

A influência da alteração hidrotermal na estabilidade de maciços rochosos no Rio de Janeiro

Jean Santarelli Monteiro de Castro
PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, Jsantarelli@gmail.com

Eurípedes do Amaral Vargas Junior
PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, Vargas@puc-rio.br

Rubem Porto Junior
UFRRJ, Rio de Janeiro, Brasil, rubempjr@gmail.com

Cláudio Palmeiro do Amaral
UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, cpa.trp@terra.com.br

Franklin dos Santos Antunes
PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, Consultor

RESUMO: Com base nos frequentes relatos de problemas de instabilidades locais de túneis associados à presença de minerais formados por alteração hidrotermal, na cidade do Rio de Janeiro, decidiu-se estudar os aspectos petrográficos das rochas que integram o maciço rochoso escavado para a construção de um túnel na região de Jacarepaguá e determinar a redução de suas resistências em função da presença dos minerais hidrotermalizados. A análise petrográfica das rochas e a difração de raios-x das frações finas revelaram que as mesmas, muitas vezes classificadas à vista desarmada como rochas sãs, quando mostram produtos derivados da alteração hidrotermal, exibem nos ensaios de carga puntiforme (point load), valores baixos de resistência mecânica. A correlação entre intensidade da alteração hidrotermal e a redução da resistência mecânica das rochas reafirma a necessidade de se considerar adequadamente este fator nos projetos de construção e manutenção dos túneis no Rio de Janeiro.

PALAVRAS-CHAVE: Hidrotermalismo, Resistência de Maciços Rochosos, Estabilidade de túneis.

1 INTRODUÇÃO

A alteração hidrotermal é a substituição química dos minerais originados da rocha por um conjunto de novos minerais, mais estáveis sob as condições hidrotermais de temperatura, pressão e, principalmente, composição do fluido que circula em profundidades maiores da crosta terrestre (Rose & Burt, 1979; Reed, 1997).

A importância do conhecimento relativo à alteração hidrotermal é reconhecida na mineração, em função da sua participação na gênese de depósitos minerais, mas na Mecânica das Rochas ela ainda carece de maior atenção. Problemas de instabilidades locais de túneis no

Rio de Janeiro, associados à presença de minerais formados por alteração hidrotermal, e à consequente redução da resistência mecânica das rochas que integram os maciços rochosos escavados, foram relatados por Carvalho, 1998; Geo-Rio, 2001; Silva, 2011 e Amaral *et al* 2002. Estes trabalhos discutem o controle estrutural das alterações hidrotermais e dois importantes aspectos relacionados à sua correta caracterização nos maciços rochosos: (1) a aparente sanidade das rochas afetadas pela alteração hidrotermal, mesmo quando é intensa; (2) a influência do hidrotermalismo na definição de uma elevada alterabilidade das rochas. Por esse raciocínio, a evolução do

intemperismo nas cotas de escavação dos túneis, após a abertura dos túneis ou cavidades se dá de maneira rápida, exatamente em função da maior instabilidade dos minerais hidrotermalizados, de menor dureza e em geral com hábito filonar, e mais expostos por se concentrarem ao longo dos planos preferenciais de fraqueza mecânica e percolação d'água dos maciços rochosos, o que facilitaria a queda de fragmentos rochosos e o surgimento de fissuras e deformações no revestimento dos túneis.

2 CONCEITOS BÁSICOS DA ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL

A alteração hidrotermal de uma rocha e mineral é fruto das transformações químicas, mineralógicas e texturais resultantes da interação de fluidos tipicamente dominados por água quente com a rocha a temperaturas que vão desde $< 100^{\circ}\text{C}$ a $> 500^{\circ}\text{C}$, sob determinadas condições físico-químicas, com rochas nas quais percola homogeneamente ou em fissuras (Pirajno, 1992).

