

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA**

MARCIO JOSÉ REMÉDIO

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE AGREGADOS PARA USO COMO
LASTRO DE TREM DE ALTA VELOCIDADE – TRECHO CAMPINAS / SÃO
PAULO**

**SÃO CARLOS
2017**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA**

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE AGREGADOS PARA USO COMO LASTRO
DE TREM DE ALTA VELOCIDADE – TRECHO CAMPINAS / SÃO PAULO**

Dissertação apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – USP – como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Pós Graduação em Geotecnia.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Rogério Pinto Ribeiro

**São Carlos
2017**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Remédio, Márcio José
Rc Caracterização tecnológica de agregados para uso
como lastro de trem de alta velocidade - Trecho
Campinas / São Paulo / Márcio José Remédio; orientador
Rogério Pinto Ribeiro. São Carlos, 2017.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2017.

1. trem de alta velocidade. 2. lastro. 3. agregado.
4. alterabilidade. I. Título.

A minha esposa Izabel, pelo apoio incondicional e compreensão pelo tempo que este nos subtraiu e, aos meus pais pelo incentivo de sempre...

Ao Serviço Geológico do Brasil pela oportunidade e apoio...

Agradecimentos

Ao Serviço Geológico do Brasil- SGB/CPRM, pela oportunidade e apoio durante esta jornada, personificado aqui pelo superintendente José Carlos Garcia Ferreira, o Gerente de Relações Institucionais Lauro Gracindo Pizzatto e a todos os funcionários da Superintendência de São Paulo.

Ao amigo e orientador, Dr. Rogério Pinto Ribeiro, pela paciência, disposição, compreensão e motivação, quem adquiri uma grande estima e consideração e que possa ao longo da minha trajetória retribuir a altura.

Ao Professor e amigo Dr. Antenor Braga Paraguassú, pela grande ajuda e incentivo durante todo o curso.

Aos amigos (Técnicos e funcionários) do Departamento de Geotecnia da Universidade de São Paulo; Oscar, Dito, Antônio, Décio, Luiz, Maristela, Álvaro, Erivelton, Toninho e Neiva, pelo apoio e qualidade do trabalho.

Ao meu amigo e colega de trabalho, Luiz Lopes Moreira (GIGI) pela ajuda dispensada durante a execução dos ensaios.

Aos amigos que fiz durante este período, Quaresma, Gerson, João Parizotto, João Curtis, Ayla, Thiago entre outros.

Aos Professores do Departamento de Geotecnia da EESC/USP pela qualidade do ensino.

As empresas mineradoras que disponibilizaram o material e permitiram visitas, que possibilitaram a realização deste.

Enfim, a todos que de alguma maneira contribuíram.

RESUMO

REMÉDIO, M.J. **Caracterização tecnológica de agregados para uso como lastro de trem de alta velocidade – trecho Campinas / São Paulo**. 2017. 152p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

É conhecido que, atualmente, o Brasil possui uma demanda substancial de obras de engenharia, como por exemplo, o Trem de Alta Velocidade (TAV) entre as cidades do Rio de Janeiro e de Campinas, necessárias para suportar as presentes e futuras demandas para o desenvolvimento do país. Este projeto governamental do TAV deverá requerer produção elevada de agregados de alta qualidade para emprego como lastro e também para concreto. No tocante ao uso como lastro, o agregado fica exposto e sujeito à ação constante das intempéries, fazendo com que estudos envolvendo alterabilidade sejam tão importantes quanto os de caracterização geomecânica dos materiais pétreos, levando-se em conta as condições intempéricas típicas de uma zona tropical que estarão submetidos. Estas constatações motivaram investigar as relações entre as propriedades tecnológicas de nove tipos de rochas cristalinas (micro-gabro, gnaisse e variedades de granitos) e suas utilizações como lastro do trecho Campinas/São Paulo do traçado do TAV. Em termo práticos, estas rochas foram submetidas a ensaios físicos, mecânicos e de alterabilidade acelerada, sendo que os testes de ciclagem água-estufa foram conjugados aos ensaios de abrasão Los Angeles, choque Treton e esmagamento. Os resultados indicaram que alguns materiais apresentaram valores de resistência inferiores ou próximos aos limites normatizados para lastros de ferrovia, além da perda de qualidade verificada nos ensaios de resistência à intempérie, inviabilizando ou restringindo a utilização de três dos materiais estudados para lastro. De modo geral, tais informações poderão servir de subsídio aos órgãos governamentais para tomada de decisões, quanto ao emprego dos materiais disponíveis na área onde será construído o TAV brasileiro, uma vez que os custos de manutenção da camada de lastro da ferrovia são críticos quando se opta por uma via lastrada ou em laje.

Palavras-chave: trem de alta velocidade, lastro, agregado, alterabilidade.

ABSTRACT

REMÉDIO, M.J. **Caracterização tecnológica de agregados para uso como lastro de trem de alta velocidade – trecho Campinas / São Paulo**. 2017. 152p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

It is well known that Brazil currently shows a high number of engineering projects that are necessary to the development of the country. The projects include the High-Speed Rail (HSR) that will connect Rio de Janeiro and Campinas cities and requires a great production of high-quality construction aggregates to be used in track ballast and also in concrete. In the case of the track ballast, previous studies about the weathering of the aggregates together with a mechanical characterization are important and have to take in consideration that the material will be submitted to weathering conditions typical of a tropical environment. These assumptions motivated the investigation of the technological properties of nine types of crystalline rocks (microgabbro, gneiss and varied granitic rocks) considering their potential to be used as track ballast in the HSR between Campinas and São Paulo. The rock samples were submitted to physical, mechanical and accelerated weathering tests. The soundness by artificial weathering, drying water were conjugated to the Los Angeles abrasion tests, Treton shock and crushing. The results indicate that some materials present resistance values bellow or near the limit normalized for track ballast, besides the loss of the quality verified in weathering resistance tests, making it impossible or restricting the use of the three studied materials as track ballast.

In general, such information can be used by government agencies to make decisions about the materials available in the area where the brazilian HSR will be built once the maintenance costs of the track ballast are critical to the choice between a track ballast or slab track.

Keywords: High speed Train, ballast, aggregates, accelerated weathering.

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Estrutura das Linhas ferroviárias de Alta velocidade no Leste do Japão compostas simultaneamente por vias convencionais e não convencionais. Modificado de Yokoiama (2011).	34
Tabela 3.2 - Extensão e início de operação de algumas linhas de ferrovias de alta velocidade existentes na Europa. Adaptado de COMMISSION FOR INTEGRATED TRANSPORT – UK (2004).....	35
Tabela 3.3 - Relações entre grau de alteração, porosidade e tipo de alteração/microfissuramento. Modificado de MONTICELI et al. (2016).....	44
Tabela 3.4 - Classificação de lastro segundo dureza Mohs e ALA (RAYMOND, 1979 apud DA SILVA, 2002)	46
Tabela 3.5 - Ensaio e respectivos valores esperados para agregados para uso em lastros ferroviários, segundo a norma NBR-5564 (ABNT, 2014) e recomendações de Frazão (2007).	46
Tabela 3.6 - Ensaio e respectivos resultados esperados para agregados utilizados como lastro de ferrovia, segundo recomendações internacionais da norma EN 13450 (DIN, 2013).....	47
Tabela 3.7 - Resumo de diferentes modelos de regressão que relacionam Is e RCU. Modificado de Al-Harthi (2001).....	51
Tabela 3.8 - Graduações para o ensaio de abrasão Los Angeles; norma NBR NM51 (ABNT, 2001).	53
Tabela 3.9 Número de esferas e de rotações, norma NBR NM 51 (ABNT, 2001).	53
Tabela 4.1 Relação de unidades geológicas, litotipos e locais de amostragem.....	68
Tabela 4.2 - Relação dos ensaios físico-mecânicos e normas técnicas correspondentes.....	69
Tabela 4.3 - Classificação do índice de resistência à compressão puntiforme (BROCH & FRANKLIN, 1972).....	71
Tabela 4.4 - Procedimentos e aberturas para os ensaios Los Angeles, agregado graúdo (lastro de ferrovia).....	74
Tabela 4.5 - Termos adotados na inspeção visual dos CPs. Fonte: NBR 12696 (ABNT, 1992).	77
Tabela 5.1 - Sumário das características petrográficas das rochas estudadas	94

Tabela 5.2 - Dados e resultados de ensaios para determinação da massa específica aparente, da porosidade aparente e da absorção de água do microgabro (Unidade "Intrusivas Básicas").	95
Tabela 5.3 - Dados e resultados de ensaios para determinação da massa específica aparente, da porosidade aparente e da absorção de água de gnaiss do Complexo Varginha Guaxupé.	96
Tabela 5.4 - Dados e resultados de ensaios para determinação da massa específica aparente, da porosidade aparente e da absorção de água de monzogranito fino a médio do Complexo Morungaba.	96
Tabela 5.5 - Dados e resultados de ensaios para determinação da massa específica aparente, da porosidade aparente e da absorção de água do monzogranito grosso do Complexo Itu.	97
Tabela 5.6 - Dados e resultados de ensaios para determinação da massa específica aparente, da porosidade aparente e da absorção de água do biotita monzogranito médio do Granito Terra Nova.	97
Tabela 5.7 - Dados e resultados de ensaios para determinação da massa específica aparente, da porosidade aparente e da absorção de água do biotita sienogranito grosso do Granito Morro do Tico-Tico.	98
Tabela 5.8 - Dados e resultados de ensaios para determinação da massa específica aparente, da porosidade aparente e da absorção de água do muscovita monzogranito grosso do Granito Taipas.	98
Tabela 5.9 - Dados e resultados de ensaios para determinação da massa específica aparente, da porosidade aparente e da absorção de água do sienogranito grosso da Unidade CANTAREIRA OESTE.	99
Tabela 5.10 - Dados e resultados de ensaios para determinação da massa específica aparente, da porosidade aparente e da absorção de água do sienogranito grosso e inequigranular da Unidade CANTAREIRA LESTE.	99
Tabela 5.11 - Quadro resumo dos índices físicos das rochas estudadas.	100
Tabela 5.12 - Valores da resistência à compressão puntiforme I_s50 e estimativas da resistência à compressão uniaxial RCU (Al-HARTHI, 2001)	102
Tabela 5.13 - Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos	103
Tabela 5.14 - Determinação da resistência ao choque dos agregados graúdos	104
Tabela 5.15 - Determinação da perda por abrasão dos agregados graúdos	106

Tabela 5.16 - Determinação dos coeficientes Micro-Deval (MDE) dos agregados graúdos.....	107
Tabela 5.17 - Síntese dos resultados de ensaios mecânicos: carga pontual (Is50), resistências ao esmagamento R, ao impacto Treton T e à abrasão Los Angeles P.....	109
Tabela 5.18 - Dados e resultados de ensaios para determinação da resistência à intempérie Ri40.....	111
Tabela 5.19 - Exame visual das amostras submetidas à ciclagem com imersão em solução de sulfato de sódio e secagem em estufa.	113
Tabela 5.20 - Resultados de perda de massa das amostras referências após 120 ciclos de saturação em água e secagem em estufa.	116
Tabela 5.21 - Valores de abrasão Los Angeles das amostras naturais (PNAT) e cicladas (PCIC).	117
Tabela 5.22 - Valores de resistência ao esmagamento das amostras naturais (RNAT) e cicladas (RCIC).....	119
Tabela 5.23 - Valores de resistência ao choque das amostras naturais (TNAT) e cicladas (TCIC).....	121
Tabela 5.24 - Síntese das determinações das resistências à abrasão Los Angeles P, ao esmagamento R e ao choque (impacto Treton) T e panorama das amostras cicladas frente aos requisitos tecnológicos para lastro de ferrovia.	122

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1-Traçado esquemático do TAV entre as cidades de Rio de Janeiro, São Paulo e Campinas (TAV BRASIL, 2009).	30
Figura 2.2 - Mapa de localização da área de estudo.....	32
Figura 3.1-Comparação entre os custos de implantação e manutenção entre vias convencionais e não convencionais em linhas de Alta Velocidade no Japão. Modificado de Yokoïama (2011).	34
Figura 3.2 - Elementos principais da via permanente. Modificado de KLINCEVICIUS (2011).	39
Figura 3.3 - Descrição microtextural de minerais alterados. Fonte: DELVIGNE (1988) apud MONTICELI et al. (2016).	43
Figura 3.4 - Limites granulométricos para vias principais das normas AREMA (2009) e NBR 5564 (ABNT, 2014). Modificado de KLINCEVICIUS (2011)	49
Figura 3.5 - Curva granulométrica ideal para lastros de ferrovia segundo a norma EN 13450 (DIN, 2013). Adaptado de Paderno (2010).	49
Figura 3.6 - (a) Prensa servo-controlada utilizado na determinação da resistência à compressão uniaxial de rochas. Observar corpo de prova posicionado (seta) para o ensaio; (b) Corpo de prova instrumentado para ensaio de compressão simples: "A" e "B" são, respecti respectivamente, os sensores para determinação dos deslocamentos circunferencial e longitudinal. Modificado de Paraguassú et al. (2014)	50
Figura 3.7 - Correlação entre I_s e RCU (Al-HARTHI, 2001).....	51
Figura 3.8 - (a) Dimensionamento dos dispositivos; (b) Esquema de carregamento para determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos. Modificado de Frazão & Paraguassú (1998).	52
Figura 3.9 - Corte esquemático do tambor do equipamento para ensaio de abrasão Los Angeles. Modificado de Frazão & Paraguassú (1998).	53
Figura 3.10 - Ilustração esquemática do equipamento utilizado nos ensaio de Impacto Treton.....	55
Figura 3.11 - Correlação entre I_s e resistência ao impacto treton (T). Modificado de Al-Harthi (2001).	56
Figura 3.12 - Correlação entre I_s e resistência ao esmagamento (RE). Modificado de Al-Harthi (2001).	56

Figura 3.13 - Correlação entre I_s e perda por abrasão los Angeles (P). Modificado de Al-Harhi (2001).	56
Figura 3.14 - Equipamento utilizado no Ensaio Micro-Deval. (Dias Filho, 2012).....	58
Figura 3.15 - Estabilidade de alguns minerais comuns em comparação às séries de Bowen. Adaptado de Gass et al. (1979).....	59
Figura 3.16 - Representação dos tipos de defeitos cristalinos. Modificado de Lasaga (1990).....	60
Figura 3.17 - Esquema ilustrativo de ensaios de alteração acelerada: (a) Recipientes telados com as amostras a serem submetidas à saturação em água e (b) Amostras saturadas a serem colocadas em estufa; (c) Extrator "Soxhlet" para ensaios de lixiviação contínua. Laboratório de Geologia de Engenharia do Departamento de Geotecnia da EESC/USP. Fonte: Paraguassú et al. (2014).	64
Figura 3.18 - Equipamento existente no Laboratório de Geologia de Engenharia da EESC/USP para realização do ensaio de desgaste a úmido. Foto do autor.	65
Figura 4.1 - (a, b) Amostragem de brita de graduações variadas; (c) Acondicionamento e transporte das amostras em etapas distintas de campo.	67
Figura 4.2 - (a) Equipamento simples e portátil utilizado na determinação da resistência à compressão puntiforme; (b) Observar ponteiros cônicos em contato com corpo de prova (amostra irregular) de rocha. Laboratório de Geologia de Engenharia do Departamento de Ge Geotecnia da EESC/USP.....	71
Figura 4.3 - (a) Cilindro de aço com amostra sendo submetido à compressão em prensa servo-controlada; (b) aspecto da amostra após o ensaio de esmagamento. Laboratórios de Mecânica das Rochas do Departamento de Geotecnia da EESC/USP. Detalhes do equipamento encontram-se descritos no item 3.4.3	72
Figura 4.4 - (a) Equipamento Treton; (b) e (c) Detalhes exibindo, respectivamente, conjunto de amostras antes e depois dos impactos do soquete. Laboratório de Geologia de Engenharia do Departamento de Geotecnia da EESC/USP.....	73

- Figura 4.5 - Procedimentos para preparação das amostras (graduação F) para determinação da resistência à Abrasão Los Angeles: (a,b) Pesagem das alíquotas com granulometria 50,8-38,1mm e 38,1-25mm, respectivamente; (c) Equipamento de ensaio e (d) Fração de alguns dos materiais ensaiados passante na #1,9mm. Laboratórios de Geologia de Engenharia do Departamento de Geotecnia e de Estradas do Departamento de Engenharia de Transporte da EESC/USP..... 74
- Figura 4.6 - Equipamento para ensaios de durabilidade e Micro-Deval - Laboratório de Engenharia Civil do Centro de Ciência e Tecnologia (LECIV/CCT) da UENF. Fonte: Costa et al. (2016)..... 75
- Figura 4.7 - (a) Acessórios e insumos (becker, reagente, espatula/colher, densímetro, termômetro) utilizados na preparação e monitoramento da solução de sulfato de sódio; (c) Recipientes com amostras das rochas imersas em solução de sulfato de sódio. Laboratório de Química Ambiental (LQA) do Instituto de Química de São Carlos (IQSC/USP)..... 76
- Figura 4.8 - (a) Conjunto das amostras submetidas à imersão em água e (b) secagem em estufa a 100°C. Laboratório da CPRM/Araraquara..... 78
- Figura 5.1 - (a) Vista panorâmica parcial de bancada de cava em desenvolvimento. Observar a homogeneidade do maciço representativo da Unidade "Intrusivas básicas", região de Paulínia; (b) Aspecto macroscópico e (c) Fotomicrografia (nicóis cruzados) do micro gabro explotado na pedreira, exibindo baixo grau de alteração (sericitização e/ou saussuritização). 80
- Figura 5.2 - (a) Vista panorâmica parcial de pedreira em operação no Complexo Varginha Guaxupé, região de Campinas; (b) Detalhe em bancada exibindo maciço rochoso com notável bandamento gnáissico sub-vertical; (c) Aspecto macroscópico e (d) Fotomicrografia (nicóis cruzados) dos gnaisses explotados, exibindo baixo grau de alteração (sericitização e/ou saussuritização) dos minerais feldspáticos. 82
- Figura 5.3 - (a) Vista panorâmica da frente de lavra em operação no Complexo Morungaba, município de Valinhos, (b) Aspecto macroscópico e (c) fotomicrografia (nicóis cruzados) dos monzogranitos explotados na pedreira, exibindo arranjo equidimensional dos minerais e baixo grau de alteração dos feldspatos..... 83

- Figura 5.4 - (a) Vista panorâmica parcial de frente de lavra em operação no Complexo Itu, município de Valinhos; (b) Coleta de amostras nas pilhas de britagem.85
- Figura 5.5 - (a) Aspecto macroscópico das rochas explotadas no Complexo Itu; (b,c) Fotomicrografias (nicóis cruzados e paralelos, respectivamente) do monzogranito exibindo granulação grossa dos minerais e alteração intempérica mais pronunciada nos feldspatos.85
- Figura 5.6 - (a) Vista panorâmica parcial de frente de lavra em operação no Granito Terra Nova, município de Jundiaí; (b) Coleta de amostras na pilha de brita 3; (c) Detalhe macroscópico exibindo aspecto equigranular e (d) Fotomicrografia (nicóis cruzados) do biotita monzogranito exibindo granulação média dos minerais e alteração intempérica pouco pronunciada nos feldspatos.86
- Figura 5.7 (a) Vista panorâmica parcial de frente de lavra em operação no Granito Tico Tico, município de Caieiras. (b) Detalhe macroscópico e (c) Fotomicrografia (nicóis cruzados) do biotita sienogranito explotado na pedreira, exibindo granulação grossa dos minerais e alteração intempérica mais pronunciada nos feldspatos.87
- Figura 5.8 - (a) Vista panorâmica parcial da pedreira visitada no Granito Taipas, município de São Paulo; (b) Detalhe macroscópico e (c) Fotomicrografia (nicóis cruzados) do biotita monzogranito. Observar cristalinidade do microclínio, evidenciando baixo grau de alteração, bem como caráter inequigranular da rocha89
- Figura 5.9 - (a) Vista panorâmica parcial da frente de lavra e (b) da planta de britagem da pedreira CANTAREIRA OESTE. Em (c) vista mostrando desenvolvimento e operação de uma das frentes de lavra da CANTAREIRA LESTE.90
- Figura 5.10 - (a) Aspecto macroscópico e (b) Fotomicrografia (nicóis cruzados) do biotita granito "CANTAREIRA OESTE", (c) Aspecto macroscópico e (d) Fotomicrografia (nicóis cruzados) do biotita granito "CANTAREIRA LESTE". Notar alteração mais intensa e aspecto poiquilítico (saussuritização) nos cristais de plagioclásio e sericitização dos feldspatos alcalinos..... 91
- Figura 5.11 - Classificação das rochas estudadas segundo Streckeisen (1976): 1 Intrusivas básicas, 2: Complexo Varginha Guaxupé, 3: Granito

Morungaba, 4: Granito Itu, 5: Granito Terra Nova, 6: Granito Taipas, 7: Granito Cantareira Oeste, 8-CAN-L- Granito Cantareira Leste, 9-TIC- Granito Tico-Tico. 92

Figura 5.12 - Resultados dos ensaios de índices físicos. Legenda: Rochas – idem Tabela 5.10; ρ_a : massa específica aparente; η_a : porosidade aparente; a_a : absorção de água. Em tracejados os limites recomendados pela norma NBR 5564 (ABNT, 2011). 101

Figura 5.13 - Correlação entre I_s e RCU (Al-HARTHI, 2001): Tracejado em azul indicam a faixa de variação dos valores de I_s e, no tracejado em vermelho, os respectivos intervalos de variação estimados para valores mínimo, médio e máximo de RCU das rochas estudadas na presente pesquisa. 102

Figura 5.14 - Resultados dos ensaios de resistência do agregado ao esmagamento (R). Legenda: BAS- Intrusivas básicas, CVG- Complexo Varginha Guaxupé, MOR- Granito Morungaba, ITU- Granito Itu, TNO- Granito Terra Nova, TIC- Granito Tico-Tico, TAI- Granito Taipas, CAN-O- Granito Cantareira Oeste, CAN-L- Granito Cantareira Leste. Linha tracejada em vermelho indica o valor máximo sugerido pela norma SABS 1083 (2006). 103

Figura 5.15 - – Resultados dos ensaios de tenacidade Treton "T". Legenda: BAS- Intrusivas básicas, CVG- Complexo Varginha Guaxupé, MOR- Granito Morungaba, ITU- Granito Itu, TNO- Granito Terra Nova, TIC- Granito Tico-Tico, TAI- Granito Taipas, CAN-O- Granito Cantareira Oeste, CAN-L- Granito Cantareira Leste. Linha tracejada em vermelho indica o valor máximo recomendado pela norma NBR 5564 (ABNT, 2014). 105

Figura 5.16 - – Resultados dos ensaios de abrasão Los Angeles. Legenda: BAS- Intrusivas básicas, CVG- Complexo Varginha Guaxupé, MOR- Granito Morungaba, ITU- Granito Itu, TNO- Granito Terra Nova, TIC- Granito Tico-Tico, TAI- Granito Taipas, CAN-O- Granito Cantareira Oeste, CAN-L- Granito Cantareira Leste. Linhas tracejadas em vermelho e azul indicam os valores máximos de perda por abrasão "P" recomendados pelas normas NBR 5564 (ABNT, 2011) e EN 13450 (DIN, 2013), respectivamente. 107

Figura 5.17 - Resultados dos ensaios de abrasão Los Angeles P(%) e Micro-Deval (MDE). Legenda: BAS- Intrusivas básicas, CVG- Complexo Varginha Guaxupé, MOR- Granito Morungaba, ITU- Granito Itu, TNO- Granito Terra

<p>Nova, TIC- Granito Tico-Tico, TAI- Granito Taipas, CAN-0- Granito Cantareira Oeste, CAN-L- Granito Cantareira Leste. Linhas tracejadas em vermelho indicam os valor máximo do coeficiente Micro-Deval (MDE) recomendado para lastro pela norma EN 13450 (DIN, 2013).....</p>	108
<p>Figura 5.18 - Resultados dos ensaios de resistência a intempérie (Ri40) frente aos limites preconizados na norma EN 13450 (DIN, 2013) e NBR 5564 (ABNT, 2014).</p>	111
<p>Figura 5.19 - 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°, (b), (d) e (f,g) com respectivos detalhes.</p>	115
<p>Figura 5.20 - Resultados dos ensaios de resistência a abrasão Los Angeles das amostras naturais (PNAT) e cicladas (PCIC), com limites máximos recomendados pelas normas EN 13450 (DIN, 2013) e NBR 5564 (ABNT, 2014).</p>	118
<p>Figura 5.21 - Correlação entre os valores de perda por abrasão das amostras naturais (PNAT) e cicladas (PCIC).....</p>	119
<p>Figura 5.22 - Resultados dos ensaios de resistência ao esmagamento das amostras naturais (RNAT) e cicladas (RCIC), com limites máximos recomendados pela norma SABS 1083 (2013).</p>	120
<p>Figura 5.23 Resultados dos ensaios de resistência ao choque Treton das amostras naturais (TNAT) e cicladas (TCIC), com limites máximos recomendados pela norma NBR-5564 (ABNT, 2014).</p>	121

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADIF	Administrador de Infraestructuras Ferroviarias da Espanha
ALA	Abrasão Los Angeles
ARMA	American Rock Mechanics Association
ASTM	American Society for Testing and Materials
CP	Corpo(s) de Prova / Amostra Compressão Simples
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
CRH	China Railway High-Speed
DNPM	Departamento Nacional de Pesquisas Minerais
DRX	Difração de Raios-X
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EN	European Standards
GTR	Grupo Tecnologia de Rochas EESC/USP
IFSC	Instituto de Física
IG	Instituto de Geociências e Instituto Geológico de São Paulo
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
IQ/SC	Instituto de Química de São Carlos
ISRM	International Society for Rock Mechanics
ISSMFE	International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering
KTX	Korea Train Express
LGA	Laboratório de Química Ambiental
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
PVC	Policloreto de vinila
RCU	Resistência à Compressão Uniaxial
SABS	South African Bureau of Standards
TAV	Trem de Alta Velocidade
TGV	Train à Grand Vitesse
UCS	Unconfined/Uniaxial Compressive Strength
UENF	Universidade Estadual Norte Fluminense
UIC	International Union Railways
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Grau Celsius
aa	Absorção D'água
BAS	Unidade Geológica Intrusivas básicas
bt	biotita
CAN-L	Unidade Geológica Granito Cantareira Leste
CAN-O	Unidade Geológica Granito Cantareira Oeste
CP	Corpo (s) de Prova
CVG	Unidade Geológica Complexo Varginha Guaxupé
E	energia de ativação
g	unidade de medida - grama (s)
hb	hornblenda
I50	Valor de resistência à compressão puntiforme corrigido
ITU	Unidade Geológica Complexo Itu
K	constante dado pela Lei de Arrhenius
m0 (g)	Massa Inicial ensaio Micro deval
m1 (g)	massa de material retida na peneira 1,7mm
MDE	Coeficiente MicroDeval
Mf	Massa Final
mf (g)	Massa final ensaio Micro deval
Mf10	Massa Final ciclo 10
Mf20	Massa Final ciclo 20
Mf30	Massa Final ciclo 30
Mf40	Massa Final ciclo 40
Mi	Massa Inicia
mm	unidade de medida - milímetro (s)
mnat	Massa natural
Mpa	Unidade de medida Mega Pascal
MOR	Unidade Geológica Granito Morungaba
ms	muscovita
msat	Massa saturada
msec	Massa seca
msub	Massa submersa
P (%)	Perda de Massa Pelo Ensaio de Abrasão Los Angeles
PCIC(%)	Valores de abrasão Los Angeles das amostras Cicladas
pl	plagioclásio
PM	Perda de Massa Ciclagem Agua Estufa
PNAT (%)	Valores de abrasão Los Angeles das amostras Naturais
qz	quartzo
R	Constante universal do gás
R (%)	Resistência ao Esmagamento
R ²	Coeficiente de Determinação
RCIC(%)	Valores de resistência ao esmagamento das amostras cicladas

RCU	Resistência a compressão Uniaxial
Ri10	Resistência a Intempérie Ciclo 10
Ri20	Resistência a Intempérie Ciclo 20
Ri30	Resistência a Intempérie Ciclo 30
Ri40	Resistência a Intempérie Ciclo 40
Rm (%)	Média da Resistência ao Esmagamento
RNAT (%)	Valores de resistência ao esmagamento das amostras naturais
T	Temperatura
T (%)	Resistência ao choque
TAI	Unidade Geológica Granito Taipas
TCIC (%)	Valores de resistência ao choque das amostras cicladas
TIC	Unidade Geológica Granito Morro do Tico Tico
Tm (%)	Média de Resistência ao Choque
TNAT (%)	Valores de resistência ao choque das amostras naturais
TNO	Unidade Geológica Granito Terra Nova
η_a	Porosidade Aparente
ρ_a	Massa Específica

