

CORRELAÇÕES ENTRE PETROGRAFIA E PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE MATERIAIS PÉTREOS VISANDO UTILIZAÇÃO COMO LASTRO DE FERROVIAS

CORRELATIONS BETWEEN PETROGRAPHY AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF ROCKS: APPLICATION AS RAILWAY BALLAST

Márcio José REMÉDIO¹, Rogério Pinto RIBEIRO¹, João Antonio CURTIS NETO²

¹Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP). Email: marcio.remedio@cprm.gov.br; rogerioprx@sc.usp.br

²Pós-Graduação em Geotécnica, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP). Email: geol.joaocurtis@gmail.com

Introdução
Materiais e Métodos
Resultados e Discussões
Contexto Geológico e Petrografia
Intrusivas Básicas
Complexo Varginha Guaxupé
Complexo Morungaba
Complexo Itu
Granito Terra Nova
Síntese das análises petrográficas
Índices Físicos
Propriedades Mecânicas
Ensaio de Alteração Acelerada
Considerações Finais
Agradecimentos
Referências

RESUMO - Considerando a possibilidade de implantação do Trem de Alta Velocidade, previsto em projeto governamental que ligará as cidades de Campinas, São Paulo e Rio de Janeiro, o presente trabalho trata da seleção do material pétreo disponível na região de Campinas, que possua alta qualidade para o emprego como lastro de ferrovia e obras em concreto. Com este objetivo foram confrontados dados petrográficos e resultados de ensaios físico-mecânicos de cinco variedades de rochas cristalinas (microgabro, gnaisse e granitos) muito utilizadas como agregado na construção civil, mas ainda não suficientemente estudadas para lastro ferroviário. Foram encontrados valores de resistências inferiores ou próximos aos limites normatizados para esta finalidade, restringindo a utilização de alguns dos materiais estudados. É importante frisar que materiais pétreos utilizados como agregado no lastro de ferrovias ficam sujeitos à exposição constante das intempéries, fazendo com que estudos envolvendo alterabilidade sejam tão importantes quanto os de caracterização geomecânica, levando-se em conta as condições tropicais típicas da região.

Palavras-chave: Trem de alta velocidade, lastro, agregado, caracterização tecnológica.

ABSTRACT - Regarding the possibility of implementation of a high-speed train provided by the government program which will connect the cities of Campinas, São Paulo and Rio de Janeiro, the present study deals with the selection of the rock material available in the region of Campinas, focusing on the material which has high quality to be used as ballast and in concrete building. In accordance with the aforementioned objective, petrographic analysis and physico-mechanical data of five types of crystalline rocks (microgabbro, gneiss and granites) were analyzed concurrently. These rocks are widely used as aggregates in civil construction, but have not yet been investigated as ballast. Strength values near or below the standardized limits were found regarding the application of the studied rocks as ballast aggregates. Thus, there is a restriction concerning the use of some of these materials. It is important to emphasize that rock materials which are used as ballast aggregates are exposed to continuous action of weathering, thus studies focused on deterioration are as essential as those focused on geomechanical characterization, taking into account the typical tropical conditions of the region.

Keywords: High speed train, ballast, aggregate, technological characterization.

INTRODUÇÃO

Os agregados rochosos são usados em concreto nas várias obras de engenharia, e o seu principal uso em ferrovias é na constituição do lastro, objeto deste estudo. Neste tipo de aplicação, o material pétreo fica exposto e sujeito à ação constante de intempéries, fazendo com que estudos envolvendo alterabilidade sejam tão importantes quanto os de caracterização geomecânica, como na implantação do trem de alta velocidade (TAV) entre as cidades de Campinas, São Paulo e Rio de Janeiro, onde são esperados grandes

investimentos governamentais e considerável impacto social. Trata-se de um meio de transporte com qualidade reconhecida há mais de décadas em outros países, com perspectivas de ser construído pela primeira vez no Brasil e compor sua matriz de transporte.

Com base nos estudos desenvolvidos pela CPRM (2009) e IPT (2010), do ponto de vista da engenharia constata-se que, ao longo do traçado desta ferrovia, há intensa variedade de substratos rochosos e terrosos, sendo que o TAV deverá requerer produção elevada de

agregados não só para emprego como lastro, mas também para concreto, pois existe também a necessidade de dormentes monoblocos mais densos, bem como obras de arte diversas.

Estas premissas motivaram a retomada de estudos de caracterização de agregados para uso em lastros de ferrovia, dando continuidade às pesquisas que há mais de três décadas vêm sendo desenvolvidos sobre materiais pétreos para construção civil por pesquisadores da Área de Pós-Graduação em Geotecnia da EESC/USP. De modo mais específico, com base nas diretrizes da norma NBR 5564 (ABNT, 2014), no presente trabalho são testadas amostras de agregados coletadas, representativamente, no ciclo produtivo de pedreiras em

atividades na região de Campinas, definindo-se parâmetros petrográficos, propriedades físico-mecânicas em estado natural e de alterabilidade (envelhecimento artificial).

Este estudo em questão poderá servir como norteador, considerando a opção mais provável do método construtivo escolhido de via lastrada e não o de trilhos sob laje de concreto, tendo em vista a ocorrência de siltitos brandos expansíveis/colapsíveis da Formação Itaré que ocorrem em uma porção considerável do futuro traçado do TAV entre Campinas e São Paulo (Parizotto, 2015; Parizotto et al., 2016). Estes materiais na opção da via por laje implicariam em sérios problemas geotécnicos e custos onerosos de fundação.

MATERIAIS E MÉTODOS

A vertente principal deste estudo está relacionada com as propriedades físico-mecânicas, químico-mineralógicas e texturais das rochas num contexto geotécnico do desempenho dos materiais de construção nas obras de engenharia do TAV brasileiro.

De acordo com o traçado desenvolvido para o TAV (Tav Brasil, 2009) e informações de CPRM (2009), foram estudadas rochas de cinco unidades geológicas que ocorrem na região de Campinas e

são muito utilizadas como agregado na construção civil, mas ainda não suficientemente estudadas para lastro ferroviário. Tratam-se de diabásios correlacionáveis aos magmatitos da Formação Serra Geral, de gnaisses fortemente anisotrópicos do Complexo Varginha Guaxupé, de granitóides dos Complexos Morungaba e Itu e do Granito Terra Nova. Um mapa simplificado com a distribuição destas unidades é mostrado na figura 1.