Há ainda aquilo que se define como metamorfismo hidrotermal. Este tipo é causado pela percolação de fluidos ou de soluções de gases aquecidos por entre fraturas e/ou foliações e que causam mudanças de fases mineralógicas presentes. Atividades no campo do hidrotermalismo associadas a padrões estruturais (zonas de cisalhamento, por exemplo) são bastante frequentes. Os fluidos hidrotermais agem nas rochas através de seus condutos, brechas, fraturas primárias ou secundárias, foliações, sendo esta ação dependente da permeabilidade do maciço.

A intensidade da alteração hidrotermal que afeta uma rocha pode ser definida como fraca, moderada e forte (intensa) e são relacionadas com o estado de substituição das fases da rocha e do estado de destruição das texturas. Alguns processos de formação dos minerais secundários recebem nomes específicos tais como carbonatização, cloritização, caulinitização, serpentinização e etc. Na tabela 1 constam algumas reações secundárias de alteração de minerais magmáticos primários.

Tabela 1 - Principais reações envolvendo minerais primários e seus prováveis produtos na alteração hidrotermal.

Reação de minerais primários	Alteração hidrotermal
Olivina	Serpentina + Óxidos de Ferro (magnetita)
Augita e Diopsídio	Clorita + Serpentina + Talco + Óxidos de Ferro
Hornblenda	Clorita + Carbonato
K-feldspato	Sericita + Caulinita + Muscovita
Plagioclásio	Epidoto + Calcita + Sericita + Caulinita
Biotita	Muscovita + Clorita

Em muitos casos a alteração confere à rocha um aspecto lixiviado, desbotado, e pode frequentemente, levar o obscurecimento quase total da mineralogia e textura primária (Wernick, 2004).

Segundo Grim (1968), se a alteração hidrotermal for intensa, então todos os minerais originais devem ser afetados, e se há um considerável transporte dos elementos, os produtos de alteração poderão tender a serem indiferentes dos da rocha mãe, exceto em rochas carboníferas e quartíferas. No caso de silito a tendência é a silicificação, mas a reação entre o magnésio e a sílica, algumas vezes, forma argilominerais ricos em magnésio.

Se a alteração hidrotermal é relativamente ligeira, o caráter dos minerais primários determina os produtos de alteração. Em alterações muito ligeiras, os minerais ricos em magnésio como hornblenda e biotita tendem a mudar para clorita. Em processo de alteração ligeira e em presença de elementos alcalinos e alcalinos terrosos, exceto o potássio das micas, os minerais ferromagnesianos e os feldspatos plagioclásios vão provavelmente formar esmectita. A presença do potássio nos feldspatos ou micas primárias favorece o desenvolvimento de micas secundárias. (tabela 2).

Tabela 2 - Formação de minerais secundários por alteração hidrotermal (Misas, 2010).

Formação de feldspato potássico secundário:
$\text{Plagioclásio} + \text{K}^+ \rightarrow \text{feldspato potássico} + (\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+})$
Formação de biotita secundária:
$\text{Hornblenda} + (\text{H}^+, \text{Mg}^{2+}, \text{K}^+) \rightarrow \text{biotita} + (\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+})$
Sericitização do feldspato potássico:
$3\text{KAlSi}_3\text{O}_8 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{KAl}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 6\text{SiO}_2 + 2\text{K}^+$
Caulinitização da sericita:
$4\text{KAl}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 6\text{H}_2\text{O} + 4\text{H}^+ \rightarrow 3\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_6 + 4\text{K}^+$
Alunitização da sericita:
$\text{KAl}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 4\text{H}^+ + 2(\text{SO}_4)^{2-} \rightarrow \text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6 + 6\text{SiO}_2$
Alunitização da caulinita:
$3\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 2\text{K}^+ + 6\text{H}^+ + (\text{SO}_4)^{2-} \rightarrow 2\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6 + 6\text{SiO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$
Cloritização da biotita:
$\text{Biotita} + \text{H}^+ \rightarrow \text{clorita} + \text{quartzo} + \text{K}^+$
Epidotização e albitização do plagioclásio:
$\text{Plagioclásio} + \text{quartzo} + \text{H}_2\text{O} + \text{Na}^+ \rightarrow \text{epidoto} + \text{albita} + \text{H}^+$

3 MATERIAIS E METODOLOGIA

Os materiais investigados integram a parte ocidental do maciço rochoso escavado para a construção do túnel na região de Jacarepaguá, localizada na zona oeste do Rio de Janeiro.