INDICE

1. INTRODUÇÃO	25
1.1 JUSTIFICATIVAS.....	26
1.2 OBJETIVOS.....	29
2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA	30
2.1 TRAÇADO DO TAV	30
2.2 ÁREA DE INTERESSE.....	30
2.2.1 ROCHAS MAGMÁTICAS BÁSICAS	31
2.2.2 MIGMATITOS.....	31
2.2.3 ROCHAS GRANÍTICAS	31
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
3.1 O LASTRO NA ENGENHARIA DAS FERROVIAS DE ALTA VELOCIDADE.....	33
3.2 LINHAS FÉRREAS DE ALTA VELOCIDADE NO MUNDO	34
3.2.1 JAPÃO.....	34
3.2.2 ALEMANHA	35
3.2.3 FRANÇA	35
3.2.4 ESPANHA.....	36
3.2.5 ITÁLIA	36
3.2.6 CORÉIA DO SUL	36
3.2.7 CHINA	36
3.2.8 TAV NO BRASIL	37
3.3 AGREGADOS PARA LASTRO	38
3.3.1 BREVE HISTÓRICO.....	38
3.3.2 ASPECTOS GERAIS	39
3.4 PETROGRAFIA	42
3.5 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO LASTRO	44
3.5.1 GRANULOMETRIA E FORMA	48
3.5.2 COMPRESSÃO UNIAXIAL.....	50
3.5.3 ESMAGAMENTO.....	51
3.5.4 ABRASÃO LOS ANGELES	52
3.5.5 IMPACTO TRETON	54

3.5.6	MICRO-DEVAL	57
3.6	ALTERAÇÃO E ALTERABILIDADE DO AGREGADO	58
3.6.1	ÍNDICES DE ALTERABILIDADE	62
3.6.2	ENSAIOS DE ALTERABILIDADE	63
4	MATERIAIS E MÉTODOS	66
4.1	COMPILAÇÃO DE DADOS E INFORMAÇÕES GEOLÓGICAS	66
4.2	ATIVIDADES DE CAMPO E AMOSTRAGEM	67
4.3	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	68
4.3.1	ANÁLISE PETROGRÁFICA	68
4.3.2	ENSAIOS FÍSICO-MECÂNICOS	69
4.3.2.1	Massa específica aparente, porosidade aparente e da absorção de água. 70	
4.3.2.2	Resistência à carga puntiforme.....	70
4.3.2.3	Resistência ao esmagamento.....	71
4.3.2.4	Resistência ao choque	72
4.3.2.5	Abrasão Los Angeles	73
4.3.2.6	Ensaio de abrasão "Micro-Deval"	74
4.3.3	ENSAIOS DE ALTERAÇÃO ACELERADA	75
4.3.3.1	Determinação da resistência à intempérie	76
4.3.3.2	Saturação em água e secagem em estufa	77
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	79
5.1	CONTEXTO GEOLÓGICO E PETROGRAFIA DAS ROCHAS ESTUDADAS	79
5.1.1	INTRUSIVAS BÁSICAS	79
5.1.2	COMPLEXO VARGINHA-GUAXUPÉ	81
5.1.3	COMPLEXO MORUNGABA	82
5.1.4	COMPLEXO ITU	84
5.1.5	GRANITO TERRA NOVA	86
5.1.6	GRANITO MORRO DO TICO-TICO	87
5.1.7	GRANITO TAIPAS	88
5.1.8	GRANITO CANTAREIRA	89
5.1.9	SÍNTESE DAS ANÁLISES PETROGRÁFICAS	92
5.2	ÍNDICES FÍSICOS.....	95
5.2.1	INTRUSIVAS BÁSICAS	95
5.2.2	COMPLEXO VARGINHA-GUAXUPÉ	95
5.2.3	COMPLEXO MORUNGABA	96

5.2.4	COMPLEXO ITU	97
5.2.5	GRANITO TERRA NOVA	97
5.2.6	GRANITO MORRO DO TICO-TICO	98
5.2.7	GRANITO TAIPAS	98
5.2.8	GRANITO CANTAREIRA	99
5.2.9	SÍNTESE DOS INDICES FISICOS	100
5.3	ENSAIOS MECÂNICOS	101
5.3.1	RESISTÊNCIA À CARGA PONTUAL	101
5.3.2	RESISTÊNCIA AO ESMAGAMENTO	102
5.3.3	RESISTÊNCIA AO CHOQUE	104
5.3.4	ENSAIOS DE ABRASÃO LOS ANGELES	105
5.3.5	MICRODEVAL	107
5.3.6	SÍNTESE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS	108
5.4	ENSAIOS DE ALTERAÇÃO ACELERADA	110
5.4.1	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À INTEMPÉRIE	110
5.4.2	SATURAÇÃO EM ÁGUA E SECAGEM EM ESTUFA	116
5.5	AVALIAÇÃO COMPARATIVA DOS RESULTADOS DE ENSAIOS POR SATURAÇÃO EM AGUA/SECAGEM CONJUGADOS A ENSAIOS MECÂNICOS	116
5.5.1	RESISTÊNCIAS À ABRASAO LOS ANGELES DE AMOSTRAS NATURAIS E CICLADAS (P_{NAT} E P_{CIC})	117
5.5.2	RESISTÊNCIAS AO ESMAGAMENTO DE AMOSTRAS NATURAIS E CICLADAS (R_{NAT} E R_{CIC})	119
5.5.3	RESISTÊNCIAS AO CHOQUE DE AMOSTRAS NATURAIS E CICLADAS (T_{NAT} E T_{CIC}) 120	
5.5.4	SÍNTESE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ALTERAÇÃO ACELERADA	122
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	124
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126

1. INTRODUÇÃO

O transporte ferroviário de passageiros, ao longo do tempo, foi modernizado, não só em relação ao tipo de veículo que trafega nas vias, mas também as próprias vias tiveram suas melhorias. O desenvolvimento tecnológico de trens e vias destinados ao transporte de passageiros, culmina com o seu modelo mais interessante e eficiente, os Trens de Alta Velocidade que, neste trabalho, serão tratados com a sigla TAV.

De acordo com relatório de TAV BRASIL (2009), não existe uma única definição aceita sobre o que constitui uma ferrovia de alta velocidade, mas geralmente se refere a trens operando a mais de 200 km/h, sendo mais adequados para cidades onde a distância entre elas é menor que 500km a 600km; acima desta distância a viagem aérea torna-se competitiva.

Os TAV são um meio de transporte com qualidade reconhecida há décadas em outros países e que, poderá, futuramente compor a matriz de transporte brasileira. Aliado ao fato de que esta obra de engenharia deverá requerer produção elevada de agregados para emprego como lastro e também para concreto. Estas constatações motivaram o estudo das relações entre as propriedades tecnológicas das rochas e suas utilizações como agregado para lastros (microgabro, migmatito e rochas granitóides) no trecho entre Campinas/São Paulo desta importante obra que visa ampliar a infraestrutura brasileira em transportes.

A grande exigência em qualidade deste transporte, bem como a economicidade do modelo construtivo e de manutenção, leva a necessidade de conhecer profundamente cada elemento da via, neste caso o lastro, objeto deste estudo, que é a camada resiliente formada por material granular com diversas funções além de suportar os dormentes.

Uma ferrovia do tipo convencional é constituída por vários elementos como trilhos, dormentes, lastro, sub-lastro e fundação, os quais compõem a então conhecida via permanente. Objeto deste estudo, o lastro é um dos principais elementos, por assegurar durabilidade, segurança e conforto à via permanente, desde que atenda à uma criteriosa seleção para uso.

As primeiras ferrovias não utilizavam lastro para suportar os dormentes, de maneira que os problemas decorrentes dessa falha no processo construtivo era um

dos principais causadores de problemas à via. Quando descoberta a necessidade de se ter uma base composta por material granulado (lastro) os problemas foram minimizados. No entanto, o material utilizado não sofria qualquer seleção e se deteriorava rapidamente, exigindo a recomposição do material e ou até mesmo a substituição em pequenos intervalos de tempo.

Devido ao custo e periodicidade em que eram feitas as intervenções, decidiu-se buscar materiais de melhor qualidade para compor o lastro e a melhor opção encontrada foi a utilização de rocha britada. No entanto, nem toda rocha britada apresenta qualidade adequada para tal utilização, deve-se fazer uma seleção dentre os materiais naturais disponíveis com base em normas técnicas.

Portanto, como em toda indústria de qualidade, a ferroviária necessitava de melhores resultados, incluindo o custo de manutenção, assim os agregados usados como lastro passaram a ser estudados de maneira a caracterizar o material em função da sua capacidade de receber cargas. Alguns materiais se mostram excelentes para tais solicitações porém, devido as intempéries, eles sofrem alteração e, conseqüentemente, perdem suas propriedades originais. Sendo assim, há a necessidade de caracterização do material em função da sua resposta à intempérie que sofrerá em uma determinada posição geográfica. No caso em estudo trata-se de uma região tropical.

Neste estudo foram caracterizados nove litotipos em função da sua capacidade de receber esforços físicos por meio de ensaios mecânicos e de resistência a intempérie por ciclos de envelhecimento artificial. Os materiais rochosos foram estrategicamente selecionados a partir de pedreiras em atividade que produzem agregado com demanda comercial notadamente para concreto e pavimentação, considerando a proximidade ao traçado hipotético do TAV brasileiro, no trecho Campinas/São Paulo.

1.1 JUSTIFICATIVAS

Os agregados rochosos são usados no concreto nas várias obras de engenharia, mas o seu principal uso em ferrovias é na constituição do lastro, objeto deste estudo. Neste tipo de aplicação, o agregado (lastro) fica exposto e sujeito à ação constante de intempéries, fazendo com que estudos envolvendo alterabilidade sejam tão importantes quanto os de caracterização geomecânica dos materiais pétreos.

Na atual conjuntura, o Brasil possui uma demanda substancial de obras de engenharia, como por exemplo, o TAV entre as cidades do Rio de Janeiro e de Campinas, as ampliações e construções de novos aeroportos, incrementos das malhas rodoviária e ferroviária, estabilidade de encosta em áreas urbanas de risco, etc., necessárias para suportar as presentes e futuras demandas para o desenvolvimento do país.

No tocante ao TAV, há a necessidade da caracterização do material que será usado como lastro, uma vez que a solicitação deste tipo de veículo é muito grande, devido à velocidade desempenhada, fazendo com que as freqüências de manutenção destas vias possam ser minimizadas com a utilização de material mais adequado tecnológica e logisticamente.

Vários países investiram em serviços ferroviários de alta velocidade, sendo a China, o Japão e a França os maiores proponentes. A Europa continua desenvolvendo uma extensa rede ferroviária de alta velocidade, com muitos milhares de quilômetros de via atualmente em operação, com velocidades comerciais variando de 300 km/h a 330 km/h, sendo 300 km/h a velocidade mais comum. A linha recém concluída entre Madrid e Barcelona tem potencial para operar a uma velocidade maior que 350 km/h.

Ainda segundo informações de TAV BRASIL (2009), são listadas abaixo algumas das principais características da ferrovia de alta velocidade, que motivaram o governo brasileiro na tentativa de implantação deste sistema de transporte no país:

- Tempos de viagem de centro a centro das cidades competitivos quando comparados a aéreo, conseguidos por operação a alta velocidade;
- Capacidade do trem muito alta, com entre 450 e 750 assentos, dependendo da configuração e comprimento;
- Novos traçados, separados e dedicados, inteiramente nivelados, operacionalmente independentes das existentes infra-estruturas ferroviárias convencionais, na maioria dos casos;
- Serviços freqüentes no mesmo horário de cada hora, com paradas limitadas em estações para atingir tempos competitivos de viagens;
- Altos níveis de conforto de passageiros, inclusive classes executiva e econômica e serviços de alimentação;
- Alto desempenho e pontualidade;

- Estações convenientemente localizadas, frequentemente com melhor acessibilidade quando comparadas com aeroportos e;
- Quanto aos métodos construtivos, podem ser de dois tipos: via lastrada, que é a mais comumente utilizada e via em laje, que consiste na construção de um pavimento sólido de concreto onde são assentados os trilhos.

A base fundamental de qualquer sistema ferroviário é a sua infra-estrutura subterrânea e viária. Projetos bem elaborados e uma execução da obra orientada para a qualidade otimizam a performance, tanto de trens de alta velocidade como de linhas de uso misto, redes de metrô ou trens urbanos. Infra-estruturas inteligentes nas linhas e estações, boa acessibilidade e qualidade de transporte duradoura são fatores decisivos para atender à demanda de modo sustentável, com conforto suficiente para os passageiros e uma operação eficiente e econômica (SSF INGENIUERE, 2014).

Dados do portfólio digital de SSF Ingeniuere (2014), empresa europeia de engenharia que trabalha, entre outros, com ferrovias de alta performance, mostram que geralmente o custo de manutenção em uma linha cuja velocidade de tráfego é de 250 até 300 km/h é o dobro do custo de um trecho com velocidade de tráfego de 160 até 200 km/h. A troca do lastro nestes trechos torna-se necessário após aproximadamente 300 milhões de toneladas de carga (Lt = soma das cargas dos eixos) ao invés de após um bilhão de toneladas de carga, como era usual anteriormente. Isto mostra a necessidade de se conhecer as características deste material, as quais deverão ser mantidas inalteradas o maior tempo possível refletindo em menor exigência de manutenção.

No caso da obra do TAV brasileiro, são esperados investimentos governamentais de grande monta e prevê-se um grande impacto social. Apesar do projeto estar paralisado em função de entraves licitatórios e dificuldades econômicas, trata-se de um meio de transporte com qualidade reconhecida há mais de décadas em outros países, com perspectivas de ser projetado e construído pela primeira vez no Brasil. Vale lembrar que a China e a Inglaterra estão investindo fortemente neste tipo de transporte.

Com base nos estudos desenvolvidos pela CPRM (2009), 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 para emprego como lastro e também para

concreto, uma vez que existe também a necessidade de dormentes monoblocos mais densos, bem como obras de arte diversas.

A demanda existente e as intenções governamentais e da indústria em alavancar investimentos no transporte ferroviário no sentido de ampliar a infraestrutura brasileira em transportes motivaram a retomada de estudos de caracterização de agregados para uso em lastros de ferrovia, dando continuidade à pesquisas que há mais de três décadas vêm sendo desenvolvidos sobre materiais pétreos para construção civil pelo Grupo de Tecnologia de Rochas (GTR) da Área de Pós-Graduação em Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal dessa dissertação é investigar as relações entre as propriedades tecnológicas de rochas cristalinas (microgabro, migmatito e granitóides) e suas utilizações como agregados para lastros do trecho Campinas/São Paulo do traçado do TAV. Foram testadas amostras de agregados coletadas, representativamente, no ciclo produtivo de pedreiras existentes (ativas) no referido trecho, definindo-se parâmetros petrográficos e propriedades (físicas e mecânicas) em estado natural e suas evoluções por meio de ciclos de envelhecimento artificial (ciclagem água e estufa e saturação em solução de sulfato de sódio e secagem em estufa).

Como resultado desta pesquisa experimental prevê-se estabelecer comparações entre a qualidade e durabilidade dos agregados rochosos para uso em lastros, visando conhecer ou indicar o material tecnologicamente mais adequado para esta finalidade. Tais informações poderão servir de subsídio aos órgãos governamentais para tomada de decisões, podendo ser um fator relevante na escolha do tipo de via a ser empregada no TAV Campinas-Rio de Janeiro.

2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

2.1 TRAÇADO DO TAV

O Trem de Alta Velocidade ou TAV conectará as cidades do Rio de Janeiro e Campinas, e objetiva servir de elo de ligação entre os principais aeroportos do Brasil (Viracopos, Cumbica e Galeão) e grandes centros urbanos (Figura 2.1).



Figura 2.1-Traçado esquemático do TAV entre as cidades de Rio de Janeiro, São Paulo e Campinas (TAV BRASIL, 2009).

Devido a sua elevada velocidade (média de 300 km/h), o tempo estimado para percorrer a distância total de 511km entre Rio de Janeiro a Campinas será em torno de 2:30hs. O projeto apresenta algumas especificações, como por exemplo pequenos gradientes da ferrovia, máximo de 3,5% e curvas suaves, de grande curvatura (testas curvas de raio 9.000, 7.228 e 5.603m), e plataformas capazes de acomodar trens de 400 m de comprimento (TAV BRASIL, 2009).

2.2 ÁREA DE INTERESSE

De acordo com o traçado desenvolvido para o TAV (TAV BRASIL, 2009), a área do presente estudo está inserida no trecho Campinas – São Paulo (Figura 2.2), tendo sido selecionada em função da geologia da área em termos de ocorrência de materiais (microgabro, migmatito e granitos) adequados para uso como agregados, além da logística e viabilidade de coleta de amostras em campo.

No tocante à caracterização tecnológica de rochas visando aplicação como agregados para concreto (dormentes) e em lastros de ferrovia, o traçado do TAV no trecho Campinas- São Paulo passa por diversas unidades geológicas

bastante conhecidas, com base nas informações e mapas compilados de CPRM (2009), sendo que oito delas foram identificadas e selecionadas como as mais apropriadas quanto à empregabilidade para uso como agregado, resumidamente descritas a seguir.

2.2.1 ROCHAS MAGMÁTICAS BÁSICAS

Esta unidade inclui basaltos e sills/diques de diabásios da Formação Serra Geral que ocorrem expostos, principalmente em taludes de três pedreiras (uma encontra-se ativa) na região periurbana de Campinas.

2.2.2 MIGMATITOS

Esta unidade compreende granitóides foliados, anatexitos, gnaisses e migmatitos. Consistem em rochas fortemente anisotrópicas com foliação e estruturas tectônicas marcantes.

2.2.3 ROCHAS GRANÍTICAS

Esta unidade engloba diversos tipos de granitos e granitóides, incluindo as seguintes unidades:

- Complexo Granítico Morungaba: biotita granito, monzogranito, quartzo diorito, quartzo monzonito (uma pedreira ativa na região de Indaiatuba);
- Granito Itu: monzogranito, granito, sienogranito (duas pedreiras ativas e várias áreas de extração de blocos/paralelepípedos na região de Itupeva/Itu);
- Granito Terra Nova: biotita granito (uma pedreira ativa na região de Jundiá);
- Granito Tico-Tico: biotita granito (duas pedreiras ativas na região de Caieiras);
- Granito Taipas: monzogranito, biotita monzogranito (duas pedreiras ativas na região de Caieiras)
- Granito Cantareira: granito, granodiorito, monzogranito e granitóides indiferenciados (várias pedreiras ativas na região de Mairiporã).

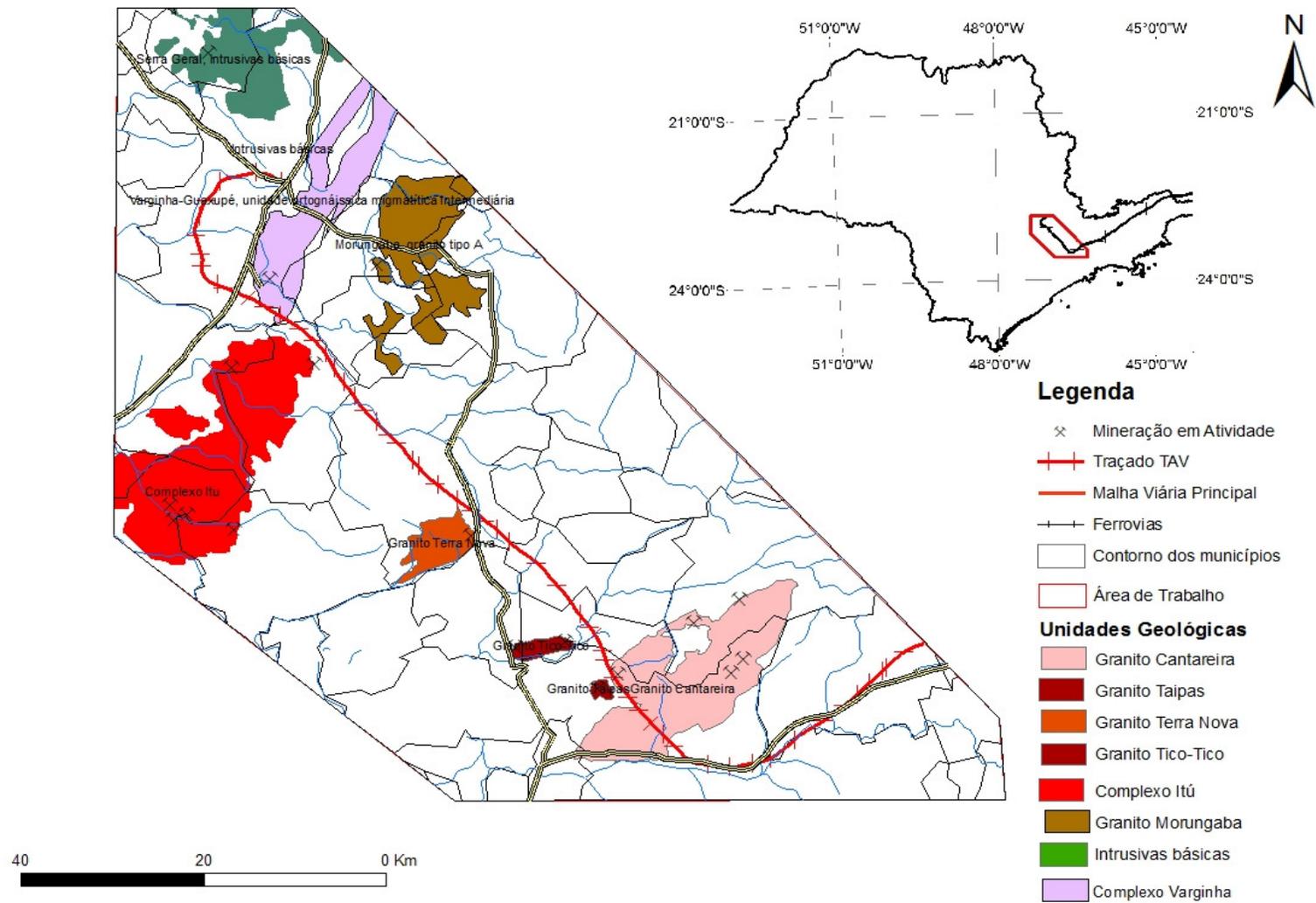


Figura 2.2 - Mapa de localização da área de estudo

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O LASTRO NA ENGENHARIA DAS FERROVIAS DE ALTA VELOCIDADE

Os métodos construtivos para ferrovias de alta velocidade podem ser de dois tipos (TAV BRASIL, 2009):

- Via Lastrada: que é mais comum e utilizada, constituída por camada de material pétreo dispostas e compactadas sob a linha férrea construída. Geralmente esse material é obtido por britagem e
- Via em Laje: consiste na construção de um pavimento sólido de concreto onde são assentados os trilhos.

Deve-se levar em conta que existem prós e contras à construção deste tipo de linha férrea por meio de via lastrada. De maneira sucinta, entende-se que a construção de uma via lastrada é mais barata que a construção de uma via em laje, no entanto a manutenção da via lastrada tende a ser mais dificultosa e onerosa que a outra. Por outro lado, a via do tipo laje gera maior ruído devido à sua rigidez e à baixa absorção das vibrações promovidas pelos trens.

Estudos apresentados por YOKOIAMA (2011) comprovam a melhor relação custo benefício em função do tempo, para vias não convencionais, ou seja, vias sem lastro (Figura 3.1). No entanto pode-se notar ainda neste trabalho que a maioria destas ferrovias não convencionais tem em parte de seu trajeto, trechos construídos por vias lastradas (Tabela 3.1). Assim torna-se necessário o estudo, independente de qual método for preferencialmente utilizado, uma vez que se fará uso do material pétreo na construção destas ferrovias. Porém estas informações devem ser tratadas com cuidado, já que não incluem as receitas geradas durante o tempo de operação da linha.

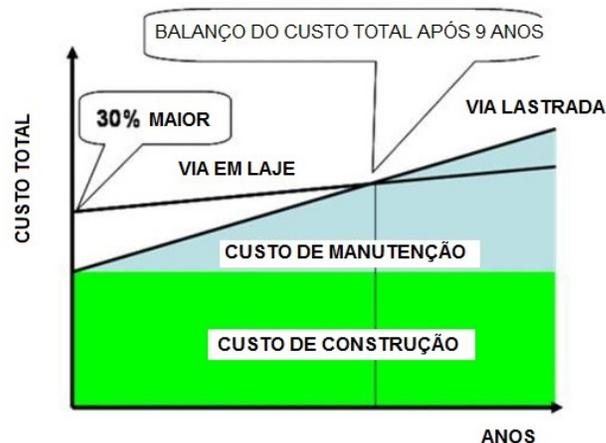


Figura 3.1-Comparação entre os custos de implantação e manutenção entre vias convencionais e não convencionais em linhas de Alta Velocidade no Japão. Modificado de Yokoïama (2011).

Tabela 3.1 - Estrutura das Linhas ferroviárias de Alta velocidade no Leste do Japão compostas simultaneamente por vias convencionais e não convencionais. Modificado de Yokoïama (2011).

Nome da linha	Extensão (Mi)	Laje (Mi)	Lastro (Mi)	Via elasticamente suportada (Mi)	Outras (Mi)
Tohoku Shinkansen	377,4	315,5	30,8	29,0	2,1
Joetsu Shinkansen	167,5	151,2	9,0	7,3	0,1
Hokuriku Shinkansen	71,8	62,4	9,1	0,2	0,1
Total	616,6	529,1	48,9	36,4	2,2
RELAÇÃO		85,8%	7,9%	5,9%	0,4%

LEGENDA: Mi - milhas.

Ainda no Relatório (TAV BRASIL, 2009), salienta-se em relação a experiências em outros locais do Mundo que o custo de capital inicial de todos os sistemas de via sem lastro é consideravelmente maior do que para com lastro, como no Japão onde os valores indicam esse é 30-50% maior e para sistemas europeus 50-75% maior.

3.2 LINHAS FÉRREAS DE ALTA VELOCIDADE NO MUNDO

3.2.1 JAPÃO

Só no Japão, onde o conceito de trem-bala surgiu em 1964, em média, cerca de 100 milhões passageiros por ano, durante os últimos 40 anos utilizaram o serviço. Na Europa, o tráfego de valores médios é de 50 milhões de passageiros por ano, e cresce a uma taxa constante anual de 2,6 % desde 1981. Hoje em dia, existem serviços ferroviários de alta velocidade em mais de 15 países, e a rede continua a crescer a um ritmo muito rápido que deve chegar a 25 mil km de novas linhas em 2020 (UIC, 2005).

Segundo Soares (2005), a primeira linha férrea de alta velocidade foi construída no Japão em 1968, ligando as cidades de Tokyo e Osaka. Foram transportados 31 milhões de passageiros no primeiro ano de operação, época onde o trem atingia velocidades de até 210Km/h e completava o trajeto de 515 quilômetros em 3:30 horas. Atualmente, o mesmo percurso é realizado em 2:30 horas; além do que o Japão conta com mais de 2300 quilômetros de linhas de alta velocidade.

3.2.2 ALEMANHA

Segundo Soares (2005), a primeira linha de alta velocidade na Alemanha foi inaugurada em 1991 entre Hannover e Würzburg (326 km) e entre Mannheim e Stuttgart (99 km) com o ICE (InterCity Express). A linha Hannover - Berlin (263 Km) entrou em serviço em 1998, com apenas um trecho de 170 km de alta velocidade, percorrendo todo trecho em 1 hora e 45 minutos. Em 2002, a linha Köln - Rhein/Main, projetada para a velocidade máxima de 300 km/h, entrou em operação permitindo a ligação entre as duas regiões em 1 hora e 15 minutos. As linhas foram projetadas para velocidades máximas menores que o usual para a Europa (250 km/h). Atualmente, a Alemanha conta com mais de 800 quilômetros de ferrovias de alta velocidade.

3.2.3 FRANÇA

A França foi o segundo país no mundo a implantar o sistema de trem de alta velocidade. A primeira linha francesa foi aberta entre Paris e Lyon (“TGV Sud Est”) em dois estágios, o primeiro em 1981 e depois em 1983. O TGV (*Train à Grande Vitesse*) completava o percurso de 410 km entre as duas cidades em 2 horas (SOARES, 2005). A situação atual das linhas de alta velocidade da França é apresentada na Tabela 3.2

Tabela 3.2 - Extensão e início de operação de algumas linhas de ferrovias de alta velocidade existentes na Europa. Adaptado de COMMISSION FOR INTEGRATED TRANSPORT – UK (2004).

Ferrovia (trecho)	Inauguração	Extensão (km)
TGV Sud-Est (Paris-Lyon)	1981-3	447
TGV Atlantique (Paris-Tours/Le Mans)	1989-90	282
TGV Rhone-Alps (Lyon-Valence)	1992-4	121
TGV Nord (Paris-Calais/Belgian frontier)	1993	320
TGV Interconnection (Paris bypass)	1994	70
TGV Med (Valence-Marseille/Nimes)	2001	303

3.2.4 ESPANHA

A Espanha é um dos países que mais investem em linhas de alta velocidade. A linha que liga as cidades de Madrid e Sevilla, com 471 km de extensão, foi iniciada em 1986. Com esse serviço, foi possível viajar entre as duas cidades em 2 horas e 15 minutos (SOARES, 2005).

Informações obtidas no sítio da empresa que administra os trens de Alta velocidade na Espanha (ADIF, 2014), mostram a qualidade e importância deste tipo de transporte para aquele país, destacando:

- Mais de 3100 km em serviço;
- 31 estações em 21 províncias, atendendo 60,3% da população espanhola;
- Outras 50 cidades se beneficiam dos serviços ao redor das linhas;
- De 1992 a 2011, mais de 140 milhões de pessoas utilizaram o serviço

3.2.5 ITÁLIA

A era italiana de alta velocidade começou com os 252 km da "Direttissima" Roma-Florença, a primeira linha dedicada de alta velocidade da Europa, quando abriu em 1978. Entretanto, essa linha pioneira exigiu uma forte modernização para operar a 300 km/h (TAV BRASIL, 2009).