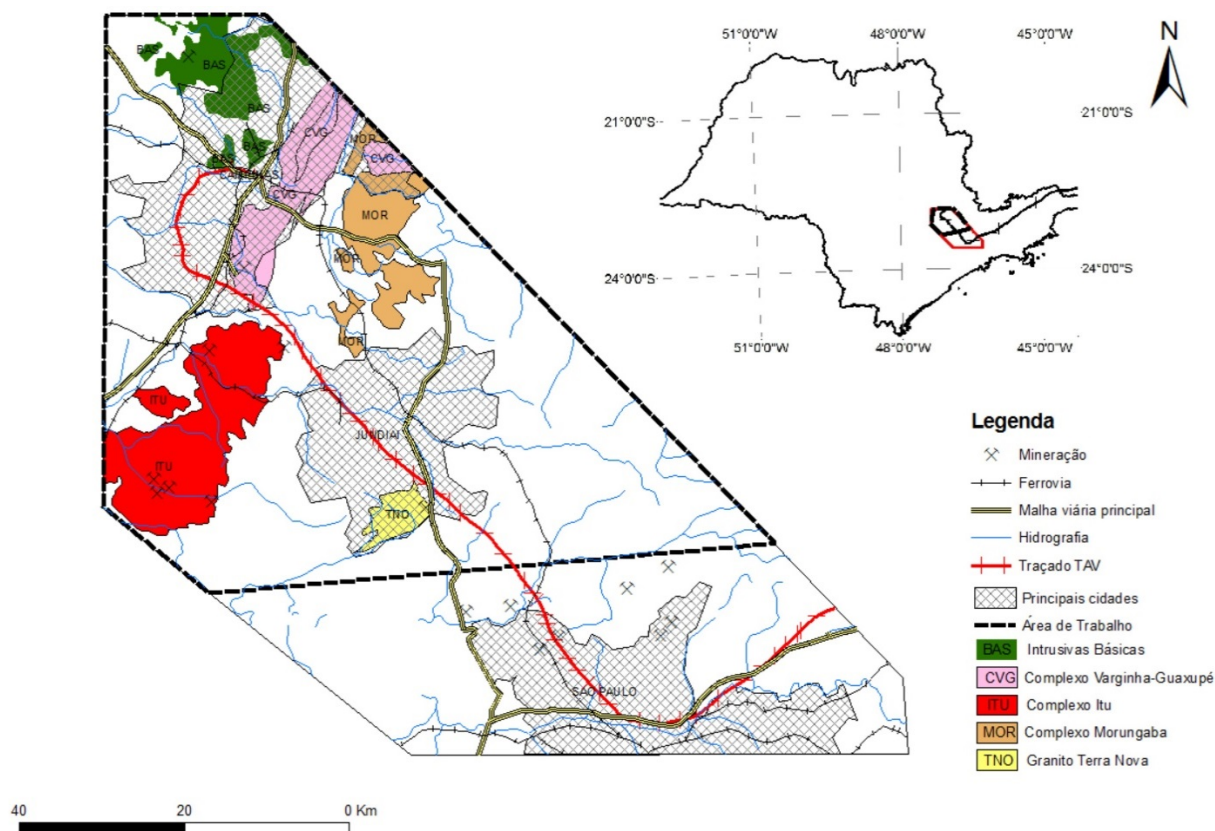


Figura 1- Localização da área de estudo e respectivas unidades geológicas.

Os litotipos representativos destas cinco unidades geológicas foram selecionados com base nos seguintes critérios: conter em algum ponto de sua área de afloramento alguma exploração industrial de rocha para produção de agregados e estar situada, no máximo, a 20 quilômetros de distância do traçado do TAV. A proximidade das jazidas em relação à obra é fundamental, já que o material pétreo é de baixo valor agregado e seu transporte limita a relação custo benefício.

Levando-se em conta esses critérios e a possibilidade de fornecimento de material e de visitas técnicas às indústrias, o procedimento de amostragem seguiu as diretrizes da norma NM 26 (ABNT, 2009a), com a coleta de amostras realizada diretamente nas pilhas pulmão do ciclo operacional de pedreiras ativas (Figura 2). Em média, foram amostrados em cada local aproximadamente 80 kg de cada uma das principais granulometrias (britas 4, 3, 2 e 1).



Figura 2 - A, B) Amostragem de brita de graduações variadas; C) Acondicionamento e transporte das amostras em etapas distintas de campo.

As análises petrográficas, os ensaios físico-mecânicos (índices físicos, resistências à compressão uniaxial, à abrasão Los Angeles e ao impacto Treton) e de alterabilidade (alteração acelerada por meio de ciclagem com solução e sulfato de sódio) foram realizados em laboratórios dos Departamentos de Geotecnia e de Engenharia de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos (USP), do Instituto

de Química de São Carlos (IQSC/USP) e do Serviço Geológico do Brasil (CPRM/Araraquara e São Paulo). Todos os procedimentos adotados seguiram as diretrizes estabelecidas pelas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, da *American Standard Testing Machines* - ASTM e da *International Society for Rock Mechanics* - ISRM (Tabela 1).

Tabela 1- Ensaios e respectivos valores esperados para agregados para uso em lastros ferroviários.

Ensaio	Norma	Valores limites
Análise petrográfica	NBR 7389 – Parte 2 (ABNT, 2009)	Padrão
	NBR 15845 – Parte 1 (ABNT, 2015)	
Massa específica	NBR 5564 – Anexo B (ABNT, 2014)	Mínimo 2,5 g/cm ³
Porosidade máxima		Máximo 1,5%
Absorção de água		Máximo 0,8%
Compressão Uniaxial	NBR 5564 – Anexo D (ABNT, 2014)	Mínimo 100 MPa
Abrasão Los Angeles	NBR NM 51 (ABNT, 2001)	Máximo 30%
Impacto Treton	NBR 5564 – Anexo E (ABNT, 2014)	Máximo 25%
Resistência à intempérie	NBR 5564 – Anexo C (ABNT, 2014)	Máximo 10%

No presente trabalho, adotou-se o Índice de Carga Pontual (Is) para se estimar a valor da resistência à compressão uniaxial, sendo os testes realizados em corpos de prova provenientes de amostras irregulares de rocha coletadas diretamente nas plantas de britagem das pedreiras visitadas.

Todas as amostras foram ensaiadas conforme as diretrizes das normas D5731 (ASTM, 2008) e ISRM (1985) e classificadas de acordo com a classificação de Broch & Franklin (1972). O valor da força Q, correspondente à carga pontual que foi aplicada, foi determinado de acordo com a seguinte equação de calibração entre p (pressão registrada no manômetro) e Q:

$$Q = 0,328 \times p - 0,2158 \quad (p \text{ em kgf/cm}^2 \text{ e } Q \text{ em kN})$$

Quanto aos ensaios para determinação da resistência ao choque (impacto Treton), mesmo exercendo certa influência na preparação das amostras a serem ensaiadas, foram utilizados para se estabelecer resultados comparativos entre os materiais pétreos estudados.

De acordo com Smith & Collins (1993), o ensaio de Abrasão Los Angeles é assumido para reduzir o tamanho de partículas de agregado por atrito com a queda mútua e impacto entre as partículas e uma carga de esferas de aço, sendo

utilizadas partículas com granulometria entre 50,8 mm e 25,4 mm (graduação F) por representarem condições similares às normatizadas para finalidade de uso como lastro de ferrovia.

Com o objetivo de se obter informações a respeito da alteração intempérica das rochas expostas ao tempo (lastro de ferrovias), foram realizados estudos de alteração acelerada com sulfato de sódio seguindo-se as diretrizes do Anexo C da NBR 5564 (ABNT, 2014), específica para lastros, e recomendações do método de ensaio DNER-ME 089/94.

Foi feita também a avaliação qualitativa de todas as amostras por meio de exames visuais dos corpos de prova após cada 10 ciclos com registro fotográfico dos eventuais danos (fissuras, trincas, escamações, oxidação, desagregação, etc.).