Coletaram-se, junto ao bota fora do túnel em execução, quatorze amostras de rocha são de oito litotipos diferentes (tabela 3). O critério de amostragem foi, embora difícil, a identificação a olho nu de feições associadas ao hidrotermalismo, como por exemplo, a coloração esverdeada e o aspecto sedoso das faces da rocha.

Tabela 3 – Identificação das amostras coletadas no campo.

LITOTIPO	IDENTIFICAÇÃO
Traquito	11
Basalto	03/07
Granito	08
Diorito	02/24
Anfíbolito	04
Granodiorito gnaiss	20/21/22
Biotita granada gnaiss	01/23/25
Biotita gnaiss	10

Todas as quatorze amostras foram submetidas à análise petrográfica, difração de raios-x e a ensaios de resistência a compressão puntiforme (point load test).

Nas análises petrográficas, as rochas foram analisadas com lupa 10/20x e depois no microscópio ótico com luz polarizada, no laboratório de geotecnica da PUC-RJ que conta com câmera acoplada para geração direta de imagens (figura 1). As análises foram efetuadas em 20 pontos de cada lâmina, e permitiu, além da descrição da composição mineralógica, da granulometria e da forma e relação dos

contatos, a identificação dos vários tipos de alteração hidrotermal.

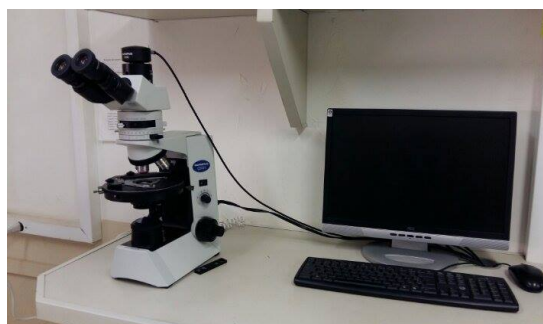


Figura 1 – Aspecto do equipamento de análise microscópica de rochas do laboratório de geotecnica da PUC-Rio.

Nas análises de difratometria de raios-x (DRX), realizadas no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) e no laboratório da PUC-Rio, através do método do pó, identificaram-se basicamente os minerais argilosos frutos de alterações hidrotermais, tal como mostrado na tabela 4. A sequência de procedimentos envolveu:

- Destorroamento das amostras no almofariz de ágata, para evitar contaminação;
- Passagem na peneira ABNT nº 200 (abertura de 0,074 mm);
- Aquecimento na mufla por 3,5 horas a 350° e a 550°C;
- Adição de etilenoglicol, no caso de dúvida na identificação, como foi o caso das amostras 03, 04, 07, 10, 11, 24 e 25.

Tabela 4 – Procedimento para identificação de argilominerais por difratometria de raio X (modificada de Frazão, 2012).

GRUPO	TRATAMENTOS			
	Natural*	Etilenoglicol*	Aquec. 350°/3,5h*	Aquec. 550°/3,5h*
Caulinita	~7 Å	~7 Å	~7 Å	amorfização
Ilita	~10 Å	~10 Å	~10 Å	~10 Å
Clorita	~14 Å	~14 Å	~14 Å	~14 Å
Vermiculita	~14 Å	~14 Å	~10 Å	~10 Å
Esmectita	~14 Å	~17 Å	~10 Å	~10 Å

*Nota: Espaçamentos interplanares; Å: Angstrom (1Å = 10⁻⁸ mm)

O ensaio de resistência à compressão puntiforme (point load test) foi realizado no laboratório de Geotecnia e Meio ambiente da PUC-Rio e obedece à norma técnica americana da ASTM D5731-95. Neste ensaio a rocha é carregada pontualmente através de dois cones metálicos. A ruptura é provocada pelo desenvolvimento de fraturas de tração paralelas ao eixo de carregamento.