Atualmente as ferrovias italianas de alta velocidade ultrapassam os 550 quilômetros de extensão.

3.2.6 CORÉIA DO SUL

A linha Seoul – Bulsan reduziu o tempo de viagem pela metade em relação ao melhor serviço da linha convencional. No corredor, de 410 km, reside 33 dos 48 milhões de habitantes do país. A construção da linha foi iniciada em 1992. De acordo com Soares (2005), o projeto seguiu o padrão internacional "UIC" para ferrovia de alta velocidade e o material-rodante (KTX – Korea Train eXpress) se baseou no TGV Francês.

3.2.7 CHINA

A República Popular da China introduziu serviços de trem de alta velocidade nas linhas principais em abril de 2007, quando a sexta aceleração nacional tornou possível usar 6.000 km de vias a velocidades de até 200 km/h. Em 2012 foi inaugurada a maior linha de alta velocidade em atividade no mundo, com cerca de 2300 quilômetros de extensão que são percorridos em menos de 9 horas.

A principal operadora de serviços de trem de alta velocidade no país é a "China Railway High-Speed - CRH". No país inteiro, 250 trens agora podem operar a

200 km/h ou mais, sendo reportado por Oficiais do Ministério de Ferrovias que 850 km de vias de 18 linhas principais foram aprovados para operação de 250 km/h. Muitas vezes linhas de alta velocidade são compartilhadas com transporte pesado, com até 5 minutos de intervalo entre trens.

3.2.8 TAV NO BRASIL

O primeiro estudo específico sobre linhas férreas de alta velocidade no Brasil, foi feito por Junqueira (1979), reunindo os estudos até então realizados para modernização das linhas brasileiras. A maioria destes trabalhos faziam referência ao trecho São Paulo – Rio de Janeiro.

De acordo com Valec (2012), o projeto do Trem de Alta Velocidade ligando Goiânia a Brasília, conhecido como "Trem Bala" e concebido em 2004, foi fato gerador de muita polêmica, tanto técnica quanto politicamente. Seu estudo de viabilidade, ainda que realizado por técnicos de competência indiscutível e cuja qualidade do trabalho tenha sido amplamente reconhecida pelo mercado, foi questionado e nunca oficialmente publicado, tanto por divulgação integral ou então por referências acadêmicas.

Em janeiro de 2004, foi apresentado Estudo Preliminar denominado Proposta para o Desenvolvimento do Eixo Brasília- Goiânia, contratado em parceria pelos Governos de Goiás e do Distrito Federal, cujo gestor era Secretaria de Transportes do Distrito Federal (VALEC, 2012).

Segundo informações obtidas no site do Programa de Aceleração do Crescimento – PAC do governo federal (BRASIL, 2014) encontra-se em outubro de 2014 em ação preparatória o estudo de uma linha de alta velocidade que ligaria as cidade de Campinas-SP a Belo Horizonte-MG e outra que ligaria São Paulo-SP a Curitiba-PR.

Em 2008, o Banco Interamericano de Desenvolvimento - BID comissionou a Halcrow Group Ltd e a Sinergia Estudos e Projetos LTDA para preparar um estudo de viabilidade para uma linha ferroviária de alta velocidade (350km/h), que neste trabalho será convencionalmente tratado por TAV com 511 quilômetros de extensão, ligando as cidades do Rio de Janeiro, São Paulo e Campinas, objeto de estudo da presente pesquisa e previamente ilustrado na Figura 2.1.

Apesar do projeto do TAV brasileiro estar paralisado devido a entraves licitatórios, é um método de transporte com qualidade reconhecida em outros países e deverá, provavelmente, compor a matriz de transporte brasileira.

O estudo em questão irá servir como norteador, considerando a opção mais provável do método construtivo escolhido de via lastrada, tendo em vista a ocorrência de siltitos brandos expansíveis/colapsíveis da Formação Itararé que ocorrem em uma porção considerável do futuro traçado do TAV entre Campinas e São Paulo, como já salientado por Parizotto (2015) e Parizotto et al. (2016). Estes materiais implicariam em sérios problemas e custos onerosos de fundação, no caso da opção por laje.

3.3 AGREGADOS PARA LASTRO

3.3.1 BREVE HISTÓRICO

O termo "lastro" como parte da linha férrea se originou em Tyneside no Reino Unido. Os navios que transportam carvão de Newcastle retornavam "em lastro" carregados com cascalho e outros materiais para manter a estabilidade. Este "lastro" era abandonado no cais e então utilizado para fornecer um leito de sólidos para os bondes que levavam o carvão. Esta associação da palavra 'lastro' com os bondes foi mantida, tendo sido adotada para as estradas de ferro (CLAISSE, CALLA, 2006).

De acordo com Castelo Branco (2008), no final do século XIX e início do século XX a ferrovia exerceu o monopólio absoluto sobre os transportes terrestres, fato que pode ser ilustrado pelo sentido etimológico do termo via permanente ferroviária, até hoje empregado para designar o conjunto dos elementos que constituem a estrada por onde circularão os veículos ferroviários (trilhos, dormentes, lastro, sublastro, obras de terra, obras-de-arte especiais e obras-de-arte correntes).

Nas primeiras ferrovias, os trilhos, que constituíam a via, eram apoiados em uma base rígida formada por maciços rochosos ou grandes blocos de rocha e apresentavam graves problemas, dentre os quais se destacavam a falta de nivelamento e a durabilidade da própria via e dos equipamentos. Rapidamente percebeu-se a necessidade de uma base resiliente, capaz de absorver os impactos decorrentes das solicitações dos veículos, que permitisse a manutenção do nivelamento da via, a transmissão dos esforços e de cargas de forma homogênea ao solo e permitisse uma drenagem eficiente do sistema (CLAISSE & CALLA, 2006).

Uma variedade de materiais foram utilizados como lastro junto com rocha até a década de 1970. Nos primeiras ferrovias a fácil disponibilidade e custo, eram os fatores importantes considerados para a seleção do material. Qualquer material localmente disponível e barato foi usado. Até o início de 1900 engenheiros

compreenderam a importância de lastro e as suas funções no que diz respeito a distribuição das forças para o subleito e drenagem (KLINCEVICIUS, 2011).

3.3.2 ASPECTOS GERAIS

O lastro é resumidamente a camada de material pétreo que é colocada e compactada onde será construída a linha férrea (Figura 3.2). Geralmente esse material é obtido por fragmentação mecânica (britagem).

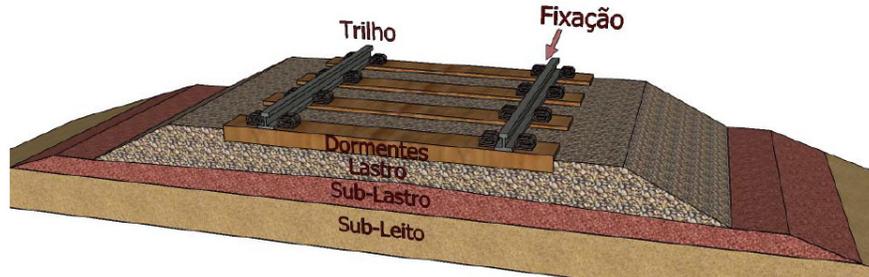


Figura 3.2 - Elementos principais da via permanente. Modificado de KLINCEVICIUS (2011).

As principais funções do lastro (FRAZÃO, PARAGUASSÚ, 1998) são as seguintes:

- Dar uma base sólida aos dormentes e distribuir as cargas, de maneira uniforme, na superfície da plataforma;
- Assegurar uma boa drenagem para evitar que os dormentes trabalhem dentro d'água;
- Preencher os vazios entre os dormentes, formando esbarros que assegurem a manutenção destes em suas posições corretas, para opor resistência aos deslocamentos laterais e longitudinais;
- Dificultar o crescimento de vegetação daninha nas vias;
- Facilitar o trabalho das turmas de serviço durante estações chuvosas;
- Dificultar a subida de lama da plataforma e
- Constituir suporte elástico para a via.

O agregado usado como lastro deve ser selecionado ao ponto de manter suas características geomecânicas inalteradas pelo máximo tempo possível, mantendo as propriedades mecânicas e a qualidade de rolagem da via. Raymond (1985) ressalta que a existência de uma camada de lastro elástica, não cimentada, resistente e bem construída apoiada sobre um subleito estável e compactado é a primeira condição para baixos custos de manutenção em uma ferrovia.

As propriedades originais do lastro se alteram devido à degradação e contaminação por materiais externos. A degradação ocorre devido à passagem

dos veículos, impondo carregamentos cíclicos e vibrações em diferentes freqüências e intensidades, mas também devido a fatores ambientais que podem acelerar esta degradação.

O comportamento mecânico da via, ligado à rigidez vertical, é fortemente influenciado pelas propriedades mecânicas do lastro. Essas propriedades alteram-se ao longo do tempo, com os vazios entre as partículas sendo preenchidos com materiais mais finos. Conseqüentemente, o módulo de resiliência do lastro é alterado, e a porosidade e a capacidade de drenagem diminuem (SELIG, WATERS, 1994).

Por esses motivos, a compreensão do comportamento mecânico do agregado que compõem o lastro e dos fatores que contribuem para sua degradação é essencial para a redução de operações de manutenção.

Como requisitos desejáveis para uso em lastro ferroviários, os agregados devem apresentar as seguintes propriedades (FRAZÃO, 1987; FRAZÃO, PARAGUASSÚ, 1998; FRAZÃO, 2007):

- Alta tenacidade, para resistir ao impacto dos instrumentos de compactação do lastro;
- Alta resistência ao desgaste, para evitar a moagem devido à passagem dos veículos e à movimentação horizontal dos trilhos;
- Alta resistência à compressão, para resistir aos esforços verticais provocados pelo peso dos veículos e distribuí-los eficientemente sobre o leito da estrada;
- Alta resistência à alteração, para suportar as ações intempéricas, impedir a formação de finos (que também pode se formar por ações mecânicas) e evitar a redução do índice de vazios necessários a uma boa drenagem e
- Forma adequada das partículas após britagem, para propiciar tanto um bom embricamento dos grãos como garantir uma adequada resistência mecânica.

Com base nestas premissas, foram selecionados diferentes tipos de rocha (microgabro, migmatito e granitos) tanto por sua reconhecida competência geomecânica quanto por produzirem britas em pedreiras próximas ao traçado da obra.

De acordo com a norma NBR 7217 (ABNT, 1987), o agregado pode ser classificado em função da sua granulometria, densidade (pesado ou leve) e modo

de obtenção (natural ou artificial), sendo o agregado graúdo (pedra britada ou pedregulho com dimensões entre 75mm e 4,75 mm e o agregado miúdo (areia natural ou não) com dimensões entre 4,75mm e 0,15mm.

Segundo Klincevicus (2011), devido ao aumento da velocidade de marcha e da maior carga sobre os eixos, o caráter dos esforços aos quais as vias de tráfego estão expostas também mudou. A carga movimentada gera forças de inércia e principalmente as interferências de frequência mais alta oriundas do processo de rolagem aumentam nitidamente. Mecanismos de deformação modificados pela excitação dinâmica podem causar grandes movimentações no material granulado da pilha de lastro que, em decorrência da fricção e quebra, prejudicam consideravelmente a funcionalidade da superestrutura com lastro e são responsáveis por acomodações irregulares e falhas de posição da linha no leito de lastro. Além disso, os veículos em velocidade muito elevada podem ser danificados devido à sucção da brita da superestrutura da via ("lastro voador"). Apesar da seleção de tipos de rocha mais duras para aplicação no lastro em linhas de alta velocidade, os custos de manutenção gerados ainda são significativamente mais altos.

Quando submetido a tensões cíclicas, esses materiais sofrem deformações que podem ser divididas em permanentes e resilientes. A deformação resiliente corresponde à parcela recuperável da deformação uma vez removido o carregamento, e a deformação permanente corresponde à não recuperável (KLINCEVICIUS, 2011).

De acordo com Selig & Waters (1994), o desempenho da via está relacionado com os alinhamentos vertical e horizontal do sistema de camadas. Para que isso ocorra, é necessário que cada componente do sistema realize suas funções adequadamente perante as condições climáticas e os carregamentos impostos pelo tráfego.

Tratman (1909) *apud* Klincevicus (2011) indicou que "lastro é o item mais importante de garantia da boa pista para a economia em manutenção e operação".

Assim, pode-se concluir que a qualidade do lastro influencia na exequibilidade do projeto, na segurança da via e também na qualidade do serviço. Daí a importância do estudo de caracterização dos materiais pétreos a serem empregados neste tipo de ferrovia.

3.4 PETROGRAFIA

A análise petrográfica é uma ferramenta muito importante na correlação com dados tecnológicos de uma rocha, possibilitando detalhar características (mineralogia, textura, granulação, feições de deformação e de alteração, padrão de microfissuramento, entre outros) que podem influenciar o comportamento físico-mecânico e a durabilidade sob as condições de uso a que o material pétreo será submetido.

Em geotecnia, a petrografia é fundamental, quando a obra envolve rocha, seja ela como um maciço que sofrerá algum tipo de intervenção ou como material de construção (rocha de revestimento ou agregado), este último objeto do estudo. Diversos exemplos da literatura indicam correlação com os diversos ensaios tradicionais, sendo as comparações sempre referenciadas na petrografia.

Keikha e Keikha (2013) realizaram um estudo petrográfico de dois granitos localizados no Iran, indicando que a resistência mecânica destas rochas são geralmente função de uma vasta gama de parâmetros petrográficos, incluindo o tamanho do grão, a composição mineralógica quando comparadas aos valores de compressão uniaxial, destacando que:

- A composição mineralógica é uma das principais propriedades que controlam a resistência da rocha. A percentagem de minerais "fortes" (quartzo, ortoclásio e granada) e minerais fracos (plagioclásio, biotita e muscovita) pode ter efeitos opostos sobre os parâmetros de resistência das rochas. O quartzo e a proporção com plagioclásio tem impacto sobre a resistência à compressão uniaxial das rochas graníticas;
- O grão (mineral) tamanho médio tem impacto na resistência da rocha. A resistência aumenta à medida que diminui o tamanho de grão;
- A resistência aumenta à medida que os conteúdos de quartzo e de ortoclásio aumentam. Pelo contrário, a abundância de plagioclásio provoca uma redução na resistência;
- Foram encontradas correlações significativas entre resistência à compressão uniaxial, a de carga pontual e resistência à tração para rochas graníticas.

Já Nagali *et al.* (2016) desenvolveram pesquisas experimentais em basaltos da Província Magmática do Paraná com o objetivo de determinar o grau de correlação entre análise petrográfica com resultados de ensaios físicos e mecânicos de Abrasão Los Angeles, densidade e absorção de água. Os referidos autores

concluíram que a granulaco e a proporo de alguns minerais mais significativos, influem consideravelmente nos resultados dos ensaios físicos mecânicos. Também observaram correlaces significativas entre os minerais secundários com a absoro d'água e da proporo de minerais como piroxênio com os resultados de abraso Los Angeles.

Monticeli *et al.* (2016) utilizaram anlise petrogrfica e micromorfolgica para determinar os graus de alteraco de rocha e de superfície de descontinuidades para subsidiar anlises de quedas de bloco em um túnel antigo ("Monte Seco") escavado em macio gnássico na Estrada de Ferro Vitória-Minas, próximo s cidades de Joo Neiva e Ibiracu (ES). Foram caracterizados 3 graus de alteraco (A1 – so a pouco alterado; A2- medianamente alterado e A3- muito alterado) por meio de descries tteis visuais, pelos tipos de alteraco fissural, minerais secundários e pelos padres intempéricos – PI e texturais - T, os quais foram quantificados por meio dos valores de porosidade aparente (Figura 3.3 e Tabela 3.3).

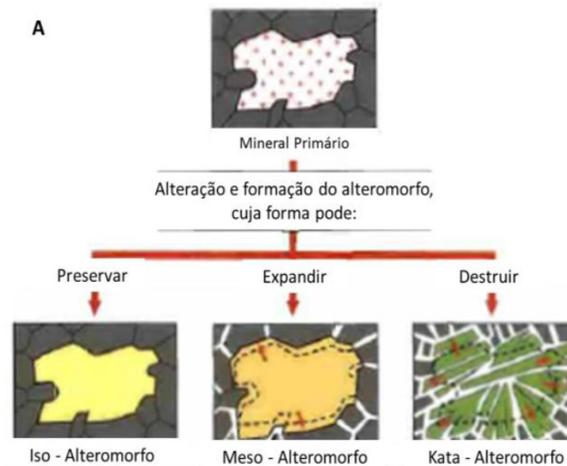


Figura 3.3 - Descrio microtextural de minerais alterados. Fonte: DELVIGNE (1988) apud MONTICELI *et al.* (2016).

Os ensaios propostos por MONTICELI *et al.* (2016) permitiram boa separaco entre os distintos graus de alteraco evidenciando características próprias frente ao intemperismo, destacando que:

- A alteraco dos minerais primários ao longo da foliaco gnssica parecem influenciar a queda de blocos de rocha no túnel, pois o intemperismo deste plano conduz  perda de coeso da rocha e ruptura por trao de blocos limitados pela foliaco;

- A decomposição da cordierita e da biotita apresenta indícios microtexturais de contração/expansão da mineralogia secundária. A presença de argilominerais expansivos ocorrem mais freqüentemente nos alteromorfos de grau A3, sendo importantes pela possibilidade de instabilizarem blocos de rocha.

Tabela 3.3 - Relações entre grau de alteração, porosidade e tipo de alteração/microfissuramento. Modificado de MONTICELI et al. (2016).

Grau de Alteração	Pa (%)	Alteração	Microfissuramento
A1	0,46-0,80	Saussoritização (Plg) e Pinitização (Crd).	Intramineral
A2	1,01-2,80	Saussoritização (Plg), pinitização (Crd), cloritização (Crd e Bt), acúmulo de óxidos e hidróxidos de ferro.	Intramineral (Qzt e Fk), intramineral (Crd e Bt) e transmineral
A3	5,15-6,87	Saussoritização (Plg), pinitização (Crd), cloritização (Crd, Bt e Opx), sericitização (Crd e Fk), acúmulo de óxidos e hidróxidos de ferro.	Intra, inter e transmineral

LEGENDA: Pa- porosidade aparente; Plg- plagioclásio; Crd- cordierita; Bt- biotita; Opx- ortopiroxênio; Fk – feldspato alcalino e Qzt- quartzo.

3.5 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO LASTRO

Segundo Frazão e Paraguassu (1998), os materiais rochosos na forma granular são denominados de agregados. Estes materiais devem possuir dimensões e propriedades adequadas para o seu uso em construção civil e são classificados da seguinte maneira:

- Quanto à origem: são denominados naturais aqueles que são extraídos da natureza na forma de fragmentos como areia e pedregulho. Os artificiais são os materiais que passam por processos de fragmentação, como pedra e areia britada;
- Quanto à densidade: têm-se agregados leves (pedra pomes, vermiculita, argila expandida, etc.), agregados pesados (barita, magnetita, limonita, etc.) e agregados normais (areia, pedregulhos e pedra britada);
- Quanto ao tamanho dos fragmentos: agregado graúdo (diâmetro mínimo superior a 4,8mm) e agregado miúdo (diâmetro máximo igual ou inferior a 4,8mm).

Dados da literatura indicam que no Reino Unido a partir do início de 1900 rochas duras e angulares eram aceitas como o melhor material de lastro, mas vários outros materiais foram utilizados para tal finalidade. A razão para isso poderia ser a grande dificuldade encontrada na tentativa de transportar grandes quantidades de rocha. Na Grã-Bretanha, sem pedreiras a sudeste, teria sido praticamente

impossível o transporte enormes quantidades de rocha do norte, sem a ferrovia estar pronta (KLINCEVICIUS, 2011).

Nas rochas, os minerais são cimentados uns aos outros por uma matriz ou por uma ligação mecânica entre os contatos. Por isso, a classificação genética das rochas, obtida pela gênese ou processo que as originou, não é suficiente para avaliar a qualidade do lastro (CHRISMER, 1986).

A matriz ou ligação entre minerais e a existência ou não de vazios e poros é o que determina a resistência da rocha (FARMER, 1968).

Boucher e Selig (1987) mostraram que quanto maior for o tamanho do cristal na matriz, maior será a influência dos planos de clivagem dos cristais no início e na propagação de trincas.

Em análises petrográficas, além de propriedades individuais das rochas, como a proporção de cada mineral, a estrutura granular e a textura, também são aferidas as propriedades de cada um dos minerais presentes como a dureza, clivagem, brilho, cor e composição química. Essas propriedades fornecem informações sobre o desempenho do lastro (CHRISMER, 1986).

Lastros de baixa qualidade podem ser descartados por essa análise (petrográfica), caso as seguintes características sejam encontradas: mineralogias com altas quantidades de mica e sulfetos, texturas com baixa consolidação, alta porosidade ou friabilidade, e estruturas minerais com fraquezas como foliação, juntas e planos de estratificação (WATTERS, KLASSEN, CLIFTON, 1987).

Da Silva (2002), considera a proposta de Raymond (1979) a melhor classificação de agregado para uso como lastro, que leva em conta a porcentagem de minerais com dureza igual ou superior a 5,5 na escala de Mohs e a relação com os resultados do ensaio de Abrasão Los Angeles. Assim apresenta uma classificação numérica simples que varia de 1 a 6, sendo que quanto menor o número, melhor a qualidade do material. Essas informações podem ser vistas na Tabela 3.4.

Deve-se destacar que a classificação proposta por Raymond (1979) apud Da Silva (2002) leva em conta apenas aspectos mecânicos da rocha, o que pode não ser tão válido quando o material for usado em regiões de clima tropical, pois muitos minerais com dureza adequada, caso das olivinas, anfibólios, piroxênios e plagioclásios, por exemplo, são minerais mais suscetíveis a alteração intempérica, como pode ser visto no ítem 3.5 (Alteração e Alterabilidade). Esta observação

ganha relevância na presente pesquisa, uma vez que o trecho Campinas – São Paulo do TAV é interceptado pelo Trópico de Capricórnio.

Tabela 3.4 - Classificação de lastro segundo dureza Mohs e ALA (RAYMOND, 1979 apud DA SILVA, 2002)

ALA	Dureza Mohs > 5,5 - Porcentagens em Volume			
	0-25	25-50	50-75	75-100
0-10	3	3	2	1
10-15	3	3	2	1
15-20	4	4	2	2
20-25	4	4	3	2
25-30	5	4	3	2
30-35	5	5	3	3
35-40	5	5	4	3
40-50	6	5	4	4

De acordo com as diretrizes da norma NBR-5564 (ABNT, 2014) e de métodos de ensaios do IPT (1980), que tratam de agregado para lastro ferroviário, alguns ensaios recomendados e valores mínimos e máximos servem para balizar os estudos no Brasil, conforme apresentado na Tabela 3.5. Já as exigências para a caracterização do lastro segundo a norma europeia EN 13450 (DIN, 2013) são apresentadas na Tabela 3.6.

Os critérios solicitados pela norma europeia são bastante semelhantes, no entanto a diferenciação ocorre em relação a exigência do ensaio Micro-Deval, que junto com o ensaio Los Angeles são, segundo a referida norma, os ensaios necessários para caracterização da competência do agregado.

Segundo Giannakos, Loizos, Plati (2014) a qualidade do agregado usado para lastro de ferrovias de acordo com a EN-13450 é obtida por meio dos ensaios Micro-Deval e Los Angeles. Estes autores recomendam que as especificações devam ser iguais para ferrovias de carga e ferrovias de alta velocidade, enquanto que a norma acima referida sugere que o material de ferrovias mais lentas e pesadas deve sofrer mais esforços.

Tabela 3.5 - Ensaios e respectivos valores esperados para agregados para uso em lastros ferroviários, segundo a norma NBR-5564 (ABNT, 2014) e recomendações de Frazão (2007).

Norma / Referência	Ensaio	Valores
NBR 5564 (ABNT, 2014)	Abrasão Los Angeles	Máximo 30%
	Impacto Treton	Máximo 25%
	Massa específica	Mínimo 2,5 g/cm ³
	Porosidade máxima	Máximo 1,5%
	Absorção de água	Máximo 0,8%
	Índice de forma	Cúbica
	Compressão uniaxial	Mínimo 100 Mpa
Frazão (2007)	Esmagamento	29%

Tabela 3.6 - Ensaio e respectivos resultados esperados para agregados utilizados como lastro de ferrovia, segundo recomendações internacionais da norma EN 13450 (DIN, 2013).

Ensaio	Valores
Abrasão Los Angeles	Entre 16% e 24%
Abrasão Micro-Deval	Máximo 7%
Forma	Cúbica e lamelares < 4%
Porcentagem de finos	Mínimo 0,5%
Alteração em sulfato de magnésio	Máximo \leq 3%
Granulometria adequada	Entre 22,4 e 63mm
Petrografia	Padrão

Destaca-se que, principalmente, quanto aos limites referência de Abrasão Los Angeles, a norma NBR-5564 (ABNT, 2014; Tabela 3.5) permite um índice de até 40%, enquanto que a norma EN-13450 (DIN, 2013; Tabela 3.6) o valor limite é de 24%. Adicionalmente, na referida norma internacional é especificada a altura do lastro, sendo recomendado um mínimo de 35cm de altura para ferrovias de alta velocidade, enquanto é apenas 30 cm para ferrovias convencionais.

A exigência da Norma Européia sobre a execução do ensaio micro-deval deve ser levada em consideração também, uma vez que este ensaio não é executado no Brasil. Como estudos adicionais talvez comparar os resultados deste ensaio com os resultados do Desgaste a Úmido ("*Slake Durability*") possam gerar resultados satisfatórios referentes à durabilidade dos agregados.

Nålsund (2014) fez uma investigação experimental por meio de ensaios laboratoriais para comprovar que os resultados, por exemplo, dos ensaios de Abrasão Los Angeles e Micro-Deval seriam os mais adequados em relação ao desempenho e degradação dos agregados que compõem o lastro de ferrovias. Utilizou rochas ígneas, metamórficas e sedimentares bem consolidadas de granulação fina. Sobre as propriedades mecânicas, Nålsund (2014) faz as seguintes considerações:

- A resistência mecânica das rochas em termos de Abrasão Los Angeles ou valor Micro-Deval não mostrou correlação com a quantidade de microfissuras ou tamanho médio do mineral;
- Sugere que as micro-fissuras representam canais abertos para a penetração de água no agregado, confirmando pela boa correlação, onde a umidade teve geralmente um efeito negativo sobre a resistência mecânica das rochas com Los Angeles e ao ensaio de carga pontual;
- Tanto o módulo elástico da camada de lastro e a rigidez da faixa eram regulados pelos materiais, curva granulométrica e a densidade específica.

Sugere a possível relação entre a quantidade de microfissuras no agregado e módulo elástico com a quebra de lastro;

- O método de Abrasão Los Angeles, mostrou claramente uma classificação entre materiais pobres, intermediários e bons;
- Propõe melhorar a classificação de materiais de lastro por meio da introdução de outros dois métodos adicionais: um que é capaz de medir a capacidade de algumas rochas para recuperar resistência mecânica depois do esmagamento e outro durante;
- A saturação de material de lastro antes do teste de micro-Deval não teve qualquer efeito significativo sobre degradação. Nem o uso de uma solução de cloreto de sódio a 1% teve qualquer efeito.

Dias Filho (2012) faz uma avaliação do comportamento de gnaisses ornamentais provenientes de pedreira da Região Norte Fluminense, submetidos a processo de degradação, analisando o comportamento de durabilidade do material rochoso por meio do ensaio de resistência ao desgaste. Comparando os valores de perda de massa nos ensaios, verificou que o Micro-deval superou em 20 vezes o *slake durability*. Em linhas gerais observou um significativo aumento no desgaste dos materiais estudados, alterados aceleradamente no laboratório, quando comparado ao intacto. Os resultados indicaram que o aumento da velocidade de rotação da câmara de desgaste provoca um acréscimo linear do desgaste.

3.5.1 GRANULOMETRIA E FORMA

A graduação ótima deve proporcionar uma boa drenagem, estando relacionada à facilidade de manutenção e à maior resistência à deformação permanente (CHRISMER, 1986).

A norma NBR 5564 (ABNT, 2014) especifica que as partículas constituintes do lastro devem situar-se entre 12 e 63,5mm ou entre as peneiras #1/2" e 2 1/2", com tolerâncias à matéria pulverulenta (passante na peneira #200) de 1% em peso, e a torrões de argila, 0,5% em peso.

Existem várias normas de várias instituições, cada uma deve ser analisada com critério e se possível as experiências anteriores. O exemplo pode ser visto na Figura 3.4, onde estão expostos os limites granulométricos aceitos pelas normas AREMA 2009 e NBR 5564 (ABNT, 2014).

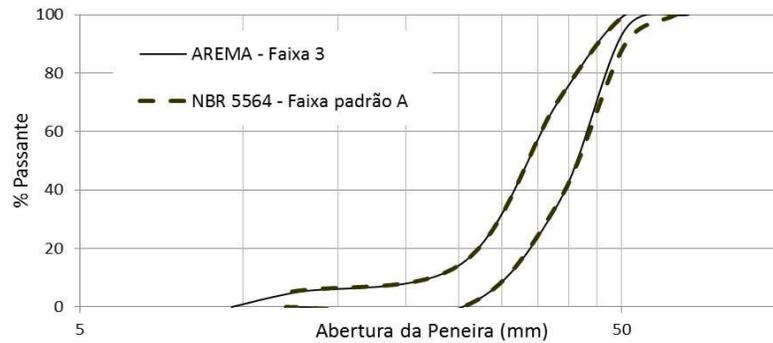


Figura 3.4 - Limites granulométricos para vias principais das normas AREMA (2009) e NBR 5564 (ABNT, 2014). Modificado de KLINCEVICIUS (2011)

A curva granulométrica exigida pela norma europeia EN-13450 (DIN 2013), que trata de agregados para lastro de ferrovia, é apresentada na Figura 3.5, sendo observado que os valores diferem das normas brasileira e americana em relação ao limite inferior da granulometria, pois esta norma exige que o material passe pelo crivo da abertura de 22,4mm.