A terminologia adotada foi a seguinte: a) Desintegração: Perda de coesão dos grãos da rocha associada, ou não, à alteração; b) Fissuração: Formação de descontinuidades em uma face do agregado e c) Rachadura: Extensão da fissuração por mais de uma dimensão do fragmento. Estes termos (a, b, c) foram empregados sequencialmente, considerando-se que fissurações originam rachaduras e, então, lasqueamento e fragmentação.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Contexto Geológico e Petrografia

De modo simplificado, as pedreiras visitadas foram consideradas como representativas das unidades geológicas estudadas. Estas unidades produtivas possuem capacidade instalada de britagem variando entre 360.000 e 2.000.000 ton/ano e, há décadas, vêm impulsionando o crescimento das regiões de Campinas, Valinhos, Itu e Jundiaí, com destinação dos agregados principalmente em obras de terraplanagem, drenagem, concreto e pavimentação (Remédio, 2017). Uma síntese das análises petrográficas é apresentada a seguir, sendo que ilustrações típicas de amostras de mão e detalhes microscópicos são mostradas na figura 3.

Intrusivas Básicas

De acordo com Almeida et al. (1986), Melfi et al. (1988) e Marques & Ernesto (2004), esta unidade é essencialmente composta pelos equivalentes intrusivos das rochas vulcânicas, sendo representada por soleiras e diques de diabásio, podendo ocorrer, em algumas

localidades, dioritos e microdioritos pórfiros, lamprófiros, andesitos, monzonitos pórfiros e traquiandesitos.

Por suas características mineralógicas e texturais, os diabásios são rochas de boa condição geomecânica, mas em geral mais susceptíveis ao intemperismo (Frazão & Frascá, 2002; Frazão, 2007; Squisato et al., 2009). Assim sendo, a caracterização deste material para uso como lastro ferroviário é de extrema importância, uma vez que ele ficará exposto às ações intempéricas, diferentemente da aplicação do agregado em pavimentação asfáltica e concreto hidráulico.

O material amostrado destas rochas intrusivas apresenta uma coloração cinza escuro e, quando em porções de rocha alterada, adquire uma coloração amarelo escuro. Apresenta estrutura maciça granular, com granulação fina (entre 0,5 e 1,5 mm) e textura equigranular, sendo classificado como microgabro. Seus minerais essenciais são plagioclásio (46%), augita (36%) e opacos

(magnetita) (16%); como acessórios (3%) apatita, epidoto e quartzo e minerais secundários sericita e/ou saussurita. Em nível microscópico, exibe grau de alteração incipiente a baixo, do tipo intempérico, condicionado pelo grau de cristalinidade da rocha. O grau de microfissuramento é baixo, do tipo transgranular.

Complexo Varginha Guaxupé

De acordo com os trabalhos de enfoque tectono-estrutural de Hasui & Oliveira (1984), Campos Neto (1985) e CPRM (2009), a presente unidade migmatítica é caracterizada por rochas com composição granodioríticas, graníticas, sieníticas e monzoníticas em contato com corpos batolíticos de granito gnáissico anatóxico metaluminoso comumente porfirítico, gerado por fusão parcial *in situ* de estratos infracrustais. O granito gnáissico contém enclaves de gnaiss Diorito-monzodiorítico, xenólitos de gnaiss calciossilicático e lentes de sillimanita-cordierita metapelito. Ocorrem também, subordinada-mente, corpos de granitóides peraluminosos.

Nesta unidade foi visitada uma pedreira em atividade no município de Campinas, onde predominam ortognaisses e granitóides migmatizados, de coloração acinzentada, em geral cobertos por espesso solo de composição arenosa (argila subordinada) de coloração amarelada. Na rocha, pode-se observar diferentes intensidades de gnaissificação, responsáveis pela variação no grau de paralelismo entre as porções de paleossoma e neossoma.

As amostras coletadas apresentam, em geral, bandamento gnáissico e/ou estrutura migmatítica marcantes. A coloração da rocha são cinza e, quando alterada, exibe tons cinza esbranquiçado. A granulação é fina (0,1 a 1,5mm) com textura predominantemente inequigranular. Microscopicamente são classificadas como gnaiss, formado em condições de metamorfismo regional do fácies afibolito.

Observa-se baixo grau de alteração (do tipo intempérico) sendo o microfissuramento preferencialmente intragranular), com a seguinte composição mineralógica: minerais essenciais são feldspato alcalino (39%), plagioclásio (29%), quartzo (24%) e biotita (5%); como acessórios (2%) apatita e zircão e

minerais secundários (<1%) sericita e/ou saussurita. Observou-se que alguns opacos (óxidos) se encontram aos minerais máficos da rocha.

Complexo Morungaba

De acordo com as descrições de Vlach (1985) o material produzido na pedreira visitada em Valinhos englobaria dois fácies: o microgranítico róseo hololeucocrático (biotita muscovita granada monzogranito) e o róseo leucocrático de granulação média, raramente fina (biotita muscovita monzogranito). O material coletado condiz com esta descrição, sendo classificado como biotita monzogranito de granulação fina a média, entre 0,5 e 1,5mm. As amostras apresentam coloração rósea nas porções sã e alterada, estrutura maciça e textura fanerítica equigranular. Seus minerais essenciais são feldspato alcalino (39%), plagioclásio (29%), quartzo (25%), biotita (5%) e muscovita (1%); como acessórios (1%) zircão, titanita e opacos e minerais secundários sericita, saussurita e óxidos. Em nível microscópico, exibe grau de alteração incipiente a baixo, do tipo intempérico (figura 5.3b). O grau de microfissuramento é baixo, do tipo intragranular.

Complexo Itu

O material amostrado representa uma das fácies da Intrusão Cabreúva (Galembeck et al., 1991, Wernick et al., 1994) e apresenta uma coloração rósea e, quando em porções de rocha alterada, adquire uma coloração rósea esbranquiçada. A estrutura é maciça granular, com granulação grossa (entre 2 e 5 mm) e textura fanerítica equigranular, sendo classificado como monzogranito. Seus minerais essenciais são quartzo (40%), feldspato alcalino (30%), plagioclásio (20%), hornblenda (5%) e biotita (2%); como acessórios (2%) zircão, titanita e óxidos e minerais secundários (1%) sericita, saussurita e óxidos. Em nível microscópico, exibe grau de alteração baixo a moderado, do tipo intempérico. Nota-se maior incidência de sericitização e/ou saussuritização nos cristais de feldspato alcalino (por vezes microclínio) dando um aspecto “sujo” a amostra. Os opacos ou óxidos ocorrem associados aos minerais máficos, principalmente hornblenda. O grau de microfissuramento é baixo, principalmente do tipo intragranular.

Granito Terra Nova

De acordo com Hasui et al. (1978a, b) são constituídos de granitos cinza-claros a vermelhos com granulação fina a grossa, não foliados e de textura subidiomórfica a hipidiomórfica, e preferem chamá-lo de granitoide.

De acordo com o material coletado nesta pedreira, a rocha é classificada como biotita monzogranito. A coloração da rocha são rósea, variando para tons mais claros quando alterada. Apresenta estrutura maciça granular, com granulação média (entre 1 e 2 mm) e textura

fanerítica equigranular. Seus minerais essenciais são feldspato alcalino (42%), plagioclásio (30%), quartzo (20%), biotita (5%) e muscovita (1%); como acessórios (2%) zircão e apatita e minerais secundários (<1%) sericita e/ou saussurita e óxidos. Em nível microscópico, exibe grau de alteração baixo, do tipo intempérico. Comparativamente ao granito Itu, observa-se que os processos de sericitização e/ou saussuritização dos feldspatos são menos intensos. Alguns óxidos encontram-se associados à biotita.