Tabela 5 – Classificação proposta pela ISRM em função do grau de qualidade da rocha (ISRM, 1978).



Com base na tabela 5 e nas análises petrográficas, procurou-se verificar uma relação entre a resistência da rocha com seus diferentes graus de alteração.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Dois dos oito litotipos (granada biotita gnaiss e o diabásio) foram escolhidos para ilustrar as características das rochas que funcionam como encaixantes e filonares. As encaixantes (biotita granada e biotita gnaisses ou granodiorito gnaisses; anfibolito; diorito e granito) recebem a intrusão posterior de outros tipos de rocha e as filonares (basaltos e traquitos) são justamente as intrusivas, que ocorrem sob a forma de diques. Os resultados relativos aos dois litotipos são apresentados na tabela 6, podendo os leitores interessados acessar os demais resultados em Castro, 2016 – Tese de Mestrado, disponível em www.puc-rio.br.

Tabela 6 - Identificação das amostras coletadas no campo, bem como sua mineralogia secundária e resistência à compressão.

ROCHA	ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL	RAIOS X	RCU MPa
	ANÁLISE PETROGRÁFICA		
Basalto	Fraca a moderada muscovitização do plagioclásio; moderada epidotização do plagioclásio; fraca a moderada carbonatização do plagioclásio; fraca a moderada serpentinização do piroxênio	Clorita, Caulinita	17
	Raras sericitização e sausrutização e, ainda mais rara, epidotização do plagioclásio; rara uralitização do piroxênio (hornblenda)	Ilita, Caulinita, Clorita, muscovita	121
Granada Biotita Gnaiss	Muscovitização moderada do plagioclásio e intensa da biotita; intensa sericitização do plagioclásio; moderada epidotização do plagioclásio; moderada a intensa carbonatização do plagioclásio e da microclina; fraca a moderada cloritização da biotita.	Vermiculita ou Montmorilonita, Caulinita	10
	Fraca muscovitização do plagioclásio e moderada da biotita; fraca a moderada epidotização do plagioclásio; moderada sericitização do plagioclásio; fraca carbonatização do plagioclásio e da microclina.	---	69
	Raras substituições da biotita por muscovita, por microclina e alguns plagioclásio preenchidos por carbonatos	Muscovita	229

Observa-se nas encaixantes que:

- a rocha metamórfica de alto grau, com raras alterações hidrotermais, é extremamente resistente;
- a mesma rocha, com alterações hidrotermais fracas ou moderadas, tem resistência média;
- a mesma rocha, com alterações hidrotermais intensas, confirmadas pela identificação de picos de argilominerais como a montmorilonita ou a vermiculita, tem comportamento de rocha branda.

Observa-se nas filonares que:

- a rocha básica extrusiva, com raras alterações hidrotermais, mesmo tendo os minerais hidrotermais reconhecidos na difratogrametria, é muito resistente;

- a mesma rocha, com alterações hidrotermais fracas a moderadas, tem comportamento de rocha branda.

Os resultados indicam que, apesar da limitação da amostragem, ditada pela dificuldade de acesso ao interior do túnel, e a consequente ausência da definição do controle estrutural das feições de hidrotermalismo identificadas, existe uma correlação direta entre alteração hidrotermal e redução da resistência mecânica das rochas estudadas.

As figuras 2, 3 e 4 ilustram o processo de alteração hidrotermal nas amostras de basalto e granada biotita gnaiss. As imagens foram tomadas com o polarizador cruzado.