Figura 3.5 - Curva granulométrica ideal para lastros de ferrovia segundo a norma EN 13450 (DIN, 2013). Adaptado de Paderno (2010).

Comparando as normas brasileira, americana e europeia, quanto à granulometria, tem uma pequena variação, embora se deva salientar que quanto mais uniforme a graduação melhor.

Em relação à forma, há uma variação razoável entre a norma europeia e a americana, onde nesta última é tolerado até 10% de grãos lamelares, enquanto na primeira, a tolerância é de 4%. O consenso é que a forma deve ser a mais cúbica possível

3.5.2 COMPRESSÃO UNIAXIAL

O ensaio índice de Compressão Uniaxial consiste na avaliação da tensão de ruptura de rochas quando submetidas a esforços físicos, podendo ser determinada isoladamente ou associada à determinação do módulo de deformação estático e do coeficiente de Poisson. Regido pelas diretrizes das normas NBR 5564 (ABNT, 2014) e NBR 10341 (ABNT, 2006), os resultados são obtidos por meio de ensaios de corpos de prova moldados especificamente para tal finalidade. Na Figura 3.6 é possível verificar um exemplo de equipamento utilizado em ensaios de compressão uniaxial no Departamento de Geotecnia da EESC/USP.

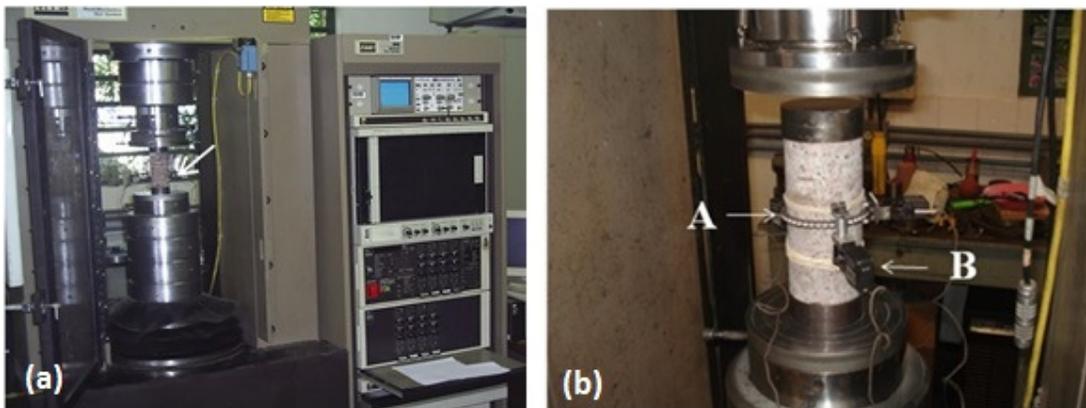


Figura 3.6 - (a) Prensa servo-controlada utilizado na determinação da resistência à compressão uniaxial de rochas. Observar corpo de prova posicionado (seta) para o ensaio; (b) Corpo de prova instrumentado para ensaio de compressão simples: "A" e "B" são, respectivamente, os sensores para determinação dos deslocamentos circunferencial e longitudinal. Modificado de Paraguassú et al. (2014)

Para a determinação desta propriedade nas rochas em estudo, pode-se substituir este ensaio pelo ensaio de carga pontual seguindo-se os procedimentos de ISRM (1985) que também permite uma estimativa da resistência à compressão uniaxial. O equipamento de teste é simples, rápido e de baixo custo, sendo que o teste pode ser realizado em corpos de prova irregulares, cujas amostras são rompidas pela aplicação de uma carga concentrada a partir de duas ponteiros cônicas, conforme discutido e ilustrado no item 4.3.2.2.

Al-Harhi (2001) realizou estudos sistemáticos com mais de 110 amostras de rochas e agregados de origem ígnea, sedimentar e metamórfica e de diferentes tipos, idades e graus de intemperismo com o objetivo de determinar as características de resistência dos agregados, em termos de britagem, impacto e valores de abrasão. Correlações entre os índices de carga pontual (I_s) e de compressão uniaxial (RCU) foram feitas, tendo sido verificada uma relação linear

diretamente proporcional e com $R^2= 0,96$ (Figura 3.7) cujas tendências são muito similares a de vários exemplos reportados na literatura (Tabela 3.6).

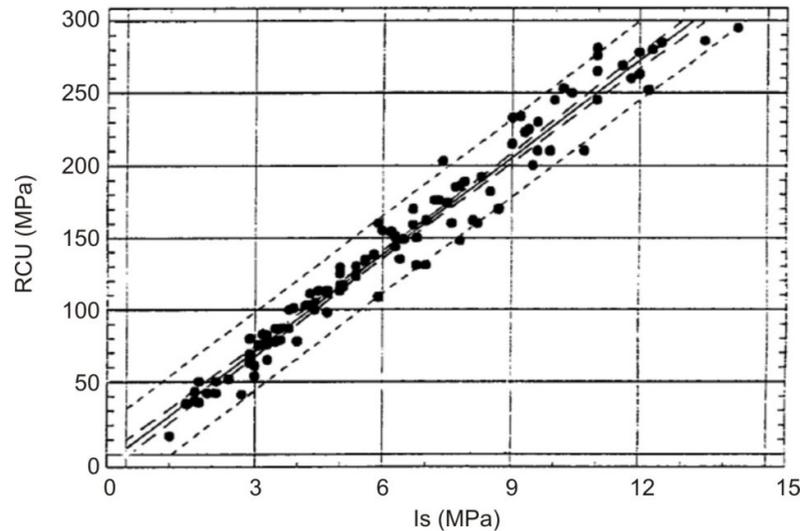


Figura 3.7 - Correlação entre I_s e RCU (Al-HARTHI, 2001).

Conforme observado na Tabela 3.7, os fatores sugeridos de conversão de I_s para RCU variam entre 17 e 39 a depender do grau de alteração das amostras ensaiadas, do tipo litológico, da taxa de umidade (se o material está seco ou molhado), da forma da amostra, entre outros fatores.

Tabela 3.7 - Resumo de diferentes modelos de regressão que relacionam I_s e RCU. Modificado de Al-Harhi (2001).

Tipo de análise	R^2	Descrição	Equação	Autor
	0,96	Pronunciada	$RCU = 23,42 \times I_s$	Al-Harhi (2001)
	-	-	$RCU = 18,60 \times I_s$	Wiesner e Gillate (1997)
	-	-	$RCU = 19,30 \times I_s$	
	0,95	Pronunciada	$RCU = 24,14 \times I_s$	
	0,90	Pronunciada	$RCU = 38,50 \times I_s$	
Linear	-	-	$RCU = 22,00 \times I_s$	Brook (1985)
	-	-	$RCU = 24,80 \times I_s$	Szlavin (1974)
	-	-	$RCU = 17,50 \times I_s$	
	-	-	$RCU = 21,00 \times I_s$	Hoek & Bray (1974)
	-	-	$RCU = 24,50 \times I_s$	
	-	-	$RCU = 24,00 \times I_s$	Bienawski (1974)
		0,88	Pronunciada	$RCU = 24,00 \times I_s$
	0,95	Pronunciada	$RCU = 24,00 \times I_s$	D'Andrea et al. (1965)

3.5.3 ESMAGAMENTO

Apesar de não ser previsto pelas normas NBR 5564 (ABNT, 2014) e EN 13450 (DIN, 2013), o ensaio de esmagamento é recomendado por Frazão (2007) como um dos requisitos para caracterização de lastro ferroviário, com base nas diretrizes da

norma SABS 1083 (2006) que preconiza o valor máximo de 29% para a resistência do agregado ao esmagamento - RE. No caso dos TAV, a realização deste tipo de ensaio parece pertinente, visto que parte das solicitações impostas pelos veículos à camada de lastro podem induzir ao esmagamento do agregado, seja durante o aumento ou na redução da velocidade do trem. O aparato de ensaio é mostrado na Figura 3.8, sendo que para atender as solicitações do experimento utiliza-se o mesmo tipo de equipamento dos ensaios de compressão uniaxial.

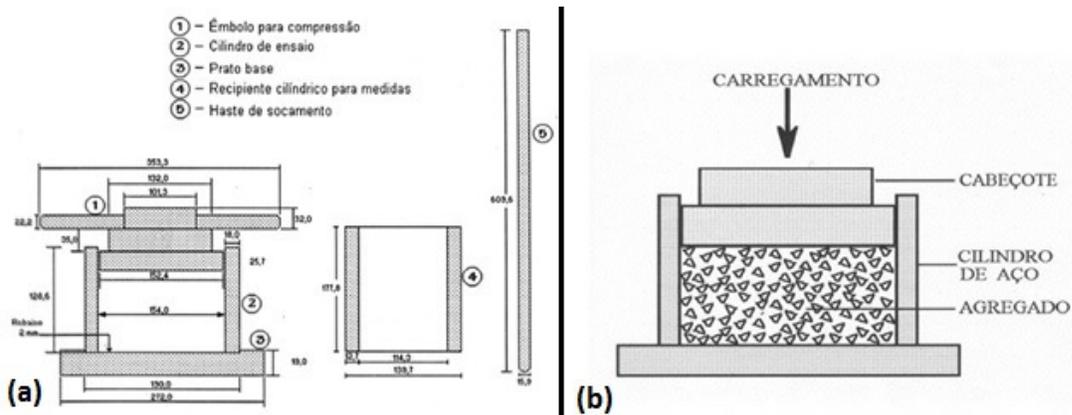


Figura 3.8 - (a) Dimensionamento dos dispositivos; (b) Esquema de carregamento para determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos. Modificado de Frazão & Paraguassú (1998).

3.5.4 ABRASÃO LOS ANGELES

Este ensaio segue as diretrizes da norma NM 51 (ABNT, 2001), sendo executado em um tambor giratório, de aço de alta dureza, no qual uma amostra de uma dada graduação é introduzida (granulometria e massa predefinidas) juntamente com esferas de aço em quantidade preestabelecida para a graduação adotada (Tabelas 3.8 e 3.9). Conforme ilustrado na Figura 3.9, o agregado é solicitado por ações tanto de atrito (entre os fragmentos de rocha, *os fragmentos e a parede do tambor e os fragmentos e as esferas de aço, simultaneamente), como de impacto promovido pela queda das esferas de aço sobre os fragmentos e queda dos fragmentos uns sobre os outros.

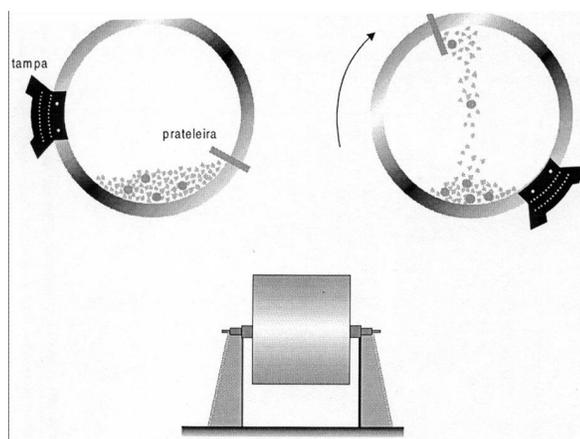


Figura 3.9 - Corte esquemático do tambor do equipamento para ensaio de abrasão Los Angeles. Modificado de Frazão & Paraguassú (1998).

Tabela 3.8 - Graduações para o ensaio de abrasão Los Angeles; norma NBR NM51 (ABNT, 2001).

Graduação	Peneira (mm)		Massa da amostra (g)	
	Passante	Retida	Por faixa	Total
A	38,1	25,4	1250 ± 25	5000 ± 100
	25,4	19,1	1250 ± 25	
	19,1	12,7	1250 ± 25	
	12,7	9,52	1250 ± 25	
B	19,1	12,7	2500 ± 50	5000 ± 100
	12,7	9,52	2500 ± 50	
C	9,52	6,35	2500 ± 50	5000 ± 100
	6,35	4,76	2500 ± 50	
D	4,76	2,38	5000 ± 100	5000 ± 100
	76,2	63,5	2500 ± 50	
E	63,5	50,8	2500 ± 50	10000 ± 200
	50,8	38,1	5000 ± 100	
F	50,8	38,1	5000 ± 100	10000 ± 200
	38,1	25,4	5000 ± 100	
G	38,1	25,4	5000 ± 100	10000 ± 200
	25,4	19,1	5000 ± 100	

Tabela 3.9 Número de esferas e de rotações, norma NBR NM 51 (ABNT, 2001).

Graduação	Número de esferas	Massa total das esferas (g)	Número de rotações
A	12	5000 + 25	500
B	11	4584 + 25	500
C	8	3330 + 25	500
D	6	2500 + 25	500
E	12	5000 + 25	1000
F	12	5000 + 25	1000
G	12	5000 + 25	1000

O ensaio de abrasão Los Angeles é influenciado pelo grau de coesão (ou coerência) dos fragmentos e pelo seu formato. Esse ensaio é normalmente

executado com amostras no estado seco, mas pode também ser executado com amostras na condição saturada.

Quanto às granulometrias do agregado usadas nos ensaios ALA devem ser similares as de uso do material. Em outras palavras, a graduação da amostra deve ser aquela normatizada para Lastro de ferrovia. Segundo a norma NBR-5564 (ABNT,2014), a granulometria do lastro de ferrovia deve ser entre 12 e 63,5mm. O resultado do ensaio de abrasão Los Angeles não representa uma propriedade intrínseca do material. A representatividade deste ensaio está intimamente ligada à granulometria do material ensaiado. A graduação mais representativa em ensaios para lastro é a graduação A, e não a F (definidas pela EB-655), como é a usual de ser a adotada pelas Pedreiras comerciais, em seus ensaios de certificação (SILVA, 2002).

Na presente pesquisa procurou-se seguir a metodologia proposta pela norma vigente, mesmo sendo pertinentes as afirmações de Silva (2002), sendo utilizada a graduação F.

Diversos trabalhos tratam da importância e do controle de qualidade na utilização do ensaio ALA e tentam justificar os resultados, além da granulometria, em função da forma do agregado e composição mineralógica e petrogenética das rochas. Hofer *et al.* (2012) faz uma importante contribuição sobre este tipo de comparação dos resultados do teste ALA em função da geometria e características petrográficas de, dolomito, calcário, granulito e diabásio. O referido autor comenta que o ensaio ALA é um dos poucos métodos mecânicos que apontam a qualidade do lastro ressaltando que devido aos fatores antes mencionados, os resultados estão sujeitos a uma grande variabilidade no que diz respeito a variação petrográfica enquanto que a geometria do agregado teria pouca influência quando comparada a anterior.

3.5.5 IMPACTO TRETON

No ensaio de resistência ao choque no equipamento de Treton, descrito pelo Anexo E da norma NBR 5564 (ABNT, 2014), um soquete cai de uma altura de 39,37cm, sobre o material previamente colocado em um cilindro oco (Figura 3.10) . Após 10 quedas do soquete, o material retido na peneira com abertura de 1,7mm é pesado. A diferença entre a massa inicial e a massa final dividida pela massa inicial é a perda ao choque do material, e é limitada em 20%.

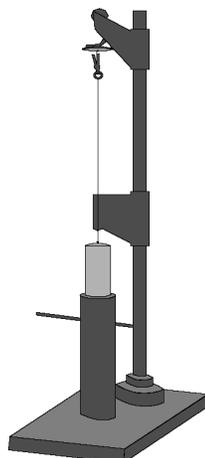


Figura 3.10 - Ilustração esquemática do equipamento utilizado nos ensaio de Impacto Treton

A adequação de técnicas simples para determinar as características de resistência de agregados foi testada por Al-Harathi (2001). Por meio da realização de ensaios laboratoriais com mais de 110 amostras de rochas ígneas, sedimentares e metamórficas de diferentes tipos, idades e graus de alteração, o referido autor verificou estaticamente correlações entre a resistência das rochas (em termo da resistência à carga pontual) e dos agregados (quanto às resistências ao impacto treton - RIT, ao esmagamento – RE e à abrasão Los Angeles - ALA, sendo que:

As relações entre estas propriedades mecânicas dos agregados indicaram graus de correlação relativamente altos mostrando que, à medida que o índice I_s aumenta, os valores de RIT, de RE e de ALA diminuem (Figuras 3.11, 3.12 e 3.13);

Tendências mais consistentes foram obtidas plotando valores de I_s contra os de RIT e de RE em comparação aos valores da ALA, com R^2 de 0,86, 0,91 e 0,79, respectivamente;

Al-Harathi (2001) sugere que a RIT e RE dos agregados podem ser estimadas pelos valores de I_s com alto grau de confiança, mas cautela deve ser usada na estimativa de ALA usando a mesma técnica.

Por sua vez, Irfan (1994) desenvolveu relações empíricas lineares entre o índice I_s tanto para valores de britabilidade como de ALA. As correlações se mostraram fracas, com valores de R^2 variando entre 0,51 e 0,54. O autor concluiu que as propriedades mecânicas de um agregado estão diretamente relacionadas à resistência da rocha, embora os diagramas plotados não tenham mostrado correlações lineares.

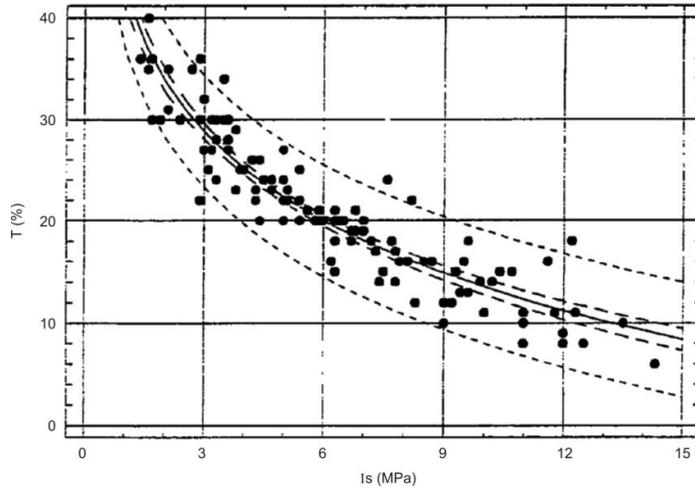


Figura 3.11 - Correlação entre I_s e resistência ao impacto treton (T). Modificado de Al-Harhi (2001).

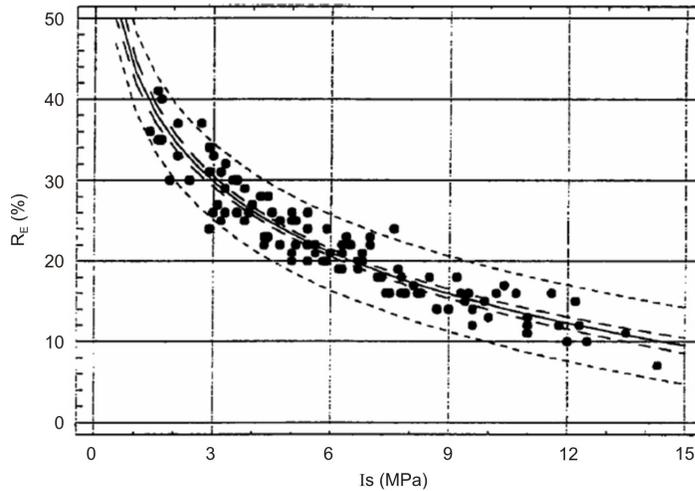


Figura 3.12 - Correlação entre I_s e resistência ao esmagamento (R_E). Modificado de Al-Harhi (2001).

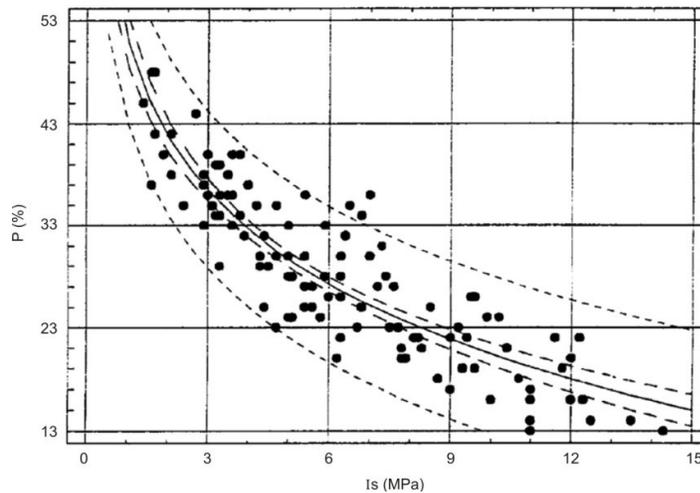


Figura 3.13 - Correlação entre I_s e perda por abrasão los Angeles (P). Modificado de Al-Harhi (2001).

3.5.6 MICRO-DEVAL

O ensaio Deval foi desenvolvido na França em 1870, para avaliar o agregado para uso em rodovias, tendo sido pela ASTM em 1908 (AMIRKHANIAN *et al.*, 1991). Anos mais tarde teria sido abandonado para todos os propósitos, exceto para lastros de ferrovia.

O ensaio Micro-Deval, foi adaptado do *Deval test* em 1960, na França (HANNA *et al.*, 2003). Este ensaio é bastante discutido na literatura. Há quem diga que por si só, é suficiente para caracterizar um agregado e sua respectiva resposta no campo. Trata-se de um teste de abrasão, diferentemente da Abrasão Los Angeles que é feita a seco, este ensaio utiliza água e é uma exigência da norma EN 13450 (DIN, 2013).

A norma europeia EN 1097-1 exige o ensaio Micro-Deval para obter os resultados de resistência a abrasão dos agregados utilizados na construção civil.

O equipamento Micro-deval do laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual Norte Fluminense (UENF), foi o único equipamento encontrado em funcionamento no Brasil, cujas dimensões e condições de ensaio atendem rigorosamente os preceitos da norma EN 1097-1. Vários tem sido os trabalhos desenvolvidos por pesquisadores desta universidade relacionando a durabilidade de diferentes tipos de rochas por meio de ensaios de desgaste abrasivo (Micro-Deval e outros) em função da energia do ambiente de alteração (BORGES *et al.*, 2016; DIAS FILHO *et al.*, 2016, 2012; DIAS FILHO, 2012; MAIA E SALLES, 2016 e MAIA, 2001). Destaca-se aqui que o dimensionamento do aparelho Micro-Deval atende aos requisitos da norma EN 1097-1.

O ensaio Micro-deval consiste em medir o desgaste por abrasão e choque (fricção) das partículas do agregado (10/14 mm) e uma carga abrasiva num tambor rotativo, como pode ser visto na Figura 3.14. O desgaste é medido pelo coeficiente micro-Deval que corresponde à percentagem da amostra original de agregado passante na peneira com 1.6 mm de abertura. Assim, quanto menor o coeficiente micro-Deval, maior será a resistência ao desgaste do agregado e, em princípio, maior será a sua resistência mecânica (LEA'S, 1998).



Figura 3.14 - Equipamento utilizado no Ensaio Micro-Deval. (Dias Filho, 2012).

Varias são as referências internacionais encontradas na literatura, como por exemplo as relevantes pesquisas desenvolvidas por Giannakos (2010), Erichsen et al. (2011) Giannakos et al. (2013), Selig e Boucher (1990), Gokalp et al. (2016), entre outras, que detalham experimentos do Micro-Deval com vários tipos de rochas e as relações com outros ensaios de desgaste abrasivo e, especialmente, tratando de previsões de durabilidade e de tempo de vida útil de materiais pétreos quando utilizados como agregado em lastros de ferrovias, objeto central da presente pesquisa.

3.6 ALTERAÇÃO E ALTERABILIDADE DO AGREGADO

Segundo Frazão (2007), agregados de diferentes naturezas e diferentes formas e dimensões são usados como material de construção, sendo a resistência e a durabilidade as principais propriedades para este uso e que podem se alterar ao longo do tempo em decorrência da intensidade do intemperismo sofrido.

Os mecanismos de alteração de uma rocha por intemperismo se manifestam pela desagregação e pela decomposição (FRAZÃO, 2007), sendo que:

- A desagregação é um mecanismo físico que leva à perda de coesão da rocha e à progressiva individualização de seus constituintes minerais, sem implicar modificação na natureza destes;
- A decomposição é um mecanismo físico-químico que implica modificações progressivas na natureza dos minerais, sem implicar desagregação;

- A combinação desses dois mecanismos é frequente e a predominância de um sobre o outro dependerá sempre das condições ambientais. Em climas áridos e semiáridos, predominaria desagregação; em climas tropicais ou subtropicais, predominaria a decomposição.

As reações ao intemperismo provocam a diminuição da energia livre em um sistema (KALINOWSKI, 1997). Os minerais que são formados sob condições químicas e físicas diferentes das da superfície da terra sendo termodinamicamente instáveis a estas condições, principalmente em relação à presença da água e da atmosfera. Essa instabilidade pode ser de origem química ou física, induzidas por processos biogênicos ou abiogênicos.

Goldich (1938) observou que a resistência dos minerais ao intemperismo está relacionada a sua ordem de formação na sequência de cristalização magmática definida por Bowen, ou seja, a suscetibilidade ao intemperismo de um dado mineral é proporcional a sua ordem de cristalização (Figura 3.15).

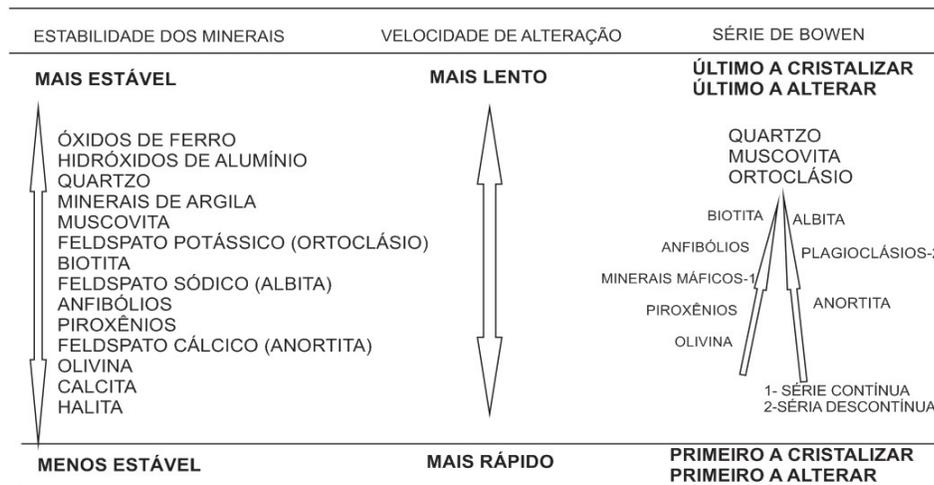


Figura 3.15 - Estabilidade de alguns minerais comuns em comparação às séries de Bowen. Adaptado de Gass et al. (1979).

O conhecimento da mineralogia do agregado possibilita a avaliação da degradação do lastro, pois alguns minerais são mais suscetíveis a alterações que outros. Por exemplo, enquanto caulinitas, produtos do intemperismo de feldspatos pela ação da água, quartzos se alteram muito pouco na sua presença (CHRISMER, 1986). Já minerais que se oxidam facilmente, como a pirita, geram compostos férricos e ácidos altamente corrosivos para os componentes metálicos da via (RAYMOND, 1995).

A cinética química pode ser definida como o estudo das taxas das reações químicas e depende de vários fatores, incluindo concentração das substâncias, temperatura, presença de catalisadores, entre outros. Além disso, o tipo e a densidade dos defeitos do cristal, bem como traços de impureza como inclusões de outros minerais, podem aumentar ou diminuir consideravelmente a cinética da reação, dificultando a aplicabilidade dos modelos existentes (DREVER, 1988).

A densidade do reticulado da estrutura, a transmissividade da estrutura para o soluto e água, o grau de polimerização e a reatividade dos diferentes sítios estruturais próximos à superfície do mineral (CASEY, BUNKER, 1990).

Há sítios nas superfícies que diferem consideravelmente na energia livre de superfície. Por exemplo, sítios com defeitos na superfície, degraus, quinas, micro fraturas, bordas entre outros, como ilustrado na Figura 3.16.

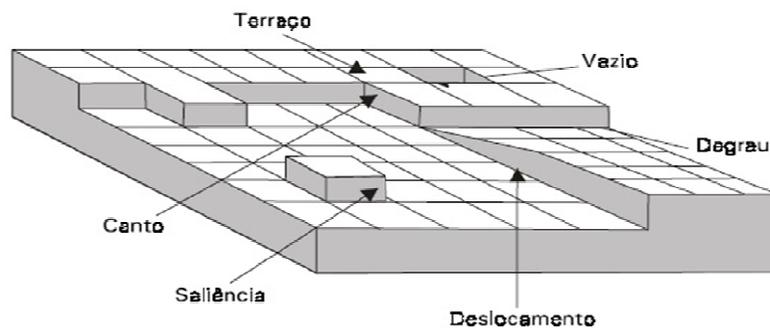


Figura 3.16 - Representação dos tipos de defeitos cristalinos. Modificado de Lasaga (1990).