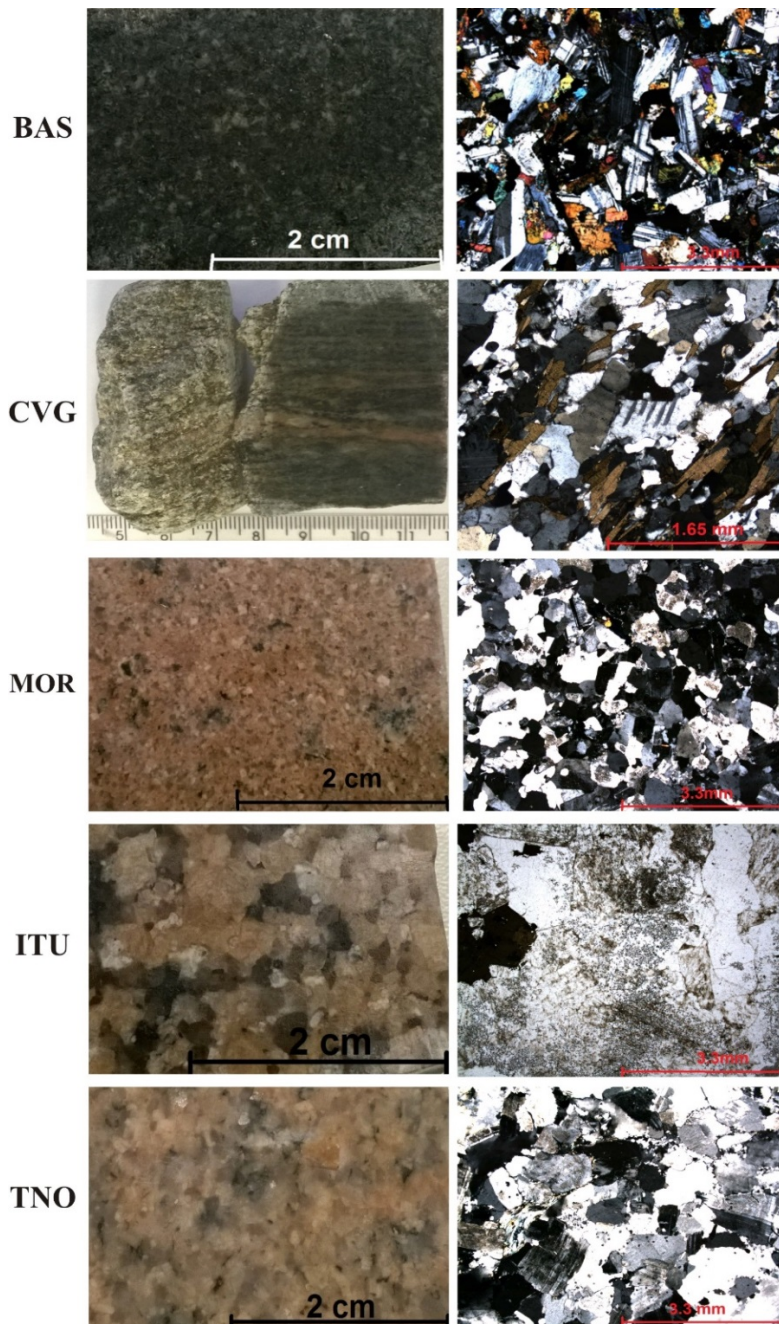


Figura 3- Conjunto de amostras de mão (esquerda) e detalhes microscópicos (direita): BAS- microgabro exibindo baixo grau de sericitização e/ou saussuritização; CVG- gnaissse também pouco alterado; MOR- monzogranito Morungaba exibindo arranjo equidimensional dos minerais e baixo grau de alteração dos feldspatos; ITU- monzogranito Itu de granulação grossa e pronunciada alteração intempérica dos feldspatos e TNO- monzogranito Terra Nova de granulação média e grau médio de sericitização/saussuritização principalmente nos feldspatos.

Síntese das análises petrográficas

As rochas estudadas se relacionam a um tipo metamórfico (gnaisse-migmatito), a um litotipo básico classificado como microgabro e três monzogranitos. Verifica-se que o grau de alteração, tanto intempérico quanto hidrotermal (quando presente), não é muito avançado o que permitiu classificar estas amostras com baixo grau de alteração (localmente moderado) e considerar, com relação ao intemperismo, como rochas sãs.

As análises macro e especialmente microscópica permitiram estabelecer algumas correlações com os valores dos índices físicos apresentados no item a seguir, sendo conhecido que a porosidade e/ou absorção d'água é maior em rochas mais alteradas. De modo comparativo, no presente caso, valores relativamente maiores destas propriedades parecem estar relacionados à granulação da rocha e a níveis de alteração mais pronunciados nos feldspatos, aliados ao grau de microfissuramento que ocorre preferencialmente em dois modos: transgranular, onde as fissuras ignoram os limites dos minerais e, intragranular onde os limites coincidem ou não ultrapassam os dos minerais.

A estrutura apresentada por quase todas as rochas é maciça, onde a exceção é o litotipo gnáissico CVG, que apresenta bandeamento quartzo-feldspático típico deste tipo de rocha metamórfica. Em relação à textura, são todas faneríticas, variando de fina até grossa, equigranular, inequigranular e porfirítica.

Índices Físicos

Os resultados dos ensaios de índices físicos encontram-se sintetizados na tabela 2 e figura 4. Quanto aos valores de massa específica aparente (ρ_a), a norma NBR 5564 (ABNT, 2014) recomenda um valor mínimo de 2.500 kg/m³, sendo que todas as rochas atendem esta propriedade.

Como esperado, o diabásio foi a rocha que apresentou a maior ρ_a (2.996 kg/m³), sendo detentor de um teor de 54% de minerais pesados (augita, magnetita e, subordinadamente, apatita e epidoto).

Em relação aos valores de porosidade aparente (η_a) e absorção de água (α_a), a norma NBR 5564 (ABNT, 2014) recomenda valores máximos de 1,5% e 0,8%, respectivamente, verificando-se que todas as rochas atendem à

estas propriedades. Uma breve comparação entre os materiais estudados indica o granito Terra Nova como a rocha com valores de porosidade aparente e absorção de água relativamente mais expressivos, provavelmente em função de uma maior comunicabilidade de sua rede porosa, relacionando-se com as condições de microfissuramento e de alteração mineralógica. Em caráter preliminar, as observações petrográficas parecem indicar que as microfissuras se mostram preferencialmente não preenchidas e os cristais de feldspatos se apresentam mais intensamente alterados.

Tabela 2- Resumo dos índices físicos das rochas estudadas.

Rocha	ρ_a (kg/m³)	η_a (%)	α_a (%)
TNO	2,614	1,1	0,43
MOR	2,620	0,85	0,32
ITU	2,638	0,59	0,22
CVG	2,755	0,72	0,26
BAS	2,996	0,78	0,26

Legenda: BAS- Intrusivas básicas, CVG- Complexo Varginha Guaxupé, MOR- Granito Morungaba, ITU- Granito Itu, TNO- Granito Terra Nova. ρ_a : massa específica aparente; η_a : porosidade aparente; α_a : absorção de água.