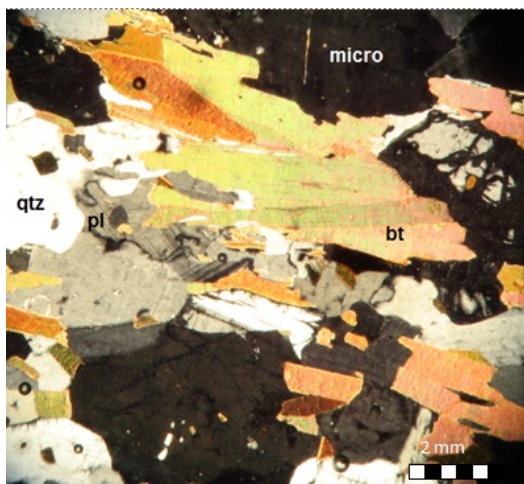


Figura 2 – Fotomicrografia da amostra do granada biotita gnaiss, mostrando grãos de biotita levemente alterados para clorita, luz polarizada; Legenda: pl: plagioclásio; bt: biotita; micro: microclina; qtz: quartzo.

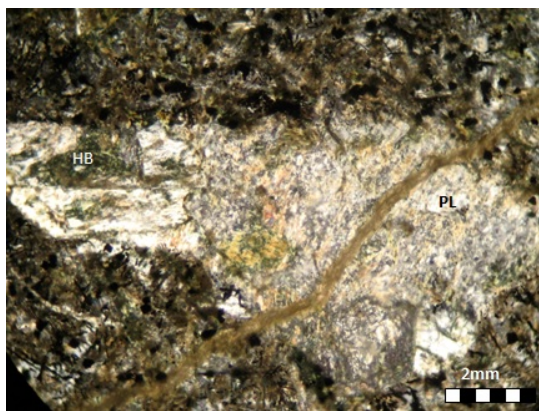


Figura 3 – Fotomicrografia da amostra de basalto. Fenocristal de plagioclásio intensamente sausrutizado,

sendo substituído por epidoto, sericita e calcita, cortado por microfissura preenchida por material amorfo, luz polarizada. Legenda: pl: plagioclásio; HB: hornblenda.

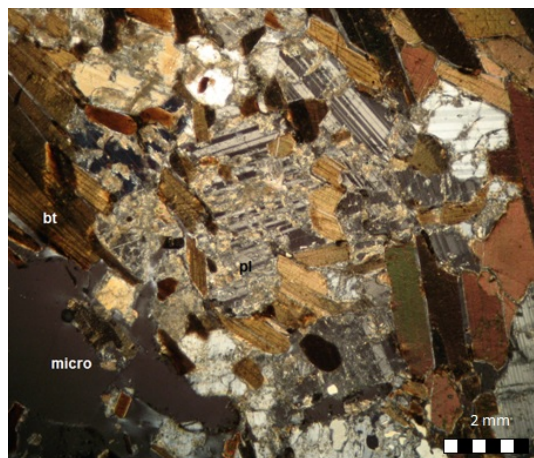


Figura 4 – Fotomicrografia da amostra 25. Plagioclásio sofrendo intenso processo de sausrutização gerando calcita, epidoto e sericita, grãos de biotita imbricados e fraturados evidenciando um intenso controle imposto pela foliação, luz polarizada. Legenda: pl: plagioclásio; bt: biotita; micro: microclina.

A principal característica das amostras analisadas é a presença de minerais secundários (carbonato, muscovita, sericita, epidoto, clorita e argilominerais) formados por alteração hidrotermal, retrometamorfismo e deformação dinâmica, controlada por estruturas tectônicas, processos metamórficos e magmáticos.

A alteração atinge a biotita em diferentes estágios de transformação: 1) grão levemente alterado; 2) grão com formação de “birds eyes” (entrada de água) dando início ao processo de transformação para clorita/sericita, tais processos estão associados a hidrotermalismo progressivo (figura 2). A figura 3 mostra um fenocristal de plagioclásio intensamente sausrutizado, perdendo as suas propriedades óticas, sendo substituído por epidoto, sericita e calcita, cortado por microfissura preenchida por material amorfo, indicando a intensidade do processo de transformação. A figura 4 indica uma forte hidrotermalização que atinge o plagioclásio (sausrutização), gerando epidoto, sericita e muscovita e grãos de biotita imbricados e fraturados evidenciando um intenso controle imposto pela foliação.