Além das reações de superfície, a dissolução também envolve processos controlados pela difusão de elementos químicos no interior do cristal. Nos sólidos, a difusão pode ocorrer de quatro formas: trocas de sítios catiônicos, trocas intersticiais, ocupação de vacâncias e entre interstícios (WHITE et al., 1999).

A cinética de dissolução da maioria dos minerais em ambientes naturais é controlada por reações heterogêneas que ocorrem na interface mineral-solução (BLUM & LASAGA, 1991).

Os processos intempéricos que contribuem para a degradação do lastro, de natureza física ou química, estão relacionados à interação entre os minerais dos agregados e o clima da região. Processos mecânicos ocorrem devido a ciclos de congelamento e degelo, não sendo, portanto, um problema para as ferrovias brasileiras. Os processos químicos, que alteram a composição mineral, dependem

da mineralogia dos grãos, do grau de exposição à água da chuva, da quantidade de poluição atmosférica e da exposição climática (KLINCEVICIUS, 2011).

A alteração de rochas ocorre, naturalmente, num intervalo geológico de tempo, ou seja, de centenas a milhares de anos. Todavia, alterações significativas também podem, em alguns casos, ocorrer num intervalo muito menor, isto é, de alguns anos ou mesmo meses.

Um dos fatores controladores do intemperismo das rochas é a drenagem dos solutos, ou seja, quando os fluidos intempéricos entram em contato com os minerais e dá-se início ao processo de alteração ocorre uma saturação no ambiente que cessa ou diminui a velocidade/quantidade de material alterado. Tendo isso em mente pode-se inferir que estes processos quando atuantes em material particulado e disposto de maneira a permitir uma boa drenagem, no caso dos lastros de ferrovia, tornando ainda mais importante o conhecimento da qualidade do material a ser utilizado neste tipo de obra.

O aumento da temperatura causa considerável acréscimo na taxa de dissolução (SPARKS, 1989). O efeito da temperatura nas taxas de intemperismo "K" é dado pela Lei de Arrhenius:

$$K = A e^{-E/RT} \quad (1)$$

Onde "K" é a taxa constante; "A" é o fator de freqüência; "E" é a energia de ativação; "R" é a constante universal do gás e "T" é a temperatura absoluta.

A forte dependência de K com relação à temperatura deve-se ao fator exponencial. Por exemplo, o aumento da temperatura de 0° para 25° sob uma energia de ativação de 50 a 80 KJ/mol, provoca um aumento na taxa de intemperismo ordem de uma magnitude. Novamente se destaca a importância em saber a localização geográfica da aplicação do agregado em determinada obra de engenharia.

Verhoef & Van De Wall (1998), explica que o "Estado da Arte" da pesquisa em agregados não é muito sofisticado, mas existem debates sobre pontos específicos como, por exemplo, quais as propriedades a serem entendidas e qual sua variabilidade ao longo do tempo. Apesar desta afirmativa ser verdadeira, por meio de ensaios quantitativos tal como Abrasão Los Angeles, é possível subsidiar preceitos sobre o tipo de material de modo comparativo, ou seja, estabelecer comparações entre diferentes tipos de rocha.

Gomes (2001) comenta que com o passar dos anos, uma variedade de ensaios foi desenvolvida objetivando avaliar quais as propriedades dos materiais rochosos que são relevantes para o bom funcionamento de uma estrutura de engenharia que os utiliza. Na maioria das vezes, estes testes, especialmente aqueles que deveriam avaliar a durabilidade, foram desenvolvidos na tentativa de simular, com a melhor exatidão possível, as condições que ocorrem na realidade.

Frazão (1993) e Souza (1992) comentam que os problemas ligados ao uso de basaltos como material para construção, se relacionam à grande variação de comportamento geotécnico e tecnológico, causados principalmente pela alterabilidade destas rochas. Do ponto de vista da engenharia civil, estas variações refletem-se, na maioria dos casos, em diminuição da resistência mecânica da rocha (GOMES, 2001).

A avaliação da adequação de uma rocha para uso em construção, quanto ao grau de alteração, se desenrola desde a escala mega ou macroscópica até a microscópica. Nesta, a avaliação do grau de alteração se faz pela identificação dos teores de minerais primários alterados, teores e tipos de minerais secundários, além do grau de microfissuração (inter ou intracristalina) presente. Na escala mega e macroscópica, é possível, com a utilização de meios sensoriais, como os táteis e visuais, ou mecânicos manuais, atribuir às rochas classificações que vão desde sãs até muito alteradas, desde coerentes até incoerentes (FRAZÃO & PARAGUASSÚ, 1998; FRAZÃO, 2007).

Em suma, conforme já exposto por Frazão e Caruso (1983), a alterabilidade das rochas foi e continuará sendo um dos importantes problemas que a engenharia enfrenta nas obras civis.

3.6.1 ÍNDICES DE ALTERABILIDADE

O grau de alteração e a alterabilidade podem ser avaliados por análises petrográficas e mineralógicas e por ensaios físicos e físico-mecânicos. Paraguassú et al (2014) reúnem alguns dos procedimentos sugeridos por diversos autores para a avaliação dos índices de alterabilidade de rochas:

- Por meio de análises petrográficas, pode-se qualificar e quantificar os minerais sãos e alterados de uma rocha, avaliar o estado microfissural e também determinar o teor de minerais secundários;
- Variação dos valores de índices físicos em que a massa específica aparente de uma rocha diminui à medida que a alteração aumenta, enquanto

crece a porosidade e a capacidade de absorção d'água. Estes índices variam de zero (rocha sã) a um (rocha alterada) e

- Variação da resistência se dá quando uma rocha se altera e ocorre a diminuição de sua resistência mecânica. Comparam-se os valores de uma rocha sã com os valores em um dado estado de alteração.

3.6.2 ENSAIOS DE ALTERABILIDADE

Os ensaios de Alterabilidade, tornam-se fundamentais em nosso clima. Frazão & Paraguassú (1998) e Frazão (2007) recomendam alguns ensaios, listados abaixo, para caracterização da alterabilidade do material estudado:

- Saturação em água, nas condições ambientais do laboratório, e secagem em estufa, a 110°C, executadas em ciclos de 24/24 horas não inferior a 30 ciclos. Este procedimento pode ser observado na Figura 3.17a,b;
- Lixiviação contínua em extratores Soxhlet onde as amostras são submetidas à percolação em água aquecida a cerca de 60-70°C, não inferior a 100 ciclos. Este equipamento pode ser visto na Figura 3.17c;
- Saturação em solução de sulfato de sódio ou de magnésio e aquecimento em estufa a 110°C; mínimo de 5 ciclos e
- Saturação em etileno-glicol, durante 15 dias, com acompanhamento dos efeitos dessa substância na rocha, a cada 3 dias.

Diversas referências podem ser encontradas na literatura que utilizaram com sucesso estes ensaios para caracterizar o estado de alteração ou alterabilidade de diferentes tipos de rochas (basalto, diabásio, granito, gnaisse, etc.) bastante comuns em fundações ou como materiais de construção de obras de engenharia. Destacam-se aqui os trabalhos de Meurer et. al. (2016), Oliveira et al. (2012); Gomes (2001), Frazão e Frascá (1999), Marrano e Paraguassú (1998), Marrano (1996), Guzzi (1995), Frazão e Paraguassú (1994), Frazão (1993), Hypolito e Valarelli (1972), Farjallat et al. (1972) e Farjallat (1971).

Outro ensaio que ajuda na caracterização da propriedade da rocha em função da sua resistência à alteração é o de Desgaste a Umido ("Slake Durability Test").

De acordo com as diretrizes da ISRM (FRANKLIN, 1981) e da norma D4644 (ASTM, 2016), este ensaio consiste em submeter fragmentos rochosos com massa entre 40 e 60g cada à abrasão em presença de água acompanhada de secagem em estufa. Uma amostra de fragmentos de rocha secos em estufa é girada em um

recipiente de teste com malha de peneira padrão (2mm de abertura; Figura 3.18), e ao mesmo tempo parcialmente imersos em água. A durabilidade é medida através da relação percentual entre o peso seco final e o inicial da amostra dentro do tambor.



Figura 3.17 - Esquema ilustrativo de ensaios de alteração acelerada: (a) Recipientes telados com as amostras a serem submetidas à saturação em água e (b) Amostras saturadas a serem colocadas em estufa; (c) Extrator “Soxhlet” para ensaios de lixiviação contínua. Laboratório de Geologia de Engenharia do Departamento de Geotecnia da EESC/USP. Fonte: Paraguassú et al. (2014).

Segundo Silva (2002), este ensaio, embora sem tradição na área ferroviária, pode representar um dado de apoio na avaliação dos litotipos a serem utilizadas para produção de lastro.

As normas internacionais para caracterização de agregados para uso com lastro ferroviário são muito parecidas com as brasileiras, no entanto deve-se atentar as peculiaridades existentes em cada norma e também em relação a localização da ferrovia. Esta última observação deve levar em conta parâmetros climáticos que certamente contribuem para a aceleração da deterioração dos agregados.



Figura 3.18 - Equipamento existente no Laboratório de Geologia de Engenharia da EESC/USP para realização do ensaio de desgaste a úmido. Foto do autor.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Como já explicitado, a vertente principal do presente 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, sendo realizada por meio de trabalhos de campo em exposições representativas de pedreiras e coleta de amostras para ensaios de laboratório.

As partes teóricas e laboratoriais foram desenvolvidas no Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos, não havendo necessidade de compra de equipamentos graças à infraestrutura disponível especialmente nos Laboratórios de Mecânica de Rochas e Geologia de Engenharia, abrangendo desde ensaios mais expeditos com agregados até ensaios mecânicos em prensa servocontrolada com determinações da resistência ao esmagamento dos materiais pétreos estudados.

Contou-se ainda com o apoio do Departamento de Engenharia de Transporte e das seguintes instituições externas a USP: Laboratórios do Serviço Geológico do Brasil (CPRM/Araraquara e São Paulo), Laboratório de Química Ambiental (LQA) do Instituto de Química de São Carlos (IQSC/USP), Laboratório de Engenharia Civil do Centro de Ciência e Tecnologia (LECIV/CCT) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF, Campos-RJ), além de indústrias produtoras de britas localizadas no entorno do traçado do TAV (trecho Campinas-São Paulo).

4.1 COMPILAÇÃO DE DADOS E INFORMAÇÕES GEOLÓGICAS

Envolveu a consulta de publicações, teses, dissertações, relatórios técnicos e documentos cartográficos de mapeamentos referentes às unidades Complexo Morungaba, Granito Cantareira e Complexo Itu.

De modo geral, tais informações serviram de base aos estudos comparativos entre as rochas dentro de cada domínio geológico, otimizando a seleção e amostragem dos tipos litológicos. Conforme descrito no item 2.2, os litotipos representativos das oito unidades geológicas foram selecionados com base em dois critérios principais:

- Conter em algum ponto de sua área de ocorrência, no mínimo, uma exploração industrial de rocha para produção de agregados e
- Se localizar, no máximo, a 20 quilômetros de distância do traçado do TAV. Isto porque 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.

4.2 ATIVIDADES DE CAMPO E AMOSTRAGEM

Com o objetivo de reconhecimento das unidades geológicas e da coleta das amostras referência para os ensaios laboratoriais, foram realizadas ao todo 4 etapas de campo, com duração de 2 a 3 dias cada .

O procedimento de amostragem seguiu as diretrizes da norma NM 26 (ABNT, 2009). Para retratar fidedignamente as condições reais de produção industrial de agregado, as amostras foram coletadas diretamente nas pilhas pulmão do ciclo operacional de pedreiras ativas, mais especificamente em posições equidistantes da base, da meia altura e do topo das pilhas de agregado (Figura 4.1). Em média, foram amostrados em cada pedreira, aproximadamente 80 kg de cada uma das principais granulometrias (britas 4, 3, 2 e 1), garantindo a quantidade de material necessária à realização dos ensaios tecnológicos de laboratório.

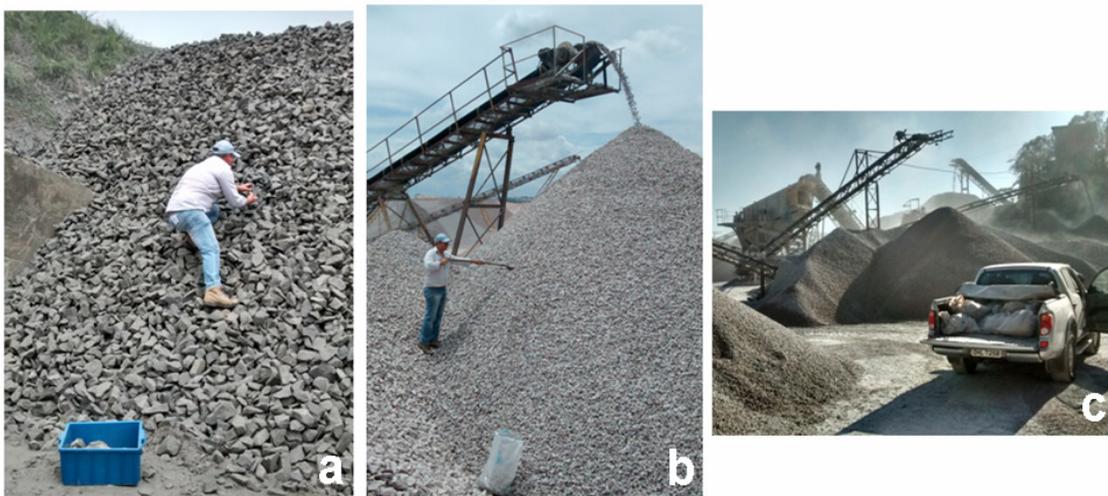


Figura 4.1 - (a, b) Amostragem de brita de graduações variadas; (c) Acondicionamento e transporte das amostras em etapas distintas de campo.

Com o objetivo de estreitar a cooperação técnico-científica entre universidade e empresas produtoras de britas, pretende-se que as informações

geradas nesta pesquisa não fiquem apenas no campo acadêmico, mas também sejam utilizadas pela próprias indústrias e sirvam como subsídio a projetos que necessitem de agregados rochosos como material de construção.

A Tabela 4.1 apresenta a relação das unidades geológicas e pedreiras onde foram coletadas as amostras. Além do material de pesquisa tentou-se, sem sucesso, obter informações e coleta de agregado em uso nos trechos onde vêm sendo feitas manutenções no lastro de ferrovias já existentes na área (para possíveis e interessantes ensaios comparativos).

Tabela 4.1 Relação de unidades geológicas, litotipos e locais de amostragem

Litotipo	Unidade Geológica	Município
Diabásio	Intrusiva Básica	Paulínia
Migmatito e gnaisse	Complexo Varginha-Guaxupé	Campinas
Granito rosa	Complexo Morungaba	Valinhos
Monzo e sienogranito	Complexo Itu	Cabreúva
Granito rosa a cinza	Granito Terra Nova	Jundiaí
Granito	Granito Tico-Tico	Cajamar
Granito	Granito Taipas	São Paulo
Granito	Granito Cantareira	São Paulo

4.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

A seleção dos ensaios tecnológicos foi realizada de acordo com as diretrizes das normas NBR-5564 (ABNT, 2011) e EN-13450 (DIN, 2013) e recomendações de Frazão (2007), direcionadas ao lastro ferroviário de pedra britada.

4.3.1 ANÁLISE PETROGRÁFICA

Foi realizada por meio de petrografia tradicional de luz transmitida. As análises seguiram as diretrizes das normas NBR 15845 - Anexo A (ABNT, 2010a) ou NBR 7389 - Parte 2 (ABNT, 2009) e DNER-IE 006 (DNER, 1994) e visaram conhecer as principais características e aspectos petrográficos e mineralógicos das rochas, destacando:

- A composição mineralógica (minerais essenciais, acessórios e secundários e suas quantidades);
- A estrutura (arranjo macroscópico) e textura (forma e arranjo dos minerais);
- O estado de alteração dos minerais (sãos ou alterados e, se alterados, tipo de alteração) e
- O grau e tipo de microfissuração (intercristalina ou intracristalina, fissuras abertas ou preenchidas).

A confecção das laminas delgadas foi feita no Laboratório de Preparação de Amostras da CPRM em Araraquara-SP e a descrição petrográfica realizada na unidade de São Paulo (capital) da referida instituição, utilizando-se equipamento marca Olympus, modelo BX51 para análise microscópica e captura de imagens.

4.3.2 ENSAIOS FÍSICO-MECÂNICOS

Os ensaios realizados encontram-se listados na Tabela 4.2. Destaca-se que, com base nas recomendações de Frazão (1993, 2012), alguns ensaios mecânicos foram realizados antes e também depois dos ensaios de alteração, com a finalidade de obter valores de controle que possibilitem uma comparação com os resultados iniciais (referência), permitindo assim relativizar a durabilidade dos agregados quando impostos às solicitações principais como lastro de ferrovia .

Grande parte dos ensaios foi realizada nos Laboratórios de Geologia de Engenharia e de Mecânica das Rochas do Departamento de Geotecnia da EESC/USP, onde se encontram todos os equipamentos e apoio técnico necessários, sendo que os ensaios de Abrasão Los Angeles que foram realizados no Laboratório de Estradas do Departamento de Engenharia de Transporte da EESC/USP.

Tabela 4.2 - Relação dos ensaios físico-mecânicos e normas técnicas correspondentes

Ensaio	Norma Técnica
Via Férrea - Lastro Ferroviário. Requisitos e Métodos de Ensaio. Anexo B: Determinação da massa específica aparente, da porosidade aparente e da absorção de água	NBR 5564 (ABNT, 2014)
Resistência à carga puntiforme	ISRM (1985)
Agregados - Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos **	NBR 9938 (ABNT, 2013)
Via Férrea - Lastro Ferroviário. Requisitos e Métodos de Ensaio. Anexo E: Determinação da resistência ao choque **	ABNT NBR 5564 (ABNT, 2014)
Agregado Graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles" **	NBR NM 51 (ABNT, 2001)
<i>Ensayos para determinar las propiedades mecanicas y fisicas de los áridos. Parte 1: Determinación de la resistencia al desgaste (Micro-Deval)</i>	UNE - EN 1097-1 (2011)

** Ensaios conjugados à ciclagem água-estufa

Alguns destes ensaios, particularmente as determinações das resistências ao esmagamento e 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.

Quanto ao ensaio Micro-Deval, apesar de não ser recomendado pelas normas brasileiras, é um importante ensaio e obrigatório pela norma europeia EN 13450 (DIN, 2013). A intenção de realizar este ensaio foi devido ao tipo de solicitação imposta ao lastro de ferrovias de alta velocidade. Como ainda não

existem ferrovias deste tipo no Brasil, e na Europa este ensaio é uma exigência para tal finalidade, configurou-se como oportuna a realização do mesmo em cooperação científica com pesquisadores do Laboratório de Engenharia Civil do Centro de Ciência e Tecnologia (LECIV/CCT) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF, Campos de Goitacazes).

4.3.2.1 Massa específica aparente, porosidade aparente e da absorção de água.

Os valores dos índices físicos (massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água) foram determinados com base no Anexo B da norma NBR 5564 (ABNT, 2014), que preconiza para cada tipo de rocha a utilização de 10 amostras de rocha com 5 a 7cm de diâmetro.

4.3.2.2 Resistência à carga puntiforme

Para utilização de rochas como material de construção (agregados) é fundamental o conhecimento da resistência das rochas aos esforços compressivos. No presente estudo, adotou-se o Índice de Carga Pontual (Is) o qual pode ser utilizado para se estimar a valor da resistência à compressão uniaxial (σ_c ou q_u), 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 classificadas de acordo com a Tabela 4.3.

Com medidas prévias de diâmetro e altura realizadas com paquímetro com precisão de 0,01cm, 20 fragmentos de cada material estudado foram rompidos pela aplicação de uma carga concentrada a partir de duas ponteiros cônicas de um equipamento simples, possuindo manômetro com precisão de 1 kgf/cm² (Figura 4.2). As fórmulas utilizadas seguiram as diretrizes das normas D5731 (ASTM, 2008) e (ISRM, 1985), sendo que 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:

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

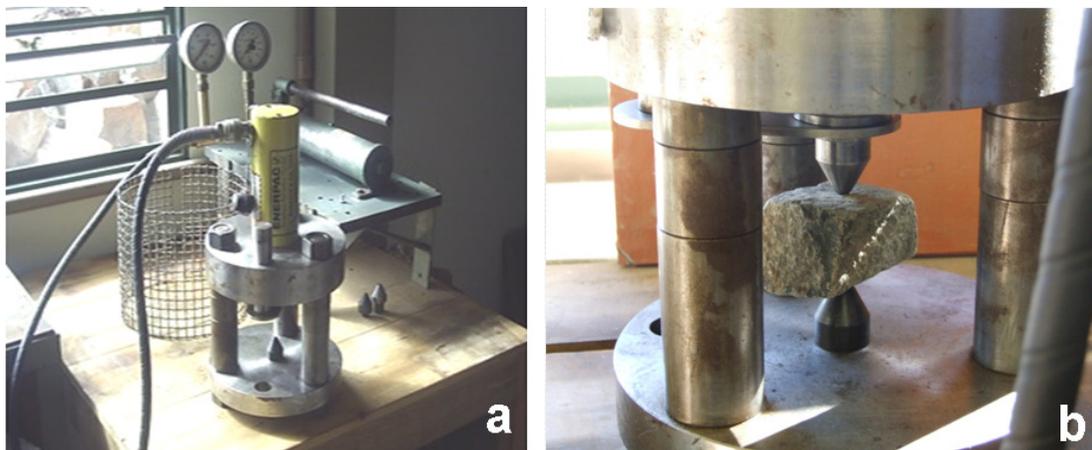


Figura 4.2 - (a) Equipamento simples e portátil utilizado na determinação da resistência à compressão puntiforme; (b) Observar ponteiros cônicos em contato com corpo de prova (amostra irregular) de rocha. Laboratório de Geologia de Engenharia do Departamento de Ge Geotecnia da EESC/USP.

Tabela 4.3 - Classificação do índice de resistência à compressão puntiforme (BROCH & FRANKLIN, 1972).

I_{s50} (MPa)	Classificação de resistência
< 0,03	Extremamente baixa
0,03 - 0,1	Muito baixa
0,1 - 0,3	Baixa
0,3 - 1,0	Média
1,0 - 3,0	Alta
3,0 - 10,0	Muito alta
> 10,0	Extremamente alta

4.3.2.3 Resistência ao esmagamento

De acordo com as diretrizes da norma NBR 9938 (ABNT, 2013), o ensaio de esmagamento foi executado em um conjunto de fragmentos de diâmetro entre 12,7 e 9,5mm, com uma massa pré-compactada (M_i) num cilindro de aço rígido (Figura 4.4), submetido a compressão por meio de um êmbolo até alcançar uma carga de 40 toneladas, a uma velocidade de 4 toneladas por minuto. Após o ensaio, uma massa (M_f) foi determinada por peneiramento numa malha de abertura 2,4mm. O resultado é fornecido em porcentagem de material desagregado, ou melhor, em função do material passante na peneira de 2,4mm.



Figura 4.3 - (a) Cilindro de aço com amostra sendo submetido à compressão em prensa servo-controlada; (b) aspecto da amostra após o ensaio de esmagamento. Laboratórios de Mecânica das Rochas do Departamento de Geotecnia da EESC/USP. Detalhes do equipamento encontram-se descritos no item 3.4.3

4.3.2.4 Resistência ao choque

O ensaio de resistência ao choque no equipamento Treton é regido pelas diretrizes do Anexo E da norma NBR 5564 (ABNT, 2014). Os corpos de prova são compostos por 60 fragmentos entre 19 mm e 16 mm de granulometria, divididos em 3 conjuntos de 20 fragmentos cada. Um soquete cai de uma altura de 39,37cm, sobre o material previamente colocado em um cilindro oco (Figura 4.4) . Após 10 quedas do soquete, o material retido na peneira com abertura de 1,7mm é pesado. A diferença entre a massa inicial (P_i) e a massa final (P_f) dividida pela massa inicial é a perda ao choque do material (RIT).

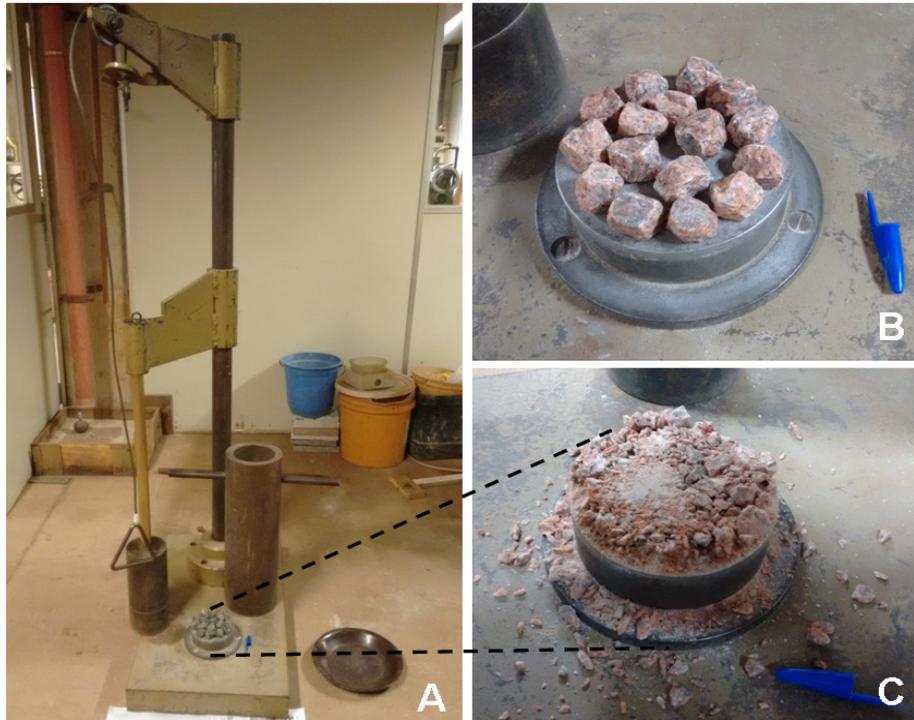


Figura 4.4 - (a) Equipamento Treton; (b) e (c) Detalhes exibindo, respectivamente, conjunto de amostras antes e depois dos impactos do soquete. Laboratório de Geologia de Engenharia do Departamento de Geotecnia da EESC/USP.

4.3.2.5 Abrasão Los Angeles

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 concebido para agregados miúdo e graúdo.

Com base nas diretrizes das normas NM 51 (ABNT, 2001) e EN-13450 (DIN, 2013), adotaram-se partículas com granulometria entre 50,8 mm e 25,4 mm (gradação F) por representarem condições similares às normatizadas para finalidade de uso como lastro de ferrovia. As informações gerais do equipamento e dos procedimentos de ensaio são apresentadas na Tabela 4.4 e ilustradas na Figura 4.5.

Tabela 4.4 - Procedimentos e aberturas para os ensaios Los Angeles, agregado graúdo (lastro de ferrovia)

Procedimentos de ensaio	
Granulometria do agregado	25,4 – 50,8 mm
Gradação	F; < 38,1mm: 5.000 ± 50g; > 38,1mm: 5.000 ± 25g
Porção de teste	10.000 ± 200g
Número de esferas	12
Massa total das esferas	5.000 ± 25g
Água	Não
Velocidade do tambor	32 ± 1rpm
Rotações (tempo)	1.000 (30 minutos)
Retido na peneira para o cálculo do	1,6 mm
Equipamento	
Diâmetro interno do tambor	700 mm
Comprimento interno do tambor	500 mm
Diâmetro de cada esfera	48 mm
Massa de cada esfera	390 - 445 g



Figura 4.5 - Procedimentos para preparação das amostras (gradação F) para determinação da resistência à Abrasão Los Angeles: (a,b) Pesagem das alíquotas com granulometria 50,8-38,1mm e 38,1-25mm, respectivamente; (c) Equipamento de ensaio e (d) Fração de alguns dos materiais ensaiados passante na #1,9mm. Laboratórios de Geologia de Engenharia do Departamento de Geotecnia e de Estradas do Departamento de Engenharia de Transporte da EESC/USP.

4.3.2.6 Ensaio de abrasão "Micro-Deval"

Os ensaios Micro-Deval (MD), considerados como pilotos na presente pesquisa, avaliam a durabilidade e a resistência à abrasão dos materiais por meio do contato entre as amostras e pequenas esferas de aço, na presença de água (COSTA et al., 2016). Foram realizados nas dependências do Laboratório de

Engenharia Civil do Centro de Ciência e Tecnologia (LECIV/CCT) da UENF (Campos-RJ).

Com base nas diretrizes da norma EN 1097-1 (UNE, 2011), em cada ensaio 500 g de material saturado nas granulometrias entre 10 e 14mm foram submetidos à fricção com 5000 g de carga abrasiva, constituída por esferas de aço com diâmetro aproximado de 10 mm e 2,5 l de água, no interior de um cilindro com tampo estanque (Figura 4.6). Este cilindro foi então colocado sobre dois suportes que o fez rodar a cerca de 100 rpm durante 120 minutos.

Considera-se o coeficiente Micro-Deval (MDE) correspondente à percentagem da amostra inicial reduzida a uma dimensão inferior a 1,6mm depois da conclusão do ensaio, obtido pela Equação 3:

$$M_{DE} = (500 - m)/5 \quad (3)$$

Onde: m é a massa amostra retida na peneira 1,6 mm, em gramas.