Propriedades Mecânicas

Em referência aos ensaios de carga pontual, as rochas apresentam resistências muito alta (Is50 entre 7,0 e 9,6 MPa) a extremamente alta (Is50 de 10,7 MPa) no caso do Granito Morungaba, rocha de estrutura maciça, homogênea, compacta e de granulação fina. Pode-se afirmar que, de modo conservador, os valores mínimos de resistência à compressão uniaxial estimados por Al-Harhi (2001) por meio de correlações com os respectivos índices Is50 (Figura 5) indicam que todas as rochas apresentam valores de RCU maior ou igual a 160 MPa, atendendo aos requisitos mínimos de RCU (100 MPa) como característica importante de agregado para uso em lastro ferroviário prevista na norma NBR5564 (ABNT, 2014).

De forma conjunta, os resultados médios apresentados pelos litotipos com relação às propriedades mecânicas obtidos pelos ensaios de Carga Pontual, de abrasão Los Angeles e resistência ao choque (Treton) são apresentados na tabela 3.

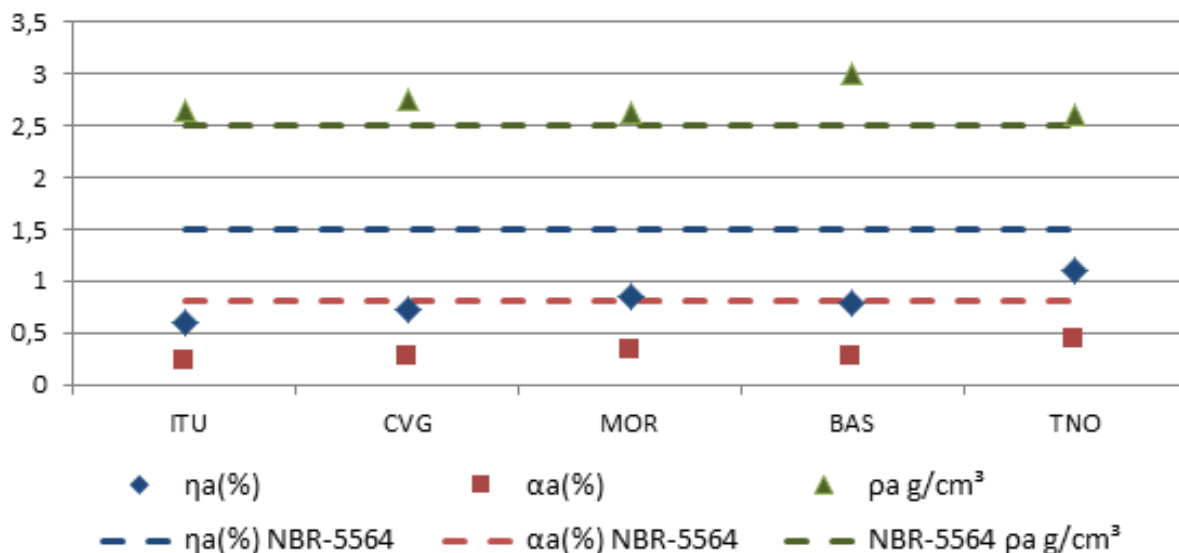


Figura 4- Resultados dos ensaios de índices físicos

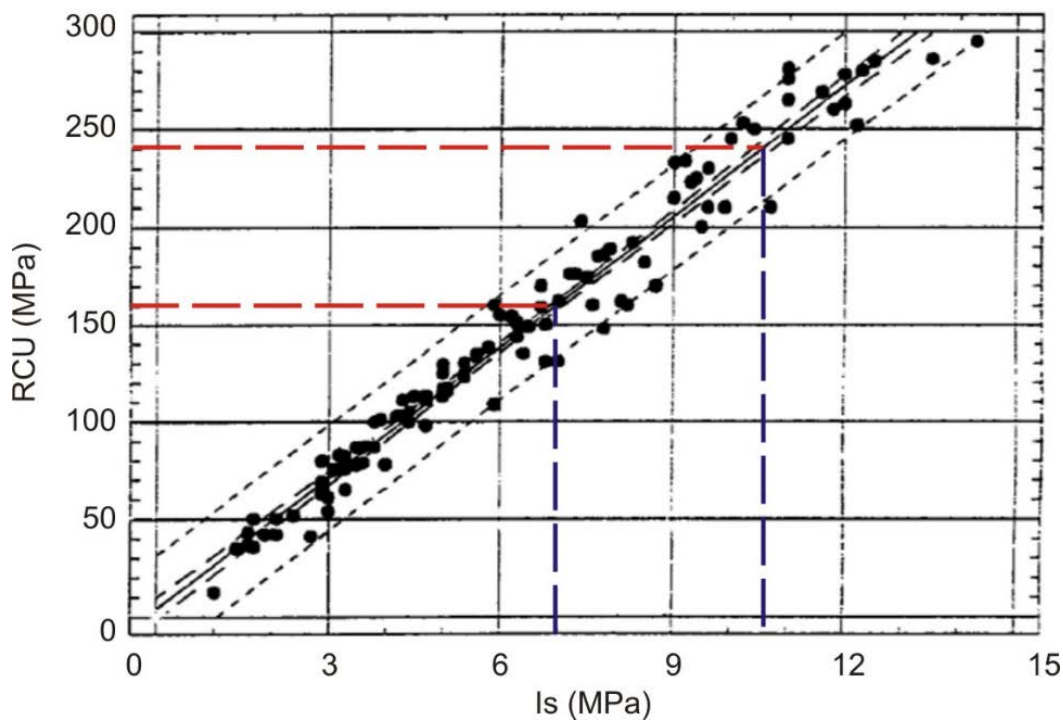


Figura 5- Correlação entre I_s e RCU (Modificado de Al-Harhi, 2001). Tracejado em azul indica valores mínimos/máximos de I_{s50} e, no tracejado em vermelho, a estimativa dos respectivos valores de RCU para as rochas estudadas.

Tabela 3- Síntese dos resultados de ensaios mecânicos: carga pontual (I_{s50}), resistências à abrasão Los Angeles **P** e ao choque (impacto) Treton **T**

Rocha	I_{s50}		P			T	
	(MPa)	Status	(%)	Status (a)	Status (b)	(%)	Status (a)
BAS	9,6	R	13,4	R	R	11,7	R
CVG	7,0	R	16,2	R	R	17,6	R
MOR	10,7	R	16,2	R	R	18,7	R
ITU	7,5	R	31,3	NR	NR	54,0	NR
TNO	9,6	R	23,0	R	R	32,5	NR

Legenda: BAS- Intrusivas básicas, CVG- Complexo Varginha Guaxupé, MOR- Granito Morungaba, ITU- Granito Itu, TNO- Granito Terra Nova; R- Recomendado, NR- Não Recomendado; **a** e **b** correspondem ao status do material comparado aos limites máximos recomendados pelas normas NBR 5564 (ABNT, 2014) e EN 13450 (DIN, 2013), respectivamente.