5. CONCLUSÃO

A alteração hidrotermal influencia tanto na mineralogia quanto na resistência dos maciços rochosos, sendo necessário um acompanhamento de forma permanente nas áreas onde ocorrem registros de alterações hidrotermais intensas, pois possuem alto potencial de alterabilidade, se tornando um desafio para as obras civis.

A petrografia indicou para os variados litotipos estudados, diversos graus de alteração, desencadeado por processos hidrotermais, apresentando mudanças na textura, mineralogia e estrutura, auxiliando no entendimento dos processos ocorridos

Como apresentado nos resultados, a alteração mineralógica teve grande influência na queda de resistência do maciço rochoso. Sendo as amostras de diorito (24), Biotita granada gnaiss (25), Anfibólio (04) e biotita gnaiss (10), além dos diques de basalto, as rochas mais susceptíveis a alteração ao longo da vida útil do túnel.

AGRADECIMENTOS

À PUC-Rio pela oportunidade desse desafio, ao CETEM por ter realizado as análises de DRX e ao programa CAPES pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

AMARAL, C. P. (2002). Investigações geológicas e intervenções recentes para redução do risco de acidentes associados a quedas de lascas no Túnel do Joá, Rio de Janeiro. In: *10o Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental*, 2002, Ouro Preto. CD-ROM 10o CBGE. Ouro Preto: ABGE-MG.

ASTM - *Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock*. Designation: D 5731-95. Annual Book of ASTM Standard, 4: 494-500. 1995.

CARVALHO, N. S. (1998). *Os condicionantes geológico-geotécnicos na ocupação do espaço subterrâneo no município do Rio de Janeiro*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, instituto de geologia, Rio de Janeiro, Brasil. 116 p.

CASTRO, J. S. M. (2016). *A influência da alteração hidrotermal na estabilidade de maciços rochosos*. Dissertação de Mestrado, DEC, PUC-Rio. 88p.

FRAZÃO, E. B., (2012). *Alteração de rochas como critério de seleção de agregados* 2º edição. São Paulo. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. 2012. 123p.

GEO-RIO (2001). Levantamento dos acidentes do Túnel do Joá. Relatório final.

GRIM, R. E. (1968). *Clay Mineralogy*. New York, McGraw Hill Book Company, 2ª edição.

ISRM (1978) – *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. Int. J. Rock Mechanics Min. Sci. Geomech. Abstr., Vol. 15, pp. 319-368.

MISAS, C. M. E. 2010. *Evolução magmática, alteração hidrotermal e gênese da mineralização de ouro e cobre do Palito, Província Aurífera do Tapajós (PA)*. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, instituto de geociências, São Paulo, Brasil. 179 p.

PIRAJNO, F. (1992). *Hydrothermal Mineral Deposits, Principles and Fundamental Concepts For the Exploration Geologist*. Springer-Verlag, New York. 709p.

REED, M. H. (1997). Hydrothermal alteration and its relationship to ore fluid composition. In: BARNES, H. L., ed. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. 3 ed. New York: J. Wiley, 1997. P. 303-365.

ROSE, A. W.; BURT, D. M. Hydrothermal alteration. (1979). In: BARNES, H. L., ed. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. 2 ed. New York: J. Wiley, 1979. P 173-235.

SILVA, A. U. (2011). *Caracterização e análise de resistência para as rochas dos emboques do túnel da gruta funda – Rio de Janeiro, RJ*. Monografia – Departamento de Geociências da UFRRJ, Rio de Janeiro, RJ, p. 55.

WERNICK, E. (2004). *Rochas magmáticas: conceitos fundamentais e classificação modal, química, termodinâmica e tectônica*. Ed. Unesp. São Paulo.