Em linhas gerais, um valor menor de MDE indica uma melhor resistência ao desgaste.

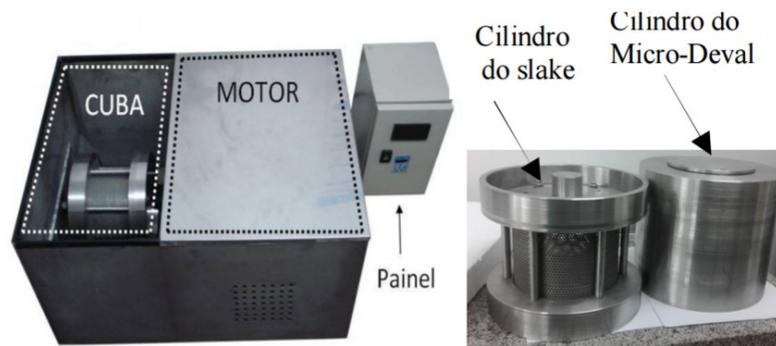


Figura 4.6 - Equipamento para ensaios de durabilidade e Micro-Deval - Laboratório de Engenharia Civil do Centro de Ciência e Tecnologia (LECIV/CCT) da UENF. Fonte: Costa et al. (2016).

4.3.3 ENSAIOS DE ALTERAÇÃO ACELERADA

Para se obter informações pertinentes à seleção de materiais levando-se em conta a exeqüibilidade dos experimentos e o cronograma disponível, foram realizados estudos de alteração acelerada em duas condições:

- Determinação da resistência à intempérie - Anexo C da NBR 5564 (ABNT, 2014) e
- Saturação em água e secagem em estufa - NBR 12696 (ABNT, 1992).

4.3.3.1 Determinação da resistência à intempérie

Estes ensaios de resistência à intempérie permitem observar a susceptibilidade da rocha a processos onde há presença de argilominerais expansivos para o caso de ambientes tropicais, diferentemente da Europa onde se sugere este ensaio como auxiliar nos resultados dos ciclos de congelamento e degelo.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Química Ambiental (LQA) do Instituto de Química de São Carlos (IQSC-USP), com base nas diretrizes das normas NBR 5564 – Anexo C (ABNT, 2011) e C88 (ASTM, 2013), esta última utilizada na adequação das recomendações para preparação da solução de sulfato de sódio e, principalmente, ao controle da sua temperatura e densidade no decorrer dos ensaios (ver Figura 4.7).

Os 10 CPs com massa entre 100 e 200g necessários aos experimentos foram coletados aleatoriamente nas amostras obtidas diretamente nas pilhas de britagem das pedreiras visitadas. A solução de sulfato de sódio foi preparada dissolvendo-se entre 225 e 250g de sulfato de sódio anidro de modo que, com temperatura entre 25°C e 30°C, assegurasse tanto a saturação como a presença de excesso de cristais na solução, após a preparação. Depois de prontas, as soluções foram esfriadas à temperatura de $21 \pm 1^\circ \text{C}$ em incubadora apropriada sendo mantidas nesta temperatura por 48 horas antes da realização dos ensaios. No momento da utilização e no decorrer dos experimentos, as soluções foram vigorosamente agitadas, com seu monitoramento contínuo garantindo a densidade da solução saturada em sulfato de sódio anidro entre 1,151 e 1,174.

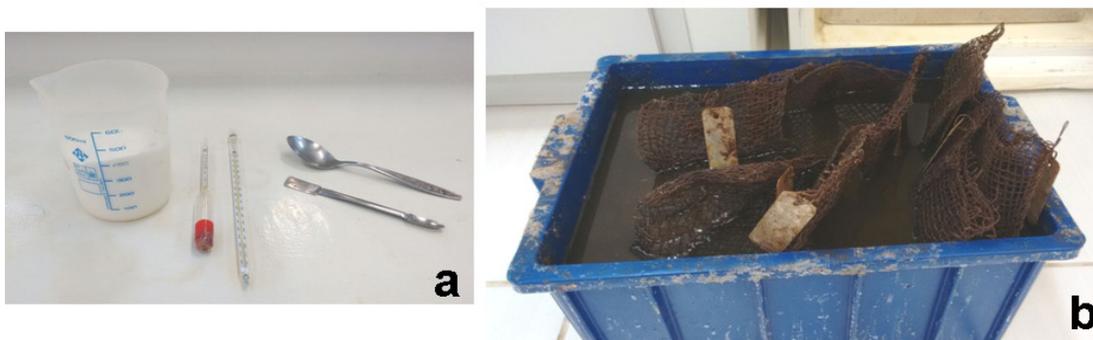


Figura 4.7 - (a) Acessórios e insumos (becker, reagente, espatula/colher, densímetro, termômetro) utilizados na preparação e monitoramento da solução de sulfato de sódio; (c) Recipientes com amostras das rochas imersas em solução de sulfato de sódio. Laboratório de Química Ambiental (LQA) do Instituto de Química de São Carlos (IQSC/USP).

Seguindo-se os termos da norma NBR 12696 (ABNT, 1992) para avaliação qualitativa das amostras (ver Tabela 4.5), foram efetuados exames visuais dos CPs (com registros fotográficos) após cada 10 ciclos, para verificação de eventuais danos (fissuras, trincas, escamações, oxidação, desagregação, etc.). Ao final dos 40 ciclos, todos os CPs foram lavados, secos em estufa (100 ± 5)°C e pesados.

Tabela 4.5 - Termos adotados na inspeção visual dos CPs. Fonte: NBR 12696 (ABNT, 1992).

Termo	Definição
Desintegração	Perda de coesão dos grãos da rocha associada, ou não, à alteração.
Fissuração	Formação de descontinuidades em uma face do agregado
Rachadura	Extensão da fissuração por mais de uma dimensão do fragmento
Lasqueamento	Partição do fragmento através de rachaduras. A ocorrência de lasqueamento generalizado pode ser referida como fragmentação.

Nota – Como os últimos 3 termos são passíveis de julgamentos subjetivos, foram empregados seqüencialmente, considerando-se que fissurações dão origem a rachaduras e, posteriormente, a lasqueamento e fragmentação.

A resistência à intempérie R_i (Equação 4) foi calculada pela relação entre os pesos inicial e final dos CPs submetidos aos ensaios, expressa em % de material desagregado (perdas):

$$R_i = [(M_i - M_f) / M_i] \times 100 \quad (4)$$

Onde: M_i massa inicial dos CPs e M_f massa final dos CPs.

4.3.3.2 Saturação em água e secagem em estufa

De acordo com as recomendações da norma NBR 12696 (ABNT, 1992), que se encontra em atualização, os ensaios de saturação em água e secagem em estufa foram realizados nos laboratórios da CPRM/Araraquara.

Estes ensaios consistiram em saturar cerca de 50 fragmentos de rocha, passantes na peneira de abertura de 76 mm e retidas em peneira com abertura de 19 mm, com água por cerca de 10 a 14 horas e secagem em estufa a $105^\circ \pm 5^\circ$ por cerca de 8 horas, onde foi observada a perda de massa após 120 ciclos de saturação e secagem (Figura 4.8).

Além das amostras padrão preconizadas pela norma destaca-se que, seguindo-se as recomendações de Frazão (1993, 2012), também se utilizou amostras com as especificações de volume e tamanho dos ensaios Abrasão Los Angeles, Treton e Esmagamento, que após os 120 ciclos foram novamente submetidos aos respectivos ensaios, de forma a balizar a sua resistência antes e pós ciclagem.

Destaca-se aqui o manuseio de uma quantidade expressiva de material (brita) no decorrer dos ensaios de ciclagem: aproximadamente 200kg de material ensaiados durante 4 meses.



Figura 4.8 - (a) Conjunto das amostras submetidas à imersão em água e (b) secagem em estufa a 100°C. Laboratório da CPRM/Araraquara.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CONTEXTO GEOLÓGICO E PETROGRAFIA DAS ROCHAS ESTUDADAS

Com base na literatura consultada e dados das análises petrográficas realizadas, seguem informações pertinentes a cada unidade geológica. Destaca-se que as fichas de descrição petrográfica encontram-se no APÊNDICE A.

5.1.1 INTRUSIVAS BÁSICAS

As soleiras ocorrem intrudidas nos sedimentos paleozóicos, especialmente as formações Irati e Itararé, com espessuras que variam, normalmente, de 2 a 200 metros, tendo sido descritas seções de até 1.000 metros. Esta unidade é basicamente composta pelos equivalentes intrusivos das rochas vulcânicas, sendo representada geralmente por soleiras e diques de diabásio, podendo ocorrer, em algumas localidades, dioritos e microdioritos pórfiros, lamprófiros, andesitos, monzonitos pórfiros e traquiandesitos (ALMEIDA et al., 1986, MELFI, PICIRILLO, NARDI, 1988; MARQUES, ERNESTO, 2004).

A representação desta unidade na área de trabalho se dá na forma de sills e diques máficos compostos geralmente por diabásio.

Segundo Soares (1985), o sill que ocorre na região de Paulínia representa um corpo de forma tabular com cerca de 250 metros de espessura e encontra-se encaixado nos sedimentos da Bacia do Paraná. Nesta unidade foi visitada uma pedreira que explora este material há cerca de 45 anos e o comercializa como pedra britada e também onde foram coletadas as amostras deste litotipo para a presente pesquisa. A produção anual da referida empresa é de aproximadamente 1.200.000 toneladas, com uma vida útil estimada em 21 anos levando-se em conta as cavas em operação e em desenvolvimento, configurando umas das principais empresas neste segmento na região metropolitana de Campinas. A destinação dos agregados inclui obras de terraplanagem, drenagem, pavimentação e recapeamento asfáltico.

Na literatura importantes trabalhos (GUZZI, 1995; MARRANO, PARAGUASSÚ, 1998; GOMES, 2001; MACHADO et al., 2007) destacam que este tipo de rocha, apesar de apresentar elevada resistência a solicitações físicas, tem uma expressiva susceptibilidade ao intemperismo. Assim, a caracterização deste material para uso como lastro é de extrema importância, pois como já foi comentado o lastro se faz em arranjo exposto as ações do intemperismo, de forma a ser um material drenante

o que acelera os processos de hidrólise principalmente nos feldspatos, diferentemente de seus usos tradicionais em pavimentação e concreto onde são reconhecidamente um dos melhores agregados. Também cabe ressaltar da importância da petrografia nestes litotipos, que podem conter constituintes deletérios (amorfos) como vidro vulcânico, que são prejudiciais em obras que envolvam concreto de cimento Portland..

Como pode ser observado na Figura 5.1a, o maciço aparenta ser bastante homogêneo, sendo que o material amostrado 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 micro-gabro (Figura 5.1b,c). 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.

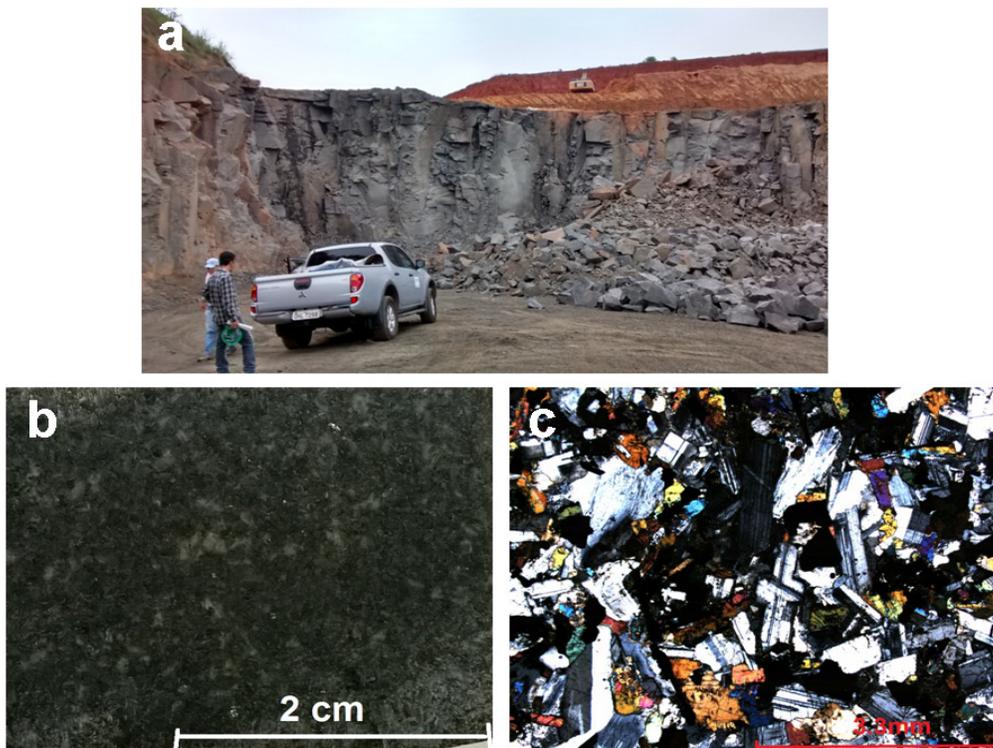


Figura 5.1 - (a) Vista panorâmica parcial de bancada de cava em desenvolvimento. Observar a homogeneidade do maciço representativo da Unidade "Intrusivas básicas", região de Paulínia; (b) Aspecto macroscópico e (c) Fotomicrografia (nicóis cruzados) do micro gabro explotado na pedreira, exibindo baixo grau de alteração (sericitização e/ou saussuritização).

5.1.2 COMPLEXO VARGINHA-GUAXUPÉ

De acordo com Hasui e Oliveira (1984), o Complexo Varginha Guaxupé corresponde a um bloco limitado a norte pela Zona de Cisalhamento Campo do Meio, a sul pela Zona de Cisalhamento Ouro Fino e a leste pelo Supergrupo Alto Rio Grande. Este termo foi aqui empregado no sentido de Schobbenhaus et al. (1984, 1991), estendendo-se a denominação para as unidades reconhecidas mais a sul por Campos Neto (1985) como a ele correlatas, no âmbito conceitual da unidade tectonoestratigráfica Nappe Socorro-Guaxupé.

A presente unidade migmatítica é caracterizada por rochas com composição granodioríticas, graníticas, sieníticas e monzoníticas em contato com corpos batolíticos de granito gnáissico anatético metaluminoso comumente porfirítico, gerado por fusão parcial in situ de estratos infracrustais (CPRM, 2009). O granito gnáissico contém enclaves de gnaiss Diorito-monzodiorítico, xenólitos de gnaiss calciossilicático e lentes de silimanita-cordierita metapelito. Ocorrem também, subordinadamente, corpos de granitóides peraluminosos.

Nesta unidade foi visitada uma pedreira ativa, localizada no município de Campinas, cuja produção em 2013 superou ligeiramente a capacidade instalada de britagem estimada em 2.000.000 ton/ano. Dados comerciais reportam quantitativos de 1.560.000 ton em 2014 e de 1.060.000 ton em 2015, refletindo a retração na economia, uma vez que a destinação principal dos agregados é a construção civil, especialmente concreto e pavimentação.

Quanto à geologia local, ocorrem principalmente ortognaisses e granitóides migmatizados, de coloração acinzentada, em geral cobertos por espesso solo de composição arenosa (argila subordinada) de coloração amarelada. Os migmatitos são compostos principalmente por plagioclásio, hornblenda, biotita e quartzo. em menor quantidade ocorrem outros minerais como apatita, microclínio e zircão. A estrutura migmatítica caracteriza-se, predominantemente, por termos nebulíticos, ocorrendo às vezes estruturas estromáticas e schlieren. Na rocha, pode-se observar diferentes intensidades de gnaissificação, responsáveis pela variação no grau de paralelismo entre as porções paleossômicas e neossômicas.

As amostras coletadas apresentam, em geral, bandamento gnáissico e/ou estrutura migmatítica marcantes. A coloração da rocha são é 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) encontram-se aos minerais máficos da rocha (Figura 5.2).

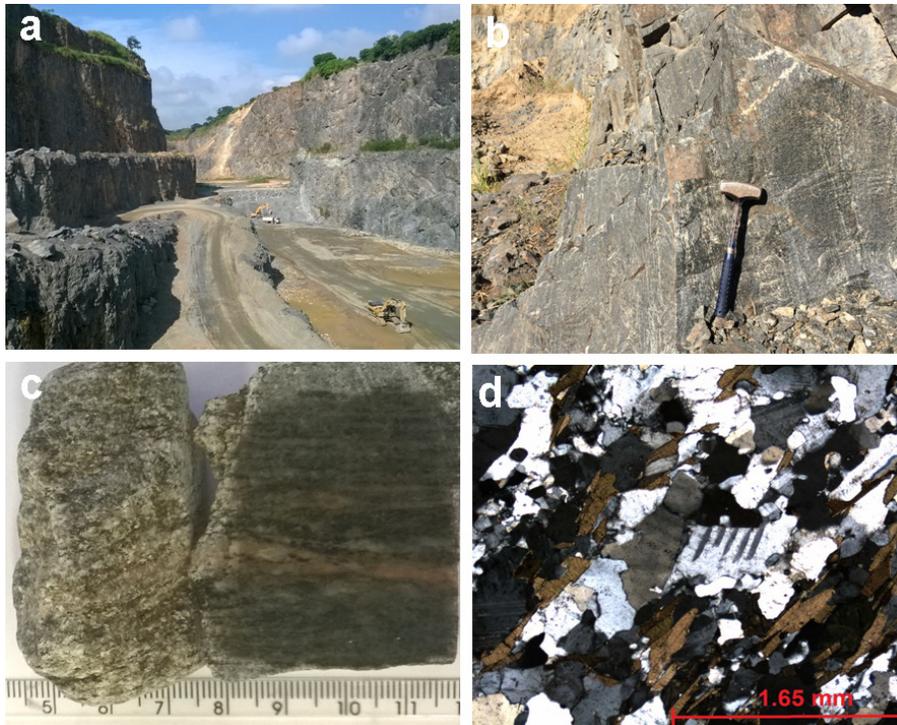


Figura 5.2 - (a) Vista panorâmica parcial de pedreira em operação no Complexo Varginha Guaxupé, região de Campinas; (b) Detalhe em bancada exibindo maciço rochoso com notável bandamento gnáissico sub-vertical; (c) Aspecto macroscópico e (d) Fotomicrografia (nicóis cruzados) dos gnaisses explotados, exibindo baixo grau de alteração (sericitização e/ou saussuritização) dos minerais feldspáticos.

5.1.3 COMPLEXO MORUNGABA

Vlach (1985) fez um mapeamento na escala 1:50.000 deste complexo, tendo sido distinguidas e reconhecidas sete unidades, com base nas características petrográficas e no mecanismo de colocação. O material estudado na presente pesquisa provem de uma pedreira ativa no município de Valinhos (Figura 5.3a), que está localizada na unidade referida como Pluton Meridional. Com capacidade instalada de 500.000 ton/ano e produção atual em torno de 380.000 ton/ano, há cerca de 50 anos esta pedreira vem ajudando a construir e desenvolver Valinhos e região, sendo que 50 a 60% do material britado (brita 1 e pó de pedra) é destinado

para concreto na construção civil e como material para empresas que produzem artefatos de cimento, além do fornecimento para empresas de materiais de construção e para pavimentação de estradas.

Vlach (1985) ainda subdividiu o Pluton Meridional em seis fácies:

- Fácies microgranítico róseo hololeucocrática (biotita muscovita granada monzogranito);
- Fácies róseo hololeucocrático de granulação média;
- Fácies róseo leucocrático de granulação média, raramente fina;
- Fácies róseo leucocrático de granulação grossa a muito grossa;
- Fácies róseo leucocrático a hololeucocrático de granulação grossa a muito grossa e porfiróide e
- Fácies róseo a acinzentado de granulação média a grossa porfiróide.

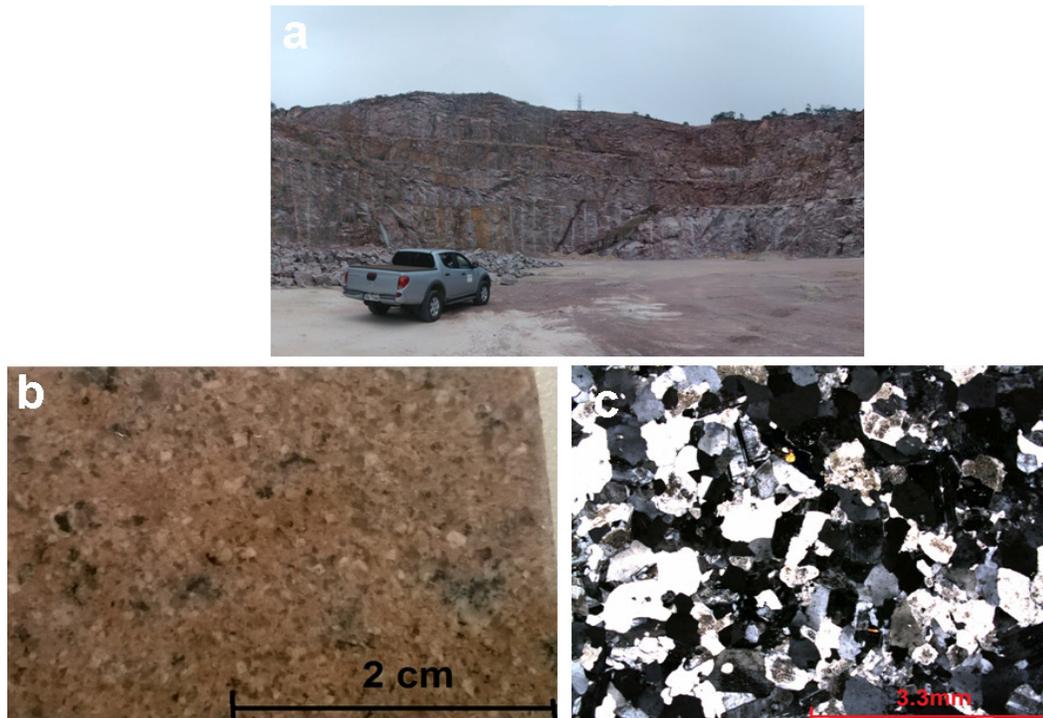


Figura 5.3 - (a) Vista panorâmica da frente de lavra em operação no Complexo Morungaba, município de Valinhos, (b) Aspecto macroscópico e (c) fotomicrografia (nicóis cruzados) dos monzogranitos explorados na pedreira, exibindo arranjo equidimensional dos minerais e baixo grau de alteração dos feldspatos.

De acordo com as descrições de Vlach (1985) o material produzido na pedreira visitada 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 a

descrição acima, sendo classificado como biotita monzogranito de granulação fina a média, entre 0,5 e 1,5mm (Figura 5.3b) 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. O grau de microfissuramento é baixo, do tipo intragranular.

5.1.4 COMPLEXO ITU

Segundo Wernick et al. (1994), o Complexo Itu é um complexo rapakivi com uma área total de 310 km² e constituído pela coalescência de quatro intrusões subcirculares a irregulares: Intrusões Salto, Intrusão Indaiatuba; Intrusão Itupeva e Intrusão Cabreúva.

A maior das intrusões, a Cabreúva, tem área de 160 km² e sua arquitetura compreende seis fácies constituídos, principalmente, por quartzo sienitos e sienogranitos e, subordinadamente, por tonalitos, granodioritos, quartzo monzonitos e monzogranitos (GALEMBECK, WERNICK, ARTUR, 1991). De acordo com os referidos autores, a Intrusão Itupeva é constituída por oito unidades petrográficas constituídas, principalmente, por sieno a monzogranitos equi a inequigranulare, porfiríticos / porfiróides e melagranitóides de composição granodiorítica, quartzo-monzodiorítica e tonalítica.

De modo geral, no Complexo Itu encontram-se em operação duas pedreiras para produção de britas e várias áreas de extração de blocos/ paralelepípedos (região de Itupeva e Itu). A pedreira que foi visitada e coletadas amostras representativas de britas posiciona-se na borda leste da intrusão Cabreúva, estando localizada geograficamente no município de Cabreúva (Figura 5.4a). Com uma produção contínua da ordem de 360.000 ton/ano, esta pedreira vem fornecendo pedra britada para a região Itu, sendo pedrisco e pó de pedra os produtos de maior demanda destinados, principalmente, para concreteiras, usinas de asfalto, pavimentação, lojas de materiais de construção e depósitos.

Quanto ao material amostrado, apresenta uma coloração rósea e, quando em porções de rocha alterada, adquire uma coloração rósea esbranquiçada. Apresenta estrutura maciça granular, com granulação grossa (entre 2 e 5 mm) e textura fanerítica equigranular, sendo classificado como monzogranito (Figura 5.5a).

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 (Figura 5.5b,c), 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.



Figura 5.4 - (a) Vista panorâmica parcial de frente de lavra em operação no Complexo Itu, município de Valinhos; (b) Coleta de amostras nas pilhas de britagem.

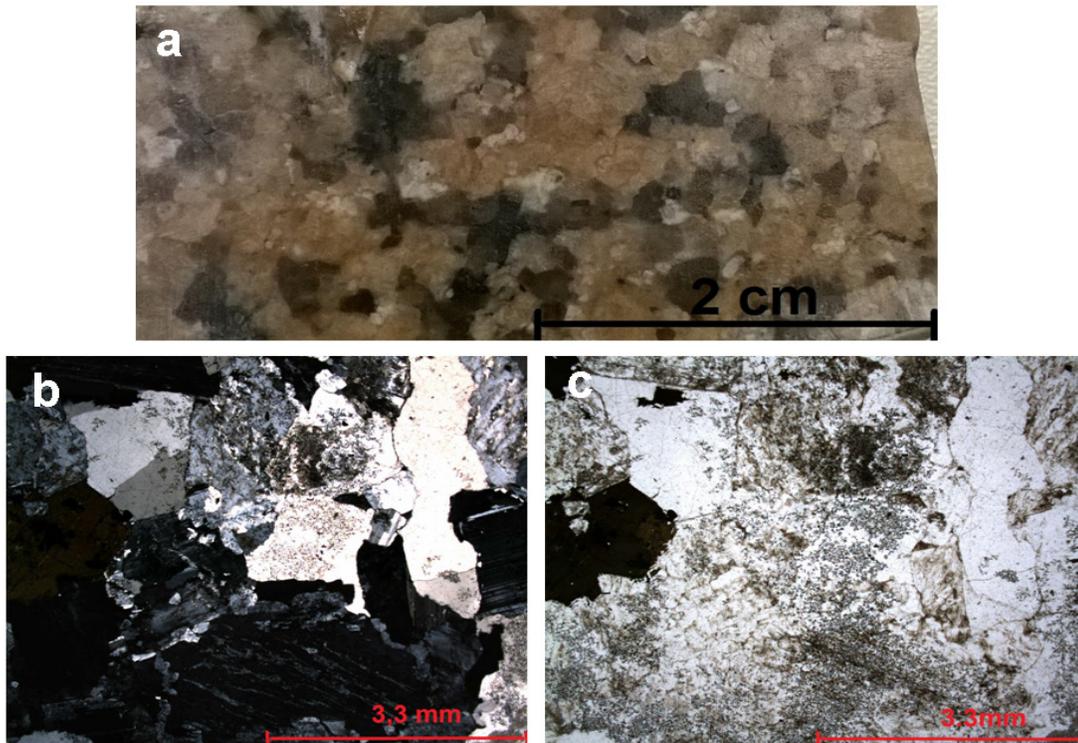


Figura 5.5 - (a) Aspecto macroscópico das rochas explotadas no Complexo Itu; (b,c) Fotomicrografias (nicóis cruzados e paralelos, respectivamente) do monzogranito exibindo granulação grossa dos minerais e alteração intempérica mais pronunciada nos feldspatos.

5.1.5 GRANITO TERRA NOVA

HASUI et al. (1978) descrevem o Granito Terra Nova como constituído de granitos cinza-claros a vermelhos com granulação fina a grossa, não foliados e de textura subidiomórfica a hipidiomórfica, e preferem chamá-lo de granitóide.

A exploração de material pétreo para produção de agregado é representada por pedreira localizada na porção leste deste maciço granítico (Figura 5.6a,b). Com uma capacidade de britagem de 900.000 ton/ano e produção atual estimada em 500.000 ton/ano, esta pedreira vem fornecendo, há décadas, pedra britada para a região de Jundiá (SP). Os produtos atuais de maior demanda são bica corrida, pedrisco e pó de pedra destinados, principalmente, para aterros, pavimentação, concreteiras e usinas de asfalto.