Em referência aos cinco materiais pétreos estudados, verifica-se que dois deles (ITU e TNO) atendem parcialmente aos requisitos de impacto Treton e de abrasão Los Angeles recomendados pelas normas NBR 5564 (ABNT, 2014) que trata de lastro de ferrovia, cujos limites máximos são respectivamente 25% e 30%.

Levando-se em conta exclusivamente o ensaio de abrasão Los Angeles, o mais representativo deles, seria apenas o granito ITU que não atenderia também aos limites mais conservadores da norma EN13450 (DIN, 2013) que especifica uma perda por abrasão P máxima de 24% para trens de passageiros, índice que se relaciona ao presente estudo. Os três materiais restantes (BAS, CVG e MOR) atendem a todos os requisitos.

Vale ressaltar que estes resultados não devem ser utilizados como critério de aceitação ou rejeição destas rochas para uso como agregado no lastro de ferrovia de alta velocidade, uma vez que as amostras de ensaios foram coletadas diretamente nas pilhas de britagem das pedreiras visitadas, sendo que todos os materiais são explotados e comercializados para outras finalidades, notadamente para uso em concreto com cimento Portland e em pavimentação.

Desta forma, especialmente nas unidades geológicas onde as variações faciológicas possam ser mais expressivas, mostra-se

necessário a realização de estudos nos locais de extração para otimizar as operações de desmonte e britagem, a fim de atender os rígidos critérios de seleção para uso como lastro em uma obra de engenharia de grande monta, como é o caso do TAV brasileiro.

Ensaio de Alteração Acelerada

Os ensaios foram realizados levando-se em conta a exequibilidade dos experimentos e, também, para verificar sua adequação em testar condições laboratoriais que não necessariamente retratam as condições reais de campo quanto às solicitações impostas aos materiais pétreos estudados.

Todos eles se apresentam como rocha sã ou com baixo grau de alteração, sendo muito comercializados como pedra britada para concreto com cimento Portland e segmentos da pavimentação.

O valor da resistência a intempérie Ri40 preconizado na norma NBR-5564 (ABNT, 2014) não deve exceder 10%. Levando-se em conta as condições estabelecidas nos ensaios laboratoriais de ciclagem com solução de sulfato de sódio, todos os litotipos estudados apresentaram resultados satisfatórios, como pode ser visto na tabela 4. Exceção estaria relacionada à amostra do Granito Terra Nova, se for considerado o limite máximo mais conservador de 3% recomendado pela norma EN 13450 (DIN, 2013).

Tabela 4 - Dados e resultados de ensaios para determinação da resistência à intempérie Ri40.

Rocha	Dados (g)					Resultados (%)			
	M _i	M _{f10}	M _{f20}	M _{f30}	M _{f40}	R _{i10}	R _{i20}	R _{i30}	R _{i40}
BAS	1580,90	1575,74	1573,90	1570,81	1570,43	0,33	0,44	0,64	0,66
CVG	1480,88	1477,44	1474,64	1470,08	1466,79	0,23	0,42	0,73	0,95
MOR	1318,17		1317,48	1316,76	1316,5		0,05	0,11	0,13
ITU	1689,7	1685,71	1679,87	1670,16	1664,48	0,24	0,58	1,16	1,49
TNO	1425,89	1425,18	1371,53	1270,81	1236,89	0,05	0,80	3,09	5,34
TNO _{FRAG}			42,90	110,96	86,37				

Legenda: BAS- Intrusivas básicas, CVG- Complexo Varginha Guaxupé, MOR- Granito Morungaba, ITU- Granito Itu, TNO- Granito Terra Nova; Mi- massa inicial, Mf10 a Mf40- massa final após o 10°, 20°, 30° e 40° ciclos; Ri10 a Ri40- resistência à intempérie após o 10°, 20°, 30° e 40° ciclos. Anexo C da NBR 5564 (ABNT, 2014).

Por meio das observações visuais resumidas na tabela 5, pode-se afirmar que a avaliação qualitativa corroborou as quantificações de perda de massa das amostras após os ciclos de alteração acelerada com solução de sulfato de sódio, sendo que a amostra mais danificada foi o granito Terra Nova (TNO), conforme ilustrado na figura 6. Já

nas demais quatro rochas as alterações mostraram-se menos pronunciadas.

O processo de quebra dos fragmentos é desenvolvido pela recristalização dos sais de sulfato de sódio que, enquanto solução e durante o processo de recristalização, preenchem as fissuras dos mesmos.

Deste modo, pode-se inferir que as fissuras ou microfissuras do granito Terra Nova (TNO) devem estar mais abertas ou interconectadas, ou então que as fissuras estivessem preenchidas

por algum material expansivo, o que poderá ser verificado com a realização de ensaios adicionais de saturação em água e secagem em estufa.

Tabela 5- Exame visual das amostras cicladas em solução de sulfato de sódio / secagem em estufa.

Rocha	Ciclo 10	Ciclo 20	Ciclo 30	Ciclo 40
BAS	Leve OXI	OXI dos fragmentos; em 4 deles observam-se FIS (1) e RAC (3) mais evidentes	OXI dos fragmentos; em 5 deles notou-se FIS (4) e RAC (1) mais evidentes, mas pouco pronunciadas	Fragmentos com leve OXI; idem ciclo 30; com presença de <i>boxworks</i> sub-milimétricos decorrentes da OXI e LIXIV de minerais opacos (sulfetos?).
CVG	Leve OXI	OXI dos fragmentos; em 1 deles aresta cortada por RAC ortogonal ao bandamento.	OXI dos fragmentos; idem ciclo 20.	OXI dos fragmentos; idem ciclo 20.
MOR	Leve OXI	OXI pouco pronunciada; localmente cavidades de dissolução (opacos). Pequena FIS (1) podendo evoluir para LAS; fratura natural começando a abrir, podendo evoluir para RAC/FRAG.	Idem ciclo 20; em fragmentos FIS (1) e RAC (2) pouco pronunciadas.	Idem ciclos 20/30; OXI pouco pronunciada com lixiviação/alteração pouco mais evidente de minerais máficos e/ou opacos (?).
ITU	Leve OXI; algumas fraturas com incipiente alteração.	OXI e DESC nos minerais máficos; em 3 fragmentos FIS e condições para evoluir para LAS e/ou FRAG.	Idem ciclo 20; 5 fragmentos com pequenas FIS (2) e RAC (3) mais evidentes; em 1 deles LAS podendo evoluir para PM	OXI mais intensa; FIS (4), RAC (3) e LAS mais evidente em 1 fragmento.
TNO	Microfissuras mais evidentes; cavidades de dissolução dispersas; 1 fragmento lascado.	Alteração mais intensa em todas as amostras; disseminação de <i>boxworks</i> (provável oxidação de opacos - sulfetos?), FIS e RAC evidentes em 6 fragmentos; 1 deles com intensa FRAG.	Idem ciclo 20; FIS evidenciadas em vários fragmentos; 1 com intensa FRAG e 3 com RAC bem marcadas, mas não muito pronunciadas.	OXI intensa e FIS em todas as amostras; RAC (6) pronunciada; disseminação de <i>boxworks</i> (sulfeto?) e 1 fragmento muito FRAG;

Legenda: BAS- Intrusivas básicas, CVG- Complexo Varginha Guaxupé, MOR- Granito Morungaba, ITU- Granito Itu, TNO- Granito Terra Nova; OXI- Oxidação, FIS- Fissura ou fissuração; RAC- Rachadura; LAS-Lasqueamento; FRAG- Fragmentação.

É importante destacar que este tipo de ensaio não reflete, necessariamente, a condição real de campo em que estão sujeitos os lastros das ferrovias, a depender muito do regime climático e da geologia local onde se localiza a linha férrea. A presença de minerais expansivos no próprio agregado não foi identificada, podendo-se inferir que o grau de microfissuramento mineral deve ter sido o responsável pela resposta das amostras TNO às solicitações mais

agressivas do envelhecimento acelerado estabelecidas na ciclagem com solução de sulfato de sódio.

O simples descarte da amostra ainda deve ser analisado, cuidadosamente, em função do processo produtivo do agregado, não tendo sido escopo da presente pesquisa, onde o tipo de desmonte e especificações de britagem da rocha, podem influenciar positiva ou negativamente estes dados ou condições.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nas diretrizes de normas técnicas específicas para lastro, foram testadas amostras de agregados coletadas diretamente nas pilhas de britagem de pedreiras em atividade na região

de Campinas, relacionadas a maciços rochosos de rochas intrusivas básicas, de gnaisses e de granitos. Definem-se parâmetros petrográficos e propriedades físicas e mecânicas em estado

natural e sua alterabilidade por meio de ciclos de envelhecimento artificial (saturação em solução de sulfato de sódio).

Dos cinco materiais estudados, três deles (microgabro, gnaiss e monzogranito Morungaba) atendem às recomendações das normas vigentes. O granito Terra Nova teve o

resultado mais baixo com relação aos ciclos de envelhecimento e isso deve ser causado pela forma como estão dispostas as aberturas das fissuras. Com relação ao Granito Itu, acredita-se que a granulação exerça mais influência pelos resultados mais baixos quando comparados aos demais litotipos.

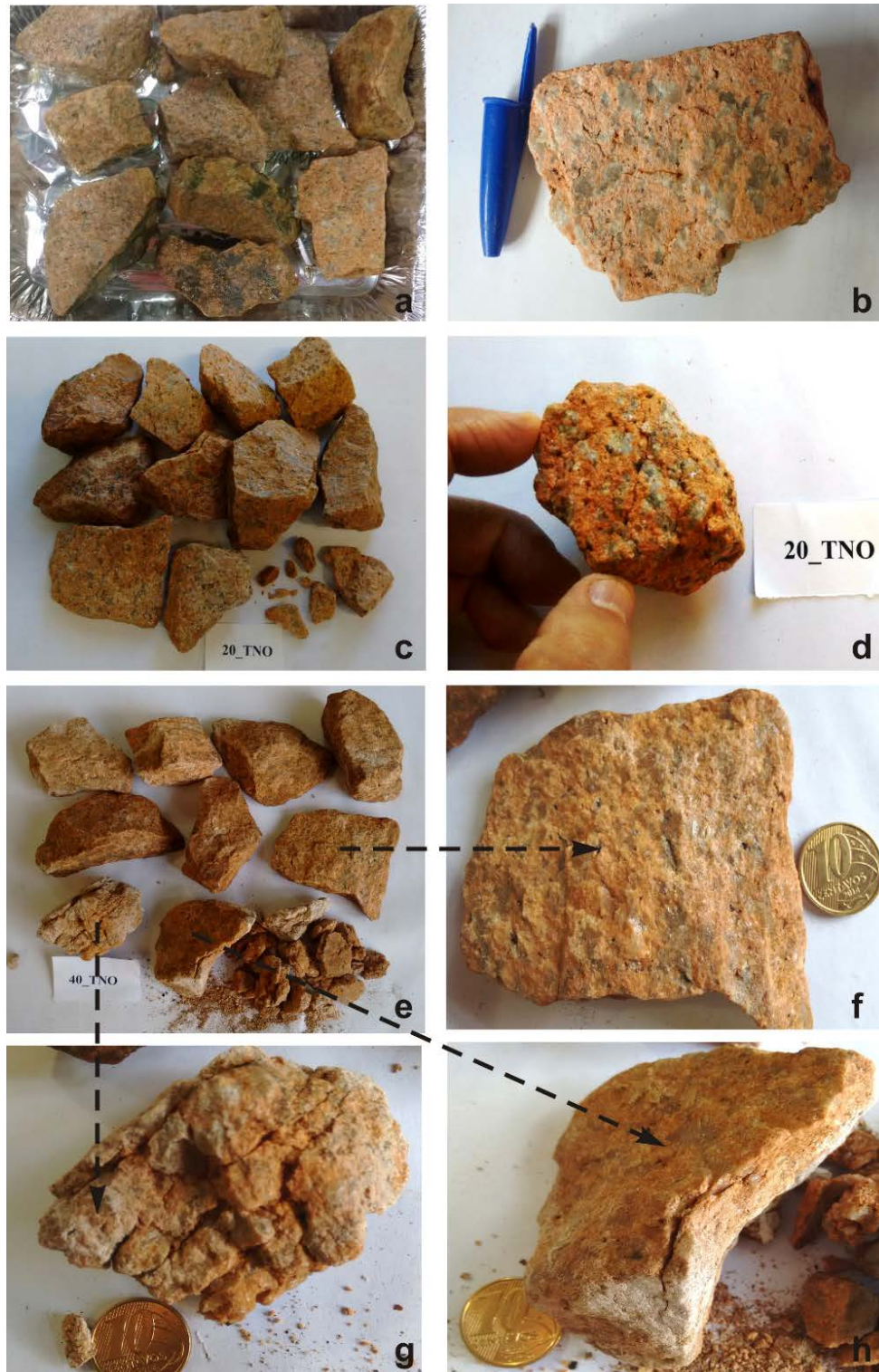


Figura 6- Registro fotográfico das amostras da rocha (granito Terra Nova - TNO) que apresentou a maior perda de massa nos ensaios de ciclagem com solução de sulfato de sódio: **A, C, E**) aspecto visual das amostras após o 10°, 20° e 40° ciclos e respectivos detalhes em **B**) microfissuras e cavidades de dissolução de minerais opacos/sulfetos, **D**) microfissuras e rachaduras mais evidentes e **F, G, H**) fragmentos com fissuras e rachaduras mais intensas.

Quanto aos materiais que atendem parcialmente, devem ser reamostrados de maneira criteriosa, uma vez que a variação faciológica das unidades geológicas implica em diferenças representativas nos resultados, não sendo recomendado utilizar os valores obtidos nos experimentos como critério de rejeição ou aceite dos materiais, servindo este estudo apenas como um norteador em termos da continuidade de pesquisas para esta importante obra.

Desta forma, especialmente nas unidades geológicas com variações faciológicas mais relevantes, recomenda-se estudos nos locais de

extração para otimizar as operações de desmonte e britagem, visando atender os rígidos critérios de seleção para uso como lastro.

Para uma comparação das propriedades físico-mecânicas e de alterabilidade dos materiais pétreos estudados, tendo em vista as condições intempéricas tipicamente tropicais a que estarão submetidos em lastro de ferrovia, é recomendável ensaios de alteração natural e acelerada em extrator Soxhlet e/ou saturação em água e secagem em estufa, complementando as informações já obtidas e apresentadas neste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM) pelo suporte logístico e também algumas pedreiras da região de Campinas, que forneceram todo o material amostrado e permitiram o acesso às suas instalações.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado graúdo – Ensaio de Abrasão Los Angeles. **NBR NM 51**. Rio de Janeiro. 2001. 13p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados - Amostragem. **NBR NM 26**. Rio de Janeiro. 2009a. 16p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados – Análise petrográfica de agregado para concreto. Parte 2: Agregado graúdo. **NBR 7389**. Rio de Janeiro. 2009b. 9p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Via Férrea - Lastro-Padrão. Requisitos e Métodos de Ensaio. **NBR 5564**. Rio de Janeiro. 2014. 32p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rochas para revestimento. Parte 1: Análise petrográfica. **NBR 15845**. Rio de Janeiro. 2015. 8p.
- AL-HARTHI, A.A. A Field index to determine the strength characteristics of crushed aggregate. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 60, n. 3, p. 193-200, 2001.
- ALMEIDA, F.F.M., FERREIRA, F.J.F., CARNEIRO, C.D.R., STEFANI, F.L. Aspectos evolutivos da geossutura Tocantins-Araguaia. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA, CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34, 1986, Goiânia. **Anais...**Goiânia: Sociedade Brasileira de Geologia, v. 3, p. 1269-1284.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications. **D5731-08**. West Conshohocken. 2008. 3p.
- BROCH, E. & FRANKILIN, J. A. The Point Load Strength Test. **International Journal of Rock Mechanics and Mineral Sciences**, v. 9, p. 669-697, 1972.
- CAMPOS NETO, M. C. Evolução do Pré-Cambriano paulista e de regiões adjacentes. In: V Simpósio Regional de Geologia, 1985, São Paulo. **Atas...**São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, v. 2, p. 561-571.
- CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Mapeamento Geológico geotécnico do Traçado referencial do Trem de Alta Velocidade TAV. **Relatório Técnico**. São Paulo: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 2009.
- DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER-ME 089/94**. Agregados - Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. 6p.
- DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. Aggregates for railway ballast. **EN 13450**. Berlin. 2013. 35p.
- FRAZÃO, E.B. Tecnologia para a produção e utilização de agregados. In: TANNUS, M.B.; DO CARMO, J.C.C. (orgs.). **Agregados para a construção civil no Brasil: contribuição para formulação de políticas públicas**. Belo horizonte: CETEC. Cap. 1. p.27-73. 2007.
- FRAZÃO, E.B. & FRASCÁ, M.H.B.O. Características tecnológicas de agregados de pedreiras do Estado de São Paulo e proposta de especificação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 10, 2002, Ouro Preto. **Anais...**Ouro Preto: ABGE, 8p.
- GALEMBECK, T.M.B.; WERNICK, E.; ARTUR, A.C. Estruturação, faciologia e petrografia da Intrusão Cabreúva, Complexo Rapakivi Itu, SP. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 2. São Paulo, 1991. **Atas...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, p. 113-120.
- HASUI, Y; TOGNON, A.A.; SOARES, L.; CSORDAS, S.M. Geologia e tectônica da Serra do Japi. **Boletim do Instituto de Geociências**, São Paulo, v. 9, p. 17-24, 1978a.
- HASUI, Y. & OLIVEIRA, M.A.F. Província Mantiqueira – Setor Central. In: ALMEIDA, F F.M. & HASUI, Y. (Coords.). **O Pré-Cambriano do Brasil**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 378p., 1984.
- HASUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R.; BISTRICHI, C.A. Os granitos e granitóides da região de dobramentos sudeste nos estados de São Paulo e Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, XXX, Recife, 1978. **Anais...**Recife: Sociedade Brasileira de Geologia, 1978b, v. 6, p. 2594-2608.
- IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Sugestões de Técnicas e Métodos de Investigação Geológico-geotécnica a ser aplicadas ao longo do traçado do TAV entre as cidades do Rio de Janeiro, São Paulo e Campinas. **Relatório Técnico 115 372-205**, p. 31, 2010.
- ISRM - INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. Commission on testing methods, Suggested

- methods for determining point load strength. *International Journal on Rock Mechanics Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, v. 22, n. 2, 51-60, 1985.
- MACHADO, F.B.; NARDY, A.J.R.; OLIVEIRA, M.A.F. Geologia e aspectos petrológicos das rochas intrusivas e efusivas mesozoicas de parte da borda leste da bacia do Paraná no estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 37, n. 1, p. 64-80, 2007
- MARQUES, L.S. & ERNESTO, M. O magmatismo toleítico da Bacia do Paraná. In: MANTESO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R.; BRITO NEVES, B.B.B. (coords.). **Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. Editora Beca: São Paulo. p. 245-263. 2004.
- MELFI, A.J., PICIRILLO, E.M., NARDI, A.J.R. Generalized geological sketch map of Paraná basin. In: MELFI, A.J., PICIRILLO, E.M. (eds.) **The Mesozoic Flood Volcanism of the Paraná Basin: petrogenetic and geophysical aspects**. São Paulo: Universidade de São Paulo. 3p. 1988.
- PARIZOTTO, J.C.V. **Degradação hidromecânica de rochas brandas silto-argilosas**. São Carlos, 2015. 231p. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- PARIZOTTO, J.C.V; RIBEIRO, R.P.; PARAGUASSÚ, A.B. Rochas brandas: extração e preparação de corpos de prova para estudos geomecânicos. *Anais...Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, Mecânica das Rochas e Engenharia de Rochas para Inovação e Desenvolvimento*. Conferência Especializada ISRM 2016. 8p., 2016.
- REMÉDIO, J.M. **Caracterização tecnológica de agregados para uso como lastro de trem de alta velocidade – trecho Campinas / São Paulo**. São Carlos, 2017. 152p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- SMITH, M.R. & COLLIS, L. **Aggregates – sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes**. Londres: **The Geological Society**. 339p., 1993.
- SQUISATO, E.; NARDY, A.J.R.; MACHADO, F.B.; MARQUES, L.S.; JUNIO, E.R.V.R.; DE OLIVEIRA, M.A.F. Litogeoquímica e aspectos petrogenéticos dos basaltos da província magmática do Paraná na porção centro-norte do estado de São Paulo. *Geociências*, v. 28, n. 1, p. 27-41, 2009.
- TAV BRASIL. Volume 4. Operações Ferroviárias e Tecnologia. Parte 1 – Operações ferroviárias. 2009. Consórcio Halcrow – Sinergia. **Relatório final TAV-HA-OPE-REP-40034-01**. Disp. em: file:///C:/Users/user/Downloads/vol-4-pt-1-operacoes-relatorio-final%20(1).pdf.
- VLACH, S.R.F. **Geologia, petrografia e geocronologia das partes meridional e oriental do Complexo de Morungaba, SP**. São Paulo, 1985, 253p. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.
- WERNICK, E.; HORMANN, P.K.; ARTUR, A.C.; FERREIRA, C.J.; GALEMBECK, T.M.B.; GODOY, A.M.; ANDRADE, F.R.D. Fase, Impulso e Ciclo Magmático em complexo Granitóide Associado à Falha Transcorrente, SP. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 23, n. 3, p. 248-258, 1994.

Submetido em 12 de dezembro de 2016

Aceito em 14 de abril de 2018