. L. S. (2003). *Considerações sobre a alteração de enrocamentos*. XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens, pp. 1–15, 2003.
- Maia, P. C. A.; Salles, R. O. (2006). *Estudo experimental da durabilidade de rochas ornamentais através de procedimentos especiais de laboratório*. In: XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Curitiba/PR.
- Marinho, C. A. S. (2007). *Estudos geológicos-geotécnicos do AHE Simplicio*. Pp. 98. Monografia (Graduação em geologia) - Departamento de Geociências, Instituto de Agronomia, UFRRJ, Seropédica, RJ, Brasil.
- Miščević, P.; Vlastelica, G. (2009). *Shear strength of weathered soft rock – proposal of test method additions*. Regional Symposium of the International Society for Rock Mechanics - Eurock, pp. 303–308.
- Oliveira, J. R. (2017). *Classificação e resistência de juntas rochosas sãs e alteradas*. Pp. 167. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Oliveira, J. R., Steffens, A. H. D, Nunes, A. L. L.S. (2018). *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. Pp. 12.
- Press, F.; Siever, R.; Grotzinger, J.; Jordan, T. H. (2006). *Para entender a Terra*. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- Salles, R. O. (2013). *Comportamento geomecânico e de alterabilidade da rocha gnáissica da obra do AHE Simplicio*. Pp. 206. Tese (Doutorado em engenharia civil) - Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Steffens, A. H. D. (2018). *Resistência de juntas de rocha naturais e alteradas artificialmente*. Pp. 222. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Teixeira, W.; Toledo, C.; Fairchild, T. ; Taioli, F. (2000). *Decifrando a Terra*. Reimpressão ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.
- Valeriano, C. M. (2006). *Reconhecimento Geológico-Estrutural da Área do AHE Simplicio (RJ)*. Relatório técnico.

- Viana, L. L. (2010). *Individualização de orto e paragneisses que ocorrem no sítio de obras do AHE Simplicio Queda – Única, Rio de Janeiro, RJ*. Pp. 41. Monografia (Graduação em geologia) - Departamento de Geociências, Instituto de Agronomia, UFRRJ, Seropédica, RJ, Brasil.
- West, G. (1991). The field description of engineering soils and rocks. Geological Society of London Professional Handbook, Open University Press. Milton Keynes, Philadelphia.