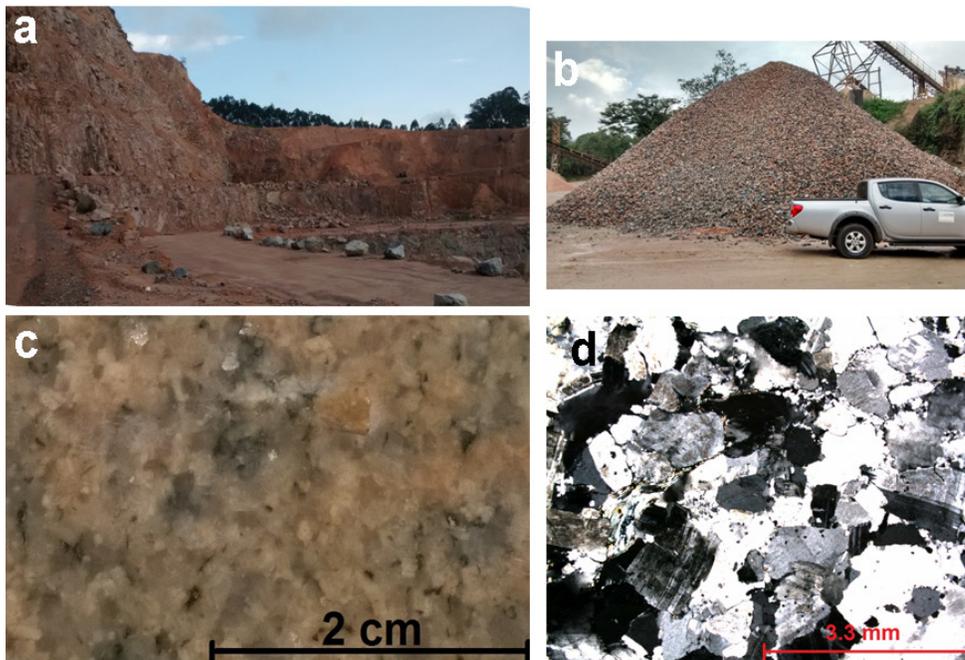


Figura 5.6 - (a) Vista panorâmica parcial de frente de lavra em operação no Granito Terra Nova, município de Jundiá; (b) Coleta de amostras na pilha de brita 3; (c) Detalhe macroscópico exibindo aspecto equigranular e (d) Fotomicrografia (nicóis cruzados) do biotita monzogranito exibindo granulação média dos minerais e alteração intempérica pouco pronunciada nos feldspatos.

De acordo com o material coletado nesta pedreira, a rocha é classificada como biotita monzogranito. A coloração da rocha sã é rósea, variando para tons mais claros quando alterada. Apresenta estrutura maciça granular, com granulação média (entre 1 e 2 mm) e textura fanerítica equigranular (Figura 5.6c,d). 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.

5.1.6 GRANITO MORRO DO TICO-TICO

Esta unidade é composta por um leucogranito, e encontra-se intrudido na unidade Serra do Itaberaba (JULIANI, BELIAVSKI, SCHORSCHER, 1986). Segundo Hasui *et al.* (1978) é constituído de rocha leucocrática, de granulação média a grossa e textura hipidiomórfica a alotriomórfica granular. Como minerais essenciais ocorrem ortoclásio perítico, quartzo e plagioclásio, em ordem decrescente de importância. Como acessórios estão presentes moscovita, biotita, granada, apatita, zircão e turmalina.

Por se tratar de um corpo ígneo relativamente pequeno e homogêneo, das duas pedreiras ativas existentes foi visitada e amostrada a pedreira situada na extremidade leste desta unidade (Figura 5.7a).

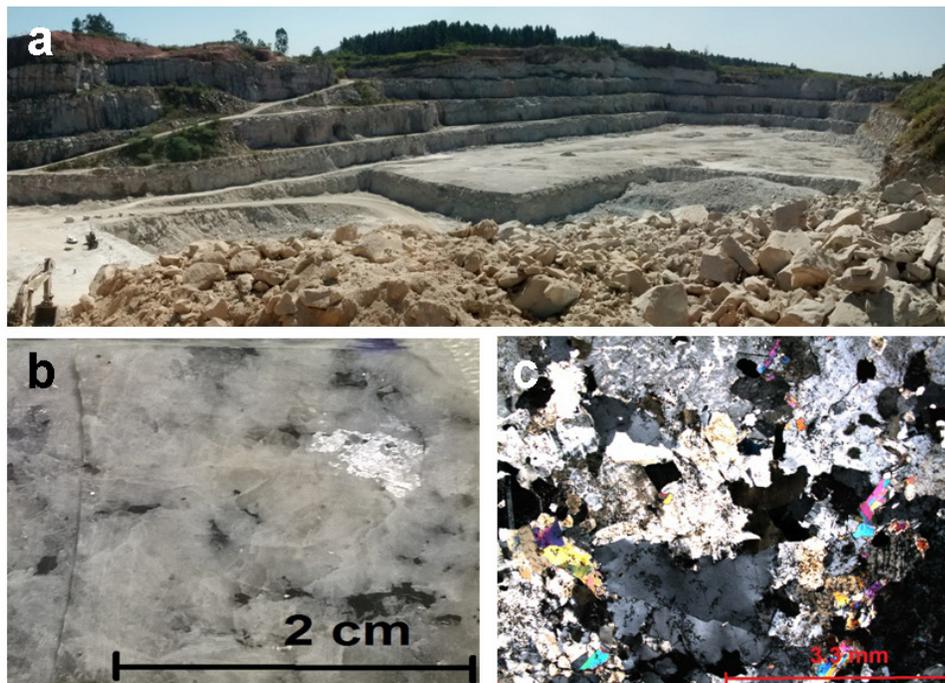


Figura 5.7 (a) Vista panorâmica parcial de frente de lavra em operação no Granito Tico Tico, município de Caieiras. (b) Detalhe macroscópico e (c) Fotomicrografia (nicóis cruzados) do biotita sienogranito explotado na pedreira, exibindo granulação grossa dos minerais e alteração intempérica mais pronunciada nos feldspatos.

O material coletado condiz a descrição acima, sendo classificado como um biotita sienogranito de granulação grossa, desde 1 até 20 mm (Figura 5.7b). A

coloração varia de branco acinzentada nas porções sãs a branco amarelado na porções mais alteradas das amostras, sendo a estrutura maciça granular e a textura fanerítica inequigranular, por vezes porfirítica. Seus minerais essenciais são microclínio (45%), quartzo (35%), plagioclásio (15%), muscovita (5%) e biotita (2%); como acessórios (2%) turmalina, apatita, zircão e granada e óxidos como minerais secundários. Em nível microscópico, exibe grau de alteração baixo a moderado, dos tipos intempérico e hidrotermal, respectivamente. O estado microfissural da rocha é pouco expressivo a moderado, mas apresenta fissuras preferencialmente intragranulares, notadamente nos megacristais de muscovita e microclínio (Figura 5.7c).

5.1.7 GRANITO TAIPAS

Dantas (1990) descreve o Maciço de Taipas com uma forma ligeiramente circular ocupando uma área de cerca de 5 km², entre os bairros de Pirituba e Perus, no município de São Paulo. Cerca de 80% do maciço é composto de rochas porfiróides, onde megacristais subidiomórficos a xenomórficos, centimétricos, esbranquiçados e subordinadamente róseos, cinza-claros ou acastanhados, dispersam-se caoticamente em uma matriz inequigranular, média a grossa, caracterizando uma textura granular hipidiomórfica a hipautomórfica. Tipos com texturas inequigranulares e equigranulares, pegmatóides ou aplíticas ocorrem subordinadamente.

Dentre as pedreiras ativas neste maciço granítico, a unidade visitada vem produzindo em torno de 1.800.000 ton/ano, com capacidade instalada de britagem de 3.000.000 ton/ano, tendo atingindo produção recorde de 2.880.000 ton em 2014. Operando há mais de 45 anos, responde atualmente por 5% do mercado de pedra britada para construção civil na Região Metropolitana de São Paulo e por 22% do mercado da região noroeste da cidade de São Paulo.

Quanto ao material amostrado, apresenta uma coloração cinza e, quando em porções de rocha alterada, adquire uma coloração cinza amarelada. Apresenta estrutura maciça granular, com granulação grossa (entre 2 e 10 mm) e textura fanerítica inequigranular, sendo classificado como biotita monzogranito (Figura 5.8). Seus minerais essenciais são quartzo (39%), plagioclásio (24%), microclínio (24%) e biotita (10%); como mineral acessório (1%) titanita e minerais secundários (2%) óxidos (associados à titanita) e sericita. Em nível microscópico,

exibe grau de alteração incipiente a baixo, do tipo intempérico. O grau de microfissuramento é baixo, principalmente do tipo transgranular / intergranular.

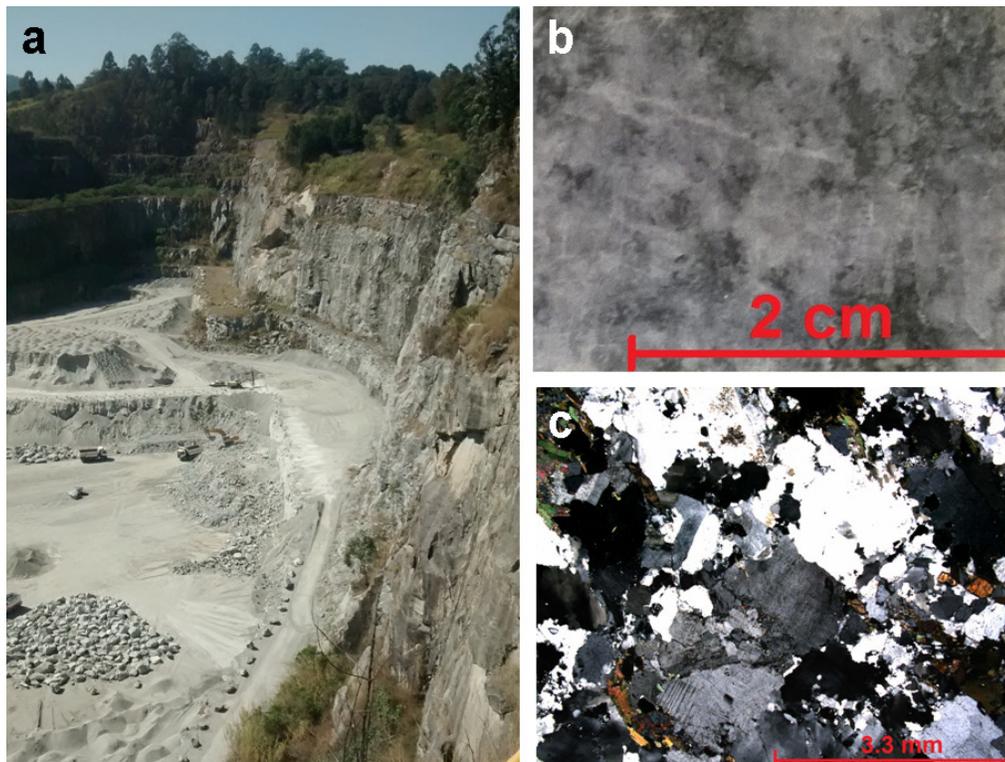


Figura 5.8 - (a) Vista panorâmica parcial da pedreira visitada no Granito Taipas, município de São Paulo; (b) Detalhe macroscópico e (c) Fotomicrografia (nicóis cruzados) do biotita monzogranito. Observar cristalinidade do microclínio, evidenciando baixo grau de alteração, bem como caráter inequigranular da rocha

5.1.8 GRANITO CANTAREIRA

Segundo Dantas (1990), compreende um corpo de forma aproximadamente triangular, alongado segundo a direção NE-SW, de dimensões batolíticas, ocupando uma área de aproximadamente 320km². Trata-se de um maciço de grande diversidade, onde a feição dominante é o seu caráter porfiróide, com megacristais subcentimétricos a centimétricos de feldspato alcalino imersos em matriz fanerítica, definindo, em geral, uma textura granular hipidiomórfica. A matriz é inequigranular, granulação média a grossa, com foliação característica dada pela orientação de biotitas. Tipos faciológicos equigranulares e inequigranulares ocorrem subordinadamente, enquanto o acúmulo localizado de megacristais pode definir feições pegmatóides . A estrutura é maciça a orientada, com claro zoneamento do centro para as bordas. Por vezes, a concentração diferencial de megacristais combinada com o fluxo primário origina tipos levemente acamadados, próximos às zonas de contato.

Dentre as várias pedreiras ativas existentes neste domínio geológico, destacam-se duas delas que estão localizadas na borda oeste e porção leste do batólito, ambas situadas no município de São Paulo, aqui denominadas CANTAREIRA OESTE e CANTAREIRA LESTE, respectivamente. Estas duas unidades possuem capacidade instalada de aproximadamente 2.820.000 t/ano, sendo as principais clientes Empreiteiras e a destinação dos agregados a construção civil, notadamente seus usos para concreto e pavimentação. Estes dois locais foram visitados (Figura 5.9) e coletadas amostras, pois se tratando do mesmo pluton, mas com variações texturais importantes, o objetivo foi estabelecer importantes informações como, por exemplo, a relação dos aspectos texturais com as resistências mecânicas e/ou alterabilidade.

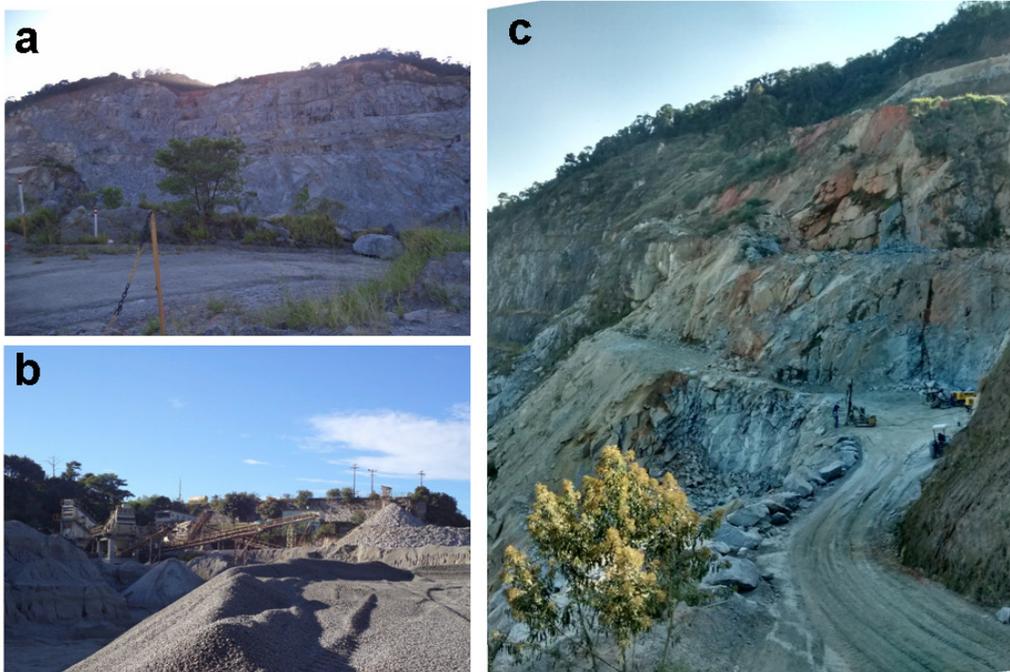


Figura 5.9 - (a) Vista panorâmica parcial da frente de lavra e (b) da planta de britagem da pedreira CANTAREIRA OESTE. Em (c) vista mostrando desenvolvimento e operação de uma das frentes de lavra da CANTAREIRA LESTE.

A rocha predominante da unidade CANTAREIRA OESTE é classificada como um sieno a monzogranito. Em amostra de mão apresenta uma coloração cinza e, quando em porções de rocha alterada, adquire uma coloração cinza amarelada. Apresenta estrutura maciça granular, com granulação grossa (até 15mm) e textura inequigranular (Figura 5.10a). Seus minerais essenciais são quartzo (40%), microclínio (35%), plagioclásio (20%) e biotita (5%); como acessórios (4%) opacos (pirita e magnetita), muscovita, zircão, apatita e epidoto e minerais secundários (1%) óxidos. Em nível microscópico, exibe grau de alteração incipiente a baixo, do tipo 90

intempérico. O grau de microfissuramento é baixo, baixo, do tipo transgranular e com microfissuras geralmente preenchidas por sericita (Figura 5.10b).

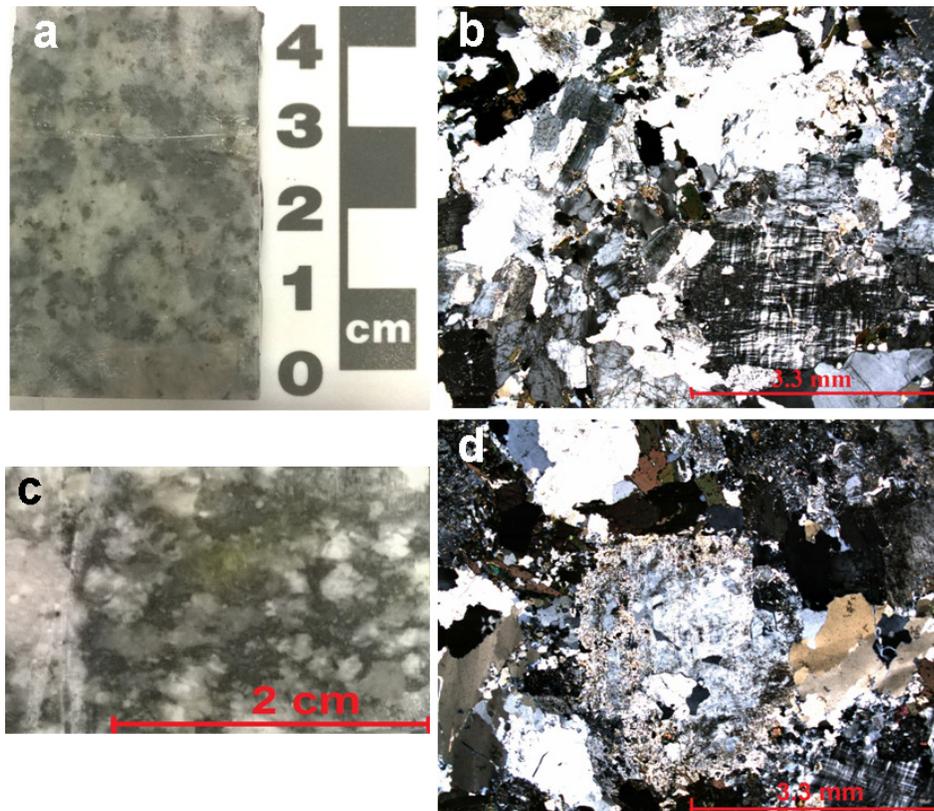


Figura 5.10 - (a) Aspecto macroscópico e (b) Fotomicrografia (nicóis cruzados) do biotita granito "CANTAREIRA OESTE", (c) Aspecto macroscópico e (d) Fotomicrografia (nicóis cruzados) do biotita granito "CANTAREIRA LESTE". Notar alteração mais intensa e aspecto poiquilítico (saussuritização) nos cristais de plagioclásio e sericitização dos feldspatos alcalinos.

Na unidade CANTAREIRA LESTE a rocha amostrada é classificada como um biotita sienogranito, de cor cinza a cinza amarelada, quando alterada. Apresenta estrutura maciça granular, com granulação grossa (2 mm até maior que 10 mm, nos cristais de microclínio) e textura inequigranular (Figura 5.10c). Em amostra de mão, exibe grau de alteração incipiente a baixo, sendo os minerais observáveis o olho nu quartzo, plagioclásio, feldspato alcalino, biotita e opacos (magnetita). Destaca-se a presença da biotita dando uma coloração amarela esverdeada em algumas porções da amostra. Microscopicamente, observam-se baixo grau de alteração (do tipo intempérico) e de microfissuramento (do tipo intragranular), com a seguinte estimativa em termos de composição mineralógica: minerais essenciais são microclínio (45%) quartzo (35%), plagioclásio (10%) e biotita (5%); como acessórios (3%) titanita euédrica, muscovita e zircão e minerais secundários (3%) óxidos, sericita

e epidoto. Observou-se que os minerais opacos encontram-se associados à titanita e ou biotita, enquanto que fenômenos de exsolução, bem como de saussuritização e sericitização, são evidentes e, por vezes, bastante avançados nos feldspatos (Figura 5.10d).

5.1.9 SÍNTESE DAS ANÁLISES PETROGRÁFICAS

As rochas estudadas se relacionam a um tipo metamórfico (gneisse-migmatito), a um litotipo básico classificado como microgabro e sete diferentes granitóides que variam, principalmente, em proporções da composição mineralógica, granulação e cor, sendo que os minerais essenciais são o quartzo, plagioclásio e feldspato alcalino (Tabela 5.1). De acordo com o diagrama QAP de Streckeisen (1976) são classificados essencialmente como sieno, sieno a monzo e monzogranitos, como pode ser visto na Figura 5.11.

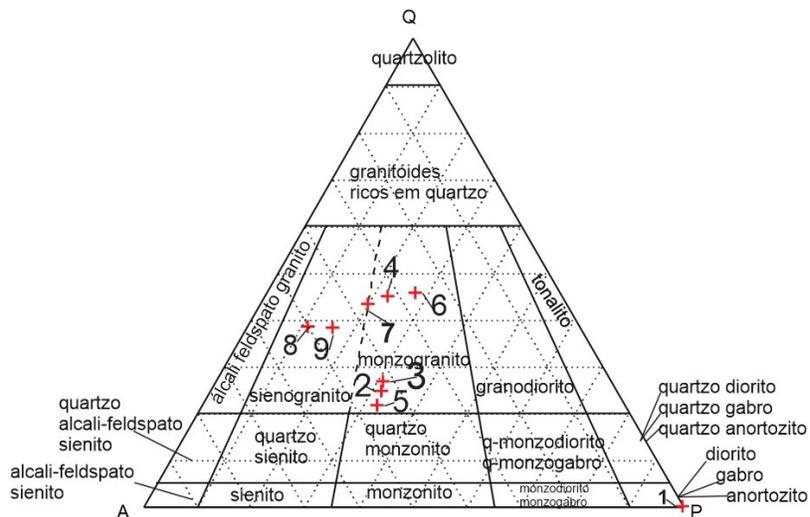


Figura 5.11 - Classificação das rochas estudadas segundo Streckeisen (1976): 1 Intrusivas básicas, 2: Complexo Varginha Guaxupé, 3: Granito Morungaba, 4: Granito Itu, 5: Granito Terra Nova, 6: Granito Taipas, 7: Granito Cantareira Oeste, 8-CAN-L- Granito Cantareira Leste, 9-TIC- Granito Tico-Tico.

Pode ser observado na petrografia que o grau de alteração, tanto intempérico quanto hidrotermal (quando presente), não são muito avançados o que permitiu classificar estas amostras com baixo grau de alteração (localmente moderado) e considerar, com relação ao intemperismo, como rochas sãs. Esta condição retrata fielmente o verificado em campo e nas exposições (bancadas) dos maciços rochosos, lembrando que todas as amostras foram coletadas diretamente nas pilhas de britagem de várias pedreiras que explotam os respectivos

materiais pétreos com demandas fortemente consolidadas no mercado da construção civil, preferencialmente concreto e pavimentação.

As análises macro e especialmente microscópica permitiram estabelecer algumas correlações com os valores dos índices físicos apresentados no item 5.2 (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, inequigranular, equigranular e porfírica.

Tabela 5.1 - Sumário das características petrográficas das rochas estudadas

Rocha	Cor	Granulação	Estrutura	Textura	Estado microfissural	Mineralogia Essencial (%)						
						Qz	Pl	Fk	Bt/M	Px	Hb	Op
BAS (Micro-gabro)	Cinza escuro (S) a amarelo escuro (A)	F (0,5 a 1,5mm)	Maciça	Equigranular	Grau baixo do tipo intragranular	-	46	-	-	36	-	16
CVG (Gnaiss)	Cinza (S) a cinza esbranquiçado (A)	F (0,5 a 1,5mm)	Bandamento	Inequigranular fina	Preferencialmente intragranular	24	29	39	5	-	-	-
MOR (Monzogranito)	Rosa	F-M (0,5 a 1,5mm)	Maciça	Equigranular	Intragranular	25	29	39	6	-	-	-
ITU (Monzogranito)	Rosa (S) a rosa esbranquiçado (A)	G (2 a 5mm)	Maciça	Equigranular	Intragranular	40	20	30	2	-	5	-
TNO (Monzogranito)	Rosa (S) a rosa claro (A)	M (1 a 2mm)	Maciça	Equigranular	Intergranular	20	30	42	6	-	-	-
TIC (Sienogranito)	Branco acinzentado (S) a amarelado (A)	G (1 a > 20mm)	Maciça	Inequigranular (Porfirítica)	Intragranular	34	14	43	7	-	-	-
TAI (Bt monzogranito)	Cinza (S) a cinza amarelado (A)	G (2 a 10mm)	Maciça	Inequigranular	Transgranular a intergranular	39	24	24	10	-	-	-
CAN-O (Bt sienogranito)	Cinza (S) a cinza amarelado (A)	G (até 15mm)	Maciça	Inequigranular	Transgranular	40	20	35	5	-	-	-
CAN-L (Monzogranito)	Cinza (S) a cinza amarelado (A)	G (2 a > 10mm)	Maciça	Inequigranular	Intragranular	35	10	45	5	-	-	-

LEGENDA: BAS- Intrusivas básicas, CVG- Complexo Varginha Guaxupé, MOR- Granito Morungaba, ITU- Granito Itu, TNO- Granito Terra Nova, TIC- Granito Tico-Tico, TAI- Granito Taipas, CAN-O- Granito Cantareira Oeste, CAN-L- Granito Cantareira Leste; S- Rocha sã, A- Rocha Alterada; F- fina, M- Média, G- Grossa; Qz- Quartzo, Pl- Plagioclásio, FK- Feldspato alcalino, Bt/M- Biotita Muscovita, Px - Piroxênio, Hb- Hornblenda, Op- Minerais opacos.

5.2 ÍNDICES FÍSICOS

Os dados de massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água foram determinados com base nos ensaios normatizados com 10 corpos de prova de dimensões aproximadas de 5cm e geometria irregular, os quais foram retirados aleatoriamente nos sacos de amostras de agregados coletados diretamente nas pilhas de britagem das pedreiras instaladas nas 8 unidades geológicas estudadas.

5.2.1 INTRUSIVAS BÁSICAS

As massas e resultados individuais dos ensaios realizados nos corpos de prova (CP) de micro-gabro, bem como os valores de massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Dados e resultados de ensaios para determinação da massa específica aparente, da porosidade aparente e da absorção de água do micro-gabro (Unidade "Intrusivas Básicas").

CP	m_{SEC} (g)	m_{SAT} (g)	m_{SUB} (g)	ρ_a (kg/m ³)	η_a %	α_a %
1	150,28	150,77	100,37	2.982	0,97	0,33
2	171,76	172,14	114,69	2.990	0,66	0,22
3	110,96	111,24	74,35	3.008	0,76	0,25
4	135,34	135,79	90,49	2.988	0,99	0,33
5	151,27	151,57	101,42	3.016	0,60	0,20
6	135,79	136,28	90,77	2.984	1,08	0,36
7	129,81	130,13	86,82	2.997	0,74	0,25
8	148,36	148,62	99,13	2.998	0,53	0,18
9	145,70	146,00	97,46	3.002	0,62	0,21
10	126,78	127,13	84,83	2.997	0,83	0,28
Média	140,61	140,97	94,03	2.996	0,78	0,26

Legenda: CP: corpo de prova; m_{SEC} : massa seca; m_{SAT} : massa saturada; m_{SUB} : massa submersa; ρ_a : massa específica aparente; η_a : porosidade aparente; α_a : absorção de água. Anexo B - NBR5564 (ABNT, 2014).

Os resultados obtidos para o micro-gabro (Unidade "Intrusivas Básicas") foram: massa específica aparente 2.996 kg/m³, porosidade aparente 0,78 % e absorção de água 0,26%.

5.2.2 COMPLEXO VARGINHA-GUAXUPÉ

De acordo com a Tabela 5.3, os resultados obtidos para o gnaisse da Unidade "Complexo Varginha-Guaxupé" foram: massa específica aparente 2.755 kg/m³, porosidade aparente 0,72 % e absorção de água 0,26%.

5.2.3 COMPLEXO MORUNGABA

De acordo com a Tabela 5.4, os resultados obtidos para o monzogranito de granulação fina a média da Unidade "Complexo Morungaba" foram: massa específica aparente 2.620 kg/m³, porosidade aparente 0,85 % e absorção de água 0,32%.

Tabela 5.3 - Dados e resultados de ensaios para determinação da massa específica aparente, da porosidade aparente e da absorção de água de gnaisse do Complexo Varginha Guaxupé.

CP	m _{SEC} (g)	m _{SAT} (g)	m _{SUB} (g)	ρ_a (kg/m ³)	η_a %	α_a %
1	97,52	97,61	64,00	2.902	0,27	0,09
2	82,13	82,37	51,97	2.702	0,79	0,29
3	99,54	99,84	63,78	2.760	0,83	0,30
4	92,13	92,15	58,71	2.755	0,06	0,02
5	88,77	88,93	57,41	2.816	0,51	0,18
6	102,92	103,95	65,40	2.670	2,67	1,00
7	83,76	83,92	53,52	2.755	0,53	0,19
8	90,07	90,23	57,45	2.748	0,49	0,18
9	230,55	230,92	146,58	2.734	0,44	0,16
10	99,30	99,53	62,93	2.713	0,63	0,23
Média	106,67	106,95	68,18	2.755	0,72	0,26

Legenda: : CP: corpo de prova; m_{SEC}: massa seca; m_{SAT}: massa saturada; m_{SUB} : massa submersa; ρ_a : massa específica aparente; η_a : porosidade aparente; α_a : absorção de água. Anexo B - NBR5564 (ABNT, 2014).

Tabela 5.4 - Dados e resultados de ensaios para determinação da massa específica aparente, da porosidade aparente e da absorção de água de monzogranito fino a médio do Complexo Morungaba.

CP	m _{SEC} (g)	m _{SAT} (g)	m _{SUB} (g)	ρ_a (kg/m ³)	η_a %	α_a %
1	137,18	137,53	85,42	2,633	0,67	0,26
2	152,60	153,00	94,74	2,619	0,69	0,26
3	87,84	88,08	54,90	2,647	0,72	0,27
4	184,40	185,60	114,22	2,583	1,68	0,65
5	108,41	108,75	67,35	2,619	0,82	0,31
6	125,98	126,37	78,36	2,624	0,81	0,31
7	160,68	161,17	99,70	2,614	0,80	0,30
8	100,02	100,32	62,17	2,622	0,79	0,30
9	198,68	199,09	123,27	2,620	0,54	0,21
10	112,71	113,12	70,05	2,617	0,95	0,36
Média	136,85	137,30	85,02	2,620	0,85	0,32

Legenda: CP: corpo de prova; m_{SEC}: massa seca; m_{SAT}: massa saturada; m_{SUB} : massa submersa; ρ_a : massa específica aparente; η_a : porosidade aparente; α_a : absorção de água. Anexo B - NBR5564 (ABNT, 2014).

5.2.4 COMPLEXO ITU

De acordo com a Tabela 5.5, os resultados obtidos para o monzogranito de granulação grossa da Unidade "Complexo Itu" foram: massa específica aparente 2.638 kg/m³, porosidade aparente 0,59 % e absorção de água 0,22 %.

Tabela 5.5 - Dados e resultados de ensaios para determinação da massa específica aparente, da porosidade aparente e da absorção de água do monzogranito grosso do Complexo Itu.

CP	m _{SEC} (g)	m _{SAT} (g) (g)	m _{SUB} (g) (g)	ρ_a (kg/m ³)	η_a %	α_a %
1	267,44	267,98	166,5	2.635	0,53	0,20
2	211,01	211,65	131,52	2.633	0,80	0,30
3	172,83	173,15	107,57	2.635	0,49	0,19
4	155,94	156,28	97,24	2.641	0,58	0,22
5	174,29	174,76	108,55	2.632	0,71	0,27
6	218,33	218,74	135,94	2.637	0,50	0,19
7	228,36	228,91	142,18	2.633	0,63	0,24
8	159,65	160,03	99,94	2.657	0,63	0,24
9	206,48	206,84	128,76	2.644	0,46	0,17
10	285,32	285,94	177,61	2.634	0,57	0,22
Média	207,965	208,428	129,581	2.638	0,59	0,22

Legenda: CP: corpo de prova; m_{SEC}: massa seca; m_{SAT}: massa saturada; m_{SUB} : massa submersa; ρ_a : massa específica aparente; η_a : porosidade aparente; α_a : absorção de água. Anexo B - NBR5564 (ABNT, 2014).

5.2.5 GRANITO TERRA NOVA

De acordo com a Tabela 5.6, os resultados obtidos para o biotita monzogranito de granulação média da Unidade "Granito Terra Nova" foram: massa específica aparente 2.614 kg/m³, porosidade aparente 1,10 % e absorção de água 0,43%.

Tabela 5.6 - Dados e resultados de ensaios para determinação da massa específica aparente, da porosidade aparente e da absorção de água do biotita monzogranito médio do Granito Terra Nova.

CP	m _{SEC} (g)	m _{SAT} (g) (g)	m _{SUB} (g) (g)	ρ_a (kg/m ³)	η_a %	α_a %
1	124,75	124,87	77,62	2.640	0,25	0,10
2	99,57	100,75	61,96	2.567	3,04	1,19
3	85,34	85,95	52,84	2.577	1,84	0,71
4	99,76	100,17	62,15	2.624	1,08	0,41
5	140,08	140,38	87,18	2.633	0,56	0,21
6	109,49	109,81	68,00	2.619	0,77	0,29
7	131,66	132,72	81,43	2.567	2,07	0,81
8	107,30	107,48	66,45	2.615	0,44	0,17
9	140,16	140,33	87,42	2.649	0,32	0,12
10	89,02	89,24	55,62	2.648	0,65	0,25
Média	112,71	113,17	70,07	2.614	1,10	0,43

Legenda: CP: corpo de prova; m_{SEC}: massa seca; m_{SAT}: massa saturada; m_{SUB} : massa submersa; ρ_a : massa específica aparente; η_a : porosidade aparente; α_a : absorção de água. Anexo B - NBR5564 (ABNT, 2014).

5.2.6 GRANITO MORRO DO TICO-TICO

De acordo com a Tabela 5.7, os resultados obtidos para o biotita sienogranito de granulação grossa do Granito Morro do Tico-Tico foram: massa específica aparente 2.658 kg/m³, porosidade aparente 1,16 % e absorção de água 0,44%.

Tabela 5.7 - Dados e resultados de ensaios para determinação da massa específica aparente, da porosidade aparente e da absorção de água do biotita sienogranito grosso do Granito Morro do Tico-Tico.

CP	m _{SEC} (g)	m _{SAT} (g) (g)	m _{SUB} (g) (g)	ρ_a (kg/m ³)	η_a %	α_a %
1	107,05	107,50	67,22	2,658	1,12	0,42
2	60,80	61,22	38,33	2,656	1,83	0,69
3	99,47	99,83	62,63	2,674	0,97	0,36
4	116,16	116,55	72,68	2,648	0,89	0,34
5	80,63	81,00	50,67	2,658	1,22	0,46
6	116,00	116,42	73,18	2,683	0,97	0,36
7	135,37	135,93	84,74	2,644	1,09	0,41
8	122,17	122,99	76,80	2,645	1,78	0,67
9	136,72	137,05	85,66	2,660	0,64	0,24
10	102,78	103,21	64,45	2,652	1,11	0,42
Média	107,72	108,17	67,64	2,658	1,16	0,44

Legenda: CP: corpo de prova; m_{SEC}: massa seca; m_{SAT}: massa saturada; m_{SUB} : massa submersa; ρ_a : massa específica aparente; η_a : porosidade aparente; α_a : absorção de água. Anexo B - NBR5564 (ABNT, 2014).

5.2.7 GRANITO TAIPAS

De acordo com a Tabela 5.8, os resultados obtidos para o muscovita monzogranito de granulação grossa do Granito Taipas foram: massa específica aparente 2.808 kg/m³, porosidade aparente 0,59 % e absorção de água 0,22%.

Tabela 5.8 - Dados e resultados de ensaios para determinação da massa específica aparente, da porosidade aparente e da absorção de água do muscovita monzogranito grosso do Granito Taipas.

CP	m _{SEC} (g)	m _{SAT} (g) (g)	m _{SUB} (g) (g)	ρ_a (kg/m ³)	η_a %	α_a %
1	176,89	177,15	122,23	3,221	0,47	0,15
2	193,42	193,96	105,90	2,196	0,61	0,28
3	209,48	209,85	131,80	2,684	0,47	0,18
4	198,56	198,98	125,22	2,692	0,57	0,21
5	161,82	162,16	102,00	2,690	0,57	0,21
6	180,94	181,24	113,88	2,686	0,45	0,17
7	221,71	222,29	139,42	2,675	0,70	0,26
8	164,43	164,76	103,89	2,701	0,54	0,20
9	144,46	144,76	111,64	4,362	0,91	0,21
10	167,83	168,33	91,21	2,176	0,65	0,30
Média	181,95	182,35	114,72	2,808	0,59	0,22

Legenda: CP: corpo de prova; m_{SEC}: massa seca; m_{SAT}: massa saturada; m_{SUB} : massa submersa; ρ_a : massa específica aparente; η_a : porosidade aparente; α_a : absorção de água. Anexo B - NBR5564 (ABNT, 2014).

5.2.8 GRANITO CANTAREIRA

As massas e resultados individuais dos ensaios realizados nos CPs do sieno a monogranito de granulação grossa da unidade CANTAREIRA OESTE e do sienogranito de granulação grossa, inequigranular da unidade CANTAREIRA LESTE, bem como os valores de massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água são apresentados respectivamente nas Tabelas 5.9 e 5.10.

Tabela 5.9 - Dados e resultados de ensaios para determinação da massa específica aparente, da porosidade aparente e da absorção de água do sieno a monogranito grosso da Unidade CANTAREIRA OESTE.

CP	m _{SEC} (g)	m _{SAT} (g) (g)	m _{SUB} (g) (g)	ρ_a (kg/m ³)	η_a %	α_a %
1	101,51	101,69	63,89	2,685	0,48	0,18
2	75,28	75,48	47,64	2,704	0,72	0,27
3	115,66	115,98	73,06	2,695	0,75	0,28
4	73,09	73,25	46,29	2,711	0,59	0,22
5	84,16	84,33	53,29	2,711	0,55	0,20
6	98,10	98,20	61,96	2,707	0,28	0,10
7	82,40	82,57	52,04	2,699	0,56	0,21
8	62,86	63,04	39,64	2,686	0,77	0,29
9	83,51	83,65	52,96	2,721	0,46	0,17
10	109,43	109,62	68,91	2,688	0,47	0,17
Média	88,60	88,78	55,97	2,701	0,56	0,21

Legenda: CP: corpo de prova; m_{SEC}: massa seca; m_{SAT}: massa saturada; m_{SUB} : massa submersa; ρ_a : massa específica aparente; η_a : porosidade aparente; α_a : absorção de água. Anexo B - NBR5564 (ABNT, 2014).

Tabela 5.10 - Dados e resultados de ensaios para determinação da massa específica aparente, da porosidade aparente e da absorção de água do sienogranito grosso e inequigranular da Unidade CANTAREIRA LESTE.

CP	m _{SEC} (g)	m _{SAT} (g) (g)	m _{SUB} (g) (g)	ρ_a (kg/m ³)	η_a %	α_a %
1	124,53	124,86	79,85	2,767	0,73	0,26
2	86,94	87,09	55,65	2,765	0,48	0,17
3	95,08	95,33	61,00	2,770	0,73	0,26
4	96,97	97,23	62,45	2,788	0,75	0,27
5	132,56	132,88	84,63	2,747	0,66	0,24
6	106,4	106,66	68,16	2,764	0,68	0,24
7	110,13	110,39	69,97	2,725	0,64	0,24
8	126,82	127,07	81,60	2,789	0,55	0,20
9	100,14	100,31	64,82	2,822	0,48	0,17
10	161,27	161,92	102,79	2,727	1,10	0,40
Média	114,08	114,37	73,09	2,766	0,68	0,25

Legenda: CP: corpo de prova; m_{SEC}: massa seca; m_{SAT}: massa saturada; m_{SUB} : massa submersa; ρ_a : massa específica aparente; η_a : porosidade aparente; α_a : absorção de água. Anexo B - NBR5564 (ABNT, 2014).

Os resultados obtidos para os agregados "CANTAREIRA OESTE" e "CANTAREIRA LESTE" foram respectivamente: massa específica aparente 2.701 e 2.766 kg/m³, porosidade aparente 0,56 e 0,68 % e absorção de água 0,21 e 0,25 %.

5.2.9 SINTESE DOS INDICES FISICOS

Os resultados dos ensaios de índices físicos encontram-se sintetizados na Tabela 5.11 e Figura 5.12. Quanto aos valores de massa específica aparente (MEA), a norma NBR 5564 (ABNT,2011) 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 MEA (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 (PA) e absorção de água (AA), a norma NBR 5564 (ABNT,2011) 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 (Figura 5.18) indica que os granitos Terra Nova e Tico Tico são as rochas com valores de porosidade aparente e absorção de água relativamente mais expressivos, provavelmente em função de uma maior comunicabilidade de sua rede porosa, relacionado-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 5.11 - Quadro resumo dos índices físicos das rochas estudadas

Rocha	ρ_a (kg/m ³)	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
TIC	2,658	1,16	0,44
CAN-O	2,701	0,56	0,21
CAN-L	2,766	0,68	0,25
CVG	2,755	0,72	0,26
TAI	2,808	0,59	0,22
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, TIC- Granito Tico-Tico, TAI- Granito Taipas, CAN-O- Granito Cantareira Oeste, CAN-L- Granito Cantareira Leste; ρ_a : massa específica aparente; η_a : porosidade aparente; α_a : absorção de água. Ordenação crescente a partir dos valores de ρ_a

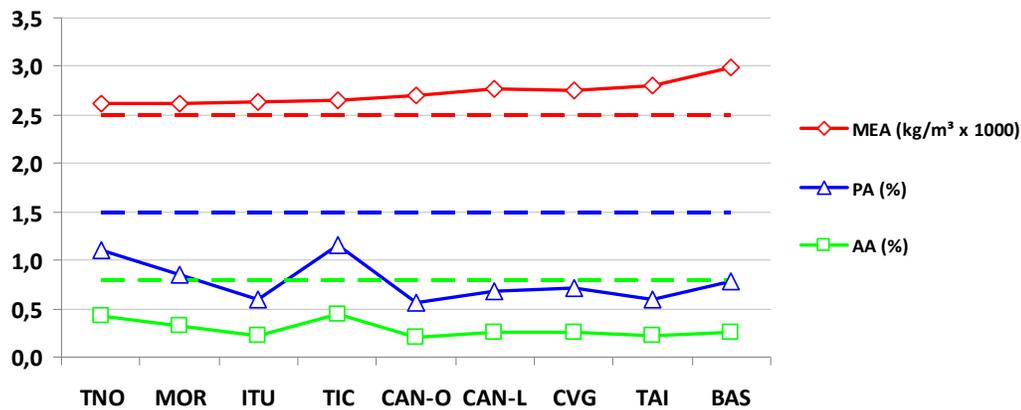


Figura 5.12 - Resultados dos ensaios de índices físicos. Legenda: Rochas – idem Tabela 5.10; pa: massa específica aparente; ηa: porosidade aparente; aa: absorção de água. Em tracejados os limites recomendados pela norma NBR 5564 (ABNT, 2011).

5.3 ENSAIOS MECÂNICOS

5.3.1 RESISTÊNCIA À CARGA PONTUAL

Neste teste uma amostra de rocha é carregada entre ponteiros padronizados de aço até a ruptura por tração normal ao eixo de carregamento (BROCH & FRAKLIN, 1972). Em linhas gerais, a resistência de carga pontual é expressa dividindo-se a carga aplicada na ruptura pelo diâmetro quadrado da amostra irregular de rocha (BROWN, 1981), representando o valor indireto da resistência à tração do material testado (BIENAWSKI, 1975).

Na presente pesquisa, os corpos de prova necessários para os ensaios foram provenientes de amostras irregulares coletadas diretamente nas pilhas de britagem das pedreiras em operação visitadas. De acordo com as diretrizes das normas D5731 (ASTM, 2008) e ISRM (1985), utilizaram-se valores de D_e (correspondente ao diâmetro equivalente da seção de carregamento do CP) e da força Q (carga pontual que foi aplicada no CP) para elaboração de gráficos $\log \times \log$ de D_e^2 versus Q . Por meio de retas de regressão linear verificou-se, para cada rocha, a carga Q_{50} correspondente a um diâmetro equivalente igual a 50mm, sendo então calculado o índice $Is_{(50)}$.

Os dados e resultados de cada teste das rochas estudadas são apresentados, de forma detalhada, no APÊNDICE B.

A Tabela 5.12 apresenta os resultados da resistência à carga pontual, onde se divide em muito alta (Is_{50} entre 3 e 10 MPa) a extremamente alta ($Is_{50} > 10$ MPa), no caso do Granito Morungaba, rocha de estrutura maciça, homogênea, compacta e de granulação fina.

Tabela 5.12 - Valores da resistência à compressão puntiforme I_s50 e estimativas da resistência à compressão uniaxial RCU (Al-HARTHI, 2001)

Rocha	I_s50		RCU (MPa)
	Valor (MPa)	Classificação	Média (Limites)
BAS	9,6	Muito alta	215 (180-235)
CVG	7,0		160 (125-180)
MOR	10,7	Extremamente alta	230 (210-265)
ITU	7,5		170 (135-190)
TNO	9,6	Muito alta	215 (180-235)
TIC	6,9		150 (125-180)
TAI	6,4		145 (120-175)
CAN-O	8,0		175 (155-210)
CAN-L	7,9		175 (155-210)

LEGENDA: BAS- Intrusivas básicas, CVG- Complexo Varginha Guaxupé, MOR- Granito Morungaba, ITU- Granito Itu, TNO- Granito Terra Nova, TIC- Granito Tico-Tico, TAI- Granito Taipas, CAN-O- Granito Cantareira Oeste, CAN-L- Granito Cantareira Leste; ρ_a : massa específica aparente; ρ_p : porosidade aparente; a_w : absorção de água.

De modo conservador, pode-se afirmar que os valores mínimos de resistência à compressão uniaxial estimados por Al-Harthi (2001) por meio de correlações com os respectivos índices I_{s50} (Figura 5.13) indicam que todas as rochas apresentam valores de RCU maior ou igual a 120 MPa, atendendo aos requisitos mínimos de RCU (100 MPa) como característica importante de agregado para uso como lastro ferroviário prevista na norma NBR5564 (ABNT, 2011).

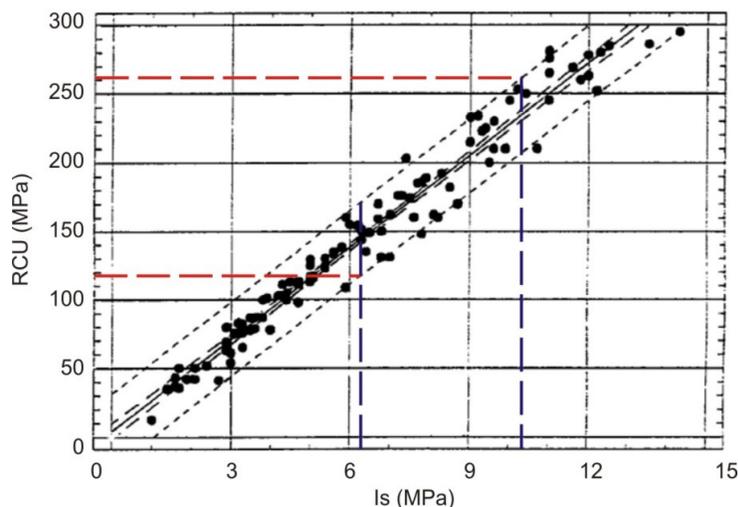


Figura 5.13 - Correlação entre I_s e RCU (Al-HARTHI, 2001): Tracejado em azul indicam a faixa de variação dos valores de I_{s50} e, no tracejado em vermelho, os respectivos intervalos de variação estimados para valores mínimo, médio e máximo de RCU das rochas estudadas na presente pesquisa.

5.3.2 RESISTÊNCIA AO ESMAGAMENTO

As massas e resultados individuais dos ensaios realizados nos CPs das rochas estudadas, bem como os valores médios da resistência ao esmagamento de

agregados graúdos determinados com base nas diretrizes da norma NBR 9938 (ABNT, 2013) são apresentados na Tabela 5.13 e Figura 5.14.

Tabela 5.13 - Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos

Propriedade Rocha	1ª amostra			2ª amostra			R _m (%)
	M _i (g)	M _f (g)	R (%)	M _i (g)	M _f (g)	R (%)	
BAS	3105,1	2725,3	12,2	3064,4	2692,0	12,2	12,2
CVG	2907,2	2486,4	14,5	2888,8	2457,5	14,9	14,7
MOR	2757,6	2262,4	18,0	2782,2	2275,9	18,2	18,1
ITU	2849,2	2022,8	29,0	2756,7	2022,80	26,6	27,8
TNO	2768,5	2205,6	20,3	2727,0	2150,4	21,1	20,7
TIC	2718,4	2013,4	25,9	2704,9	1974,8	27,0	26,5
TAI	2730,6	2106,0	22,9	2799,6	2207,6	21,1	22,0
CAN-O	2829,4	2346,1	17,7	2863,6	2348,6	18,0	17,5
CAN-L	2790,1	2272,6	18,5	2718,0	2182,5	19,7	19,1

LEGENDA: BAS- Intrusivas básicas, CVG- Complexo Varginha Guaxupé, MOR- Granito Morungaba, ITU- Granito Itu, TNO- Granito Terra Nova, TIC- Granito Tico-Tico, TAI- Granito Taipas, CAN-O- Granito Cantareira Oeste, CAN-L- Granito Cantareira Leste; M_i - massa inicial; M_f - massa final; R - resistência ao esmagamento; R_m - média aritmética da resistência ao esmagamento das duas determinações.

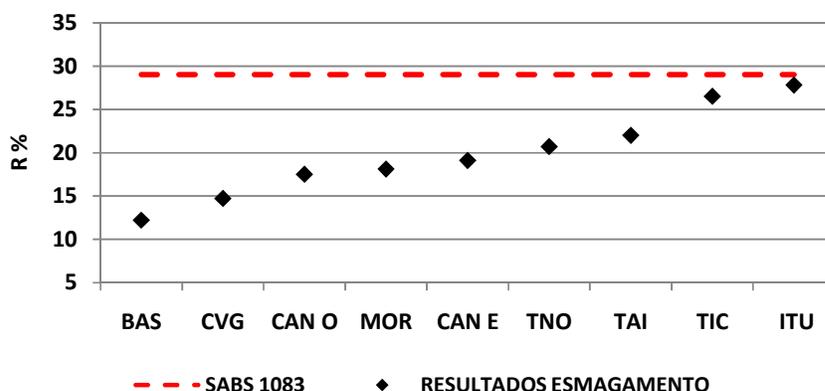


Figura 5.14 - Resultados dos ensaios de resistência do agregado ao esmagamento (R). Legenda: BAS- Intrusivas básicas, CVG- Complexo Varginha Guaxupé, MOR- Granito Morungaba, ITU- Granito Itu, TNO- Granito Terra Nova, TIC- Granito Tico-Tico, TAI- Granito Taipas, CAN-O- Granito Cantareira Oeste, CAN-L- Granito Cantareira Leste. Linha tracejada em vermelho indica o valor máximo sugerido pela norma SABS 1083 (2006)

Levando-se em conta o limite máximo de 29% recomendado pela norma SABS 1083 (2006) para a resistência do agregado ao esmagamento (R) observa-se que todas as rochas atendem este requisito. Todavia, deve ser mencionado que dentre os materiais estudados os granitos Itu e Tico-Tico apresentam valores de R relativamente mais expressivos (27,8% e 26,5%, respectivamente) e próximos ao índice de qualificação tecnológica acima mencionado. Tratam-se de algumas das rochas com os maiores percentuais de feldspato alcalino (entre 30% e 43%) e de granulação grossa (entre 2mm até >20mm), com textura equigranular a porfírica.

5.3.3 RESISTÊNCIA AO CHOQUE

As massas e resultados individuais dos ensaios realizados nos CPs das rochas estudadas, bem como os valores médios da resistência ao choque são apresentados na Tabela 5.14 e Figura 5.15.

Tabela 5.14 - Determinação da resistência ao choque dos agregados graúdos

Rocha	Propriedade	1ª amostra	2ª amostra	3ª amostra
BAS	m _i (g)	207,21	235,45	222,23
	m _f (g)	184,35	210,84	200,04
	T (%)	12,40	11,67	11,09
	T _m (%)		11,7	
CVG	m _i (g)	160,3	148,43	142,63
	m _f (g)	136,2	125,15	122,49
	T (%)	17,69	18,60	16,44
	T _m (%)		17,6	
MOR	m _i (g)	202,22	198,32	181,98
	m _f (g)	175,34	167,82	148,38
	T (%)	15,33	18,17	22,64
	T _m (%)		18,7	
ITU	m _i (g)	141,48	135,31	134,33
	m _f (g)	89,26	91,04	86,72
	T (%)	58,50	48,63	54,90
	T _m (%)		54,0	
TNO	m _i (g)	142,29	147,66	130,97
	m _f (g)	110,3	109,31	98,26
	T (%)	29,00	35,08	33,29
	T _m (%)		32,5	
TIC	m _i (g)	142,96	143,66	138,43
	m _f (g)	103,5	99,6	92,46
	T (%)	38,13	44,24	49,72
	T _m (%)		44,0	
TAI	m _i (g)	170,05	176,1	165,68
	m _f (g)	132,52	139,64	127,1
	T (%)	28,32	26,11	30,35
	T _m (%)		28,3	
CAN-O	m _i (g)	165,11	165,8	165,13
	m _f (g)	129,79	130,83	132,84
	T (%)	27,21	26,73	24,31
	T _m (%)		26,1	
CAN-L	m _i (g)	174,65	185,11	198,52
	m _f (g)	147,33	154,37	169,71
	T (%)	18,54	19,91	16,98
	T _m (%)		18,5	

LEGENDA: BAS- Intrusivas básicas, CVG- Complexo Varginha Guaxupé, MOR- Granito Morungaba, ITU- Granito Itu, TNO- Granito Terra Nova, TIC- Granito Tico-Tico, TAI- Granito Taipas, CAN-O- Granito Cantareira Oeste, CAN-L- Granito Cantareira Leste; m_i - massa inicial; m_f - massa final; T - resistência ao choque; T_m - média aritmética da resistência ao choque dos três conjuntos de fragmentos da rocha ensaiada.

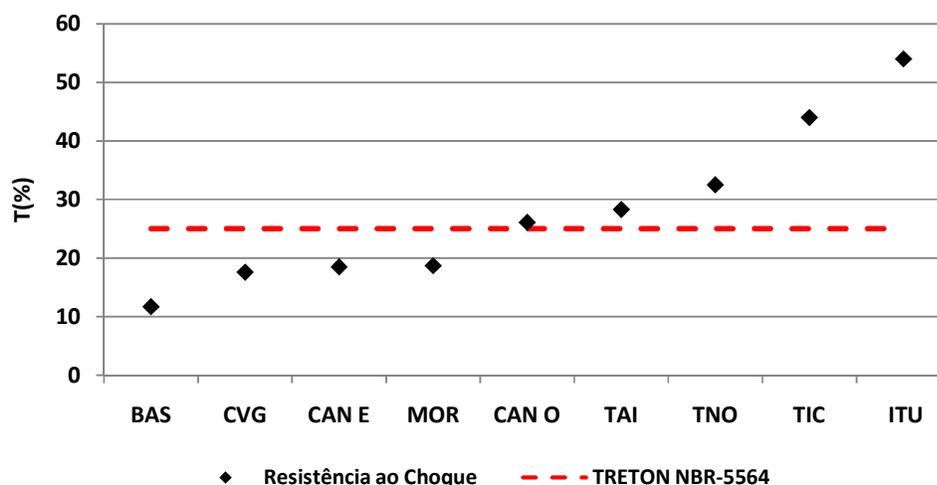


Figura 5.15 - – Resultados dos ensaios de tenacidade Treton "T". Legenda: BAS- Intrusivas básicas, CVG- Complexo Varginha Guaxupé, MOR- Granito Morungaba, ITU- Granito Itu, TNO- Granito Terra Nova, TIC- Granito Tico-Tico, TAI- Granito Taipas, CAN-O- Granito Cantareira Oeste, CAN-L- Granito Cantareira Leste. Linha tracejada em vermelho indica o valor máximo recomendado pela norma NBR 5564 (ABNT, 2014).

Dos materiais estudados, quatro deles (diabásio, gnaisse e granitos Morungaba e Cantareira Leste) atendem (estão abaixo) ao limite máximo de 25% recomendado pela norma NBR 5564 (ABNT, 2011) para o índice de tenacidade Treton (T).

Considerando esta propriedade mecânica, os valores "T" de três rochas (granitos ITU, Terra Nova e Tico-tico) excedem em muito o limite máximo de 25% indicando para estes materiais a inaptidão para uso como lastro, aspecto que pode ganhar importância em termos de critério de seleção e/ou escolha de rochas para um importante projeto/obra de engenharia como o TAV. As outras duas rochas restantes (granitos Taipas e Cantareira Oeste) indicaram valores T de 28,3% e 26,1% respectivamente, pouco acima do limite máximo normatizado de 25%. Tais valores, mesmo que em caráter preliminar, também as classificam como inapropriadas para uso em lastro de ferrovias, considerando os valores obtidos dos índices de tenacidade Treton (T).

5.3.4 ENSAIOS DE ABRASÃO LOS ANGELES

As massas e resultados individuais dos ensaios realizados nos CPs das rochas estudadas, bem como os valores de perda por abrasão dos agregados (Graduação F) são apresentados na Tabela 5.15.

Os resultados dos ensaios de abrasão Los Angeles indicam que, levando-se em conta a norma brasileira NBR 5564 (ABNT, 2011) que trata de lastro para ferrovia, percebe-se que todas as rochas, com exceção do granito Itu, atendem ao limite máximo de perda por abrasão "P" de 30%, embora os valores "P" do granito Tico-Tico (29,2%) se encontrem muito próximos deste limite. Deve ser lembrado que no Brasil não existe o tipo de ferrovia em que se insere o presente estudo, não havendo normatização para lastro ferroviário de Trens de Alta Velocidade (TAVs).

Com base nestas premissas, seria recomendável considerar os valores requeridos pela norma EN 13450 (DIN, 2013) que é a norma europeia para ferrovias e entende-se que os TAVs sejam contemplados por elas, uma vez que é esta norma a exigida na escolha dos materiais pétreos para tal finalidade.

Tabela 5.15 - Determinação da perda por abrasão dos agregados graúdos

Rocha	m(g)	m ₁ (g)	P (%)
BAS	10022	8677	13,4
CVG	10051	8423	16,2
MOR	10015	8394	16,2
ITU	10057	6911	31,3
TNO	10046	7734	23,0
TIC	10080	7136	29,2
TAI	10043	7940	20,9
CAN-O	10031	8809	12,2
CAN-L	10080	8779	12,9

LEGENDA: BAS- Intrusivas básicas, CVG- Complexo Varginha Guaxupé, MOR- Granito Morungaba, ITU- Granito Itu, TNO- Granito Terra Nova, TIC- Granito Tico-Tico, TAI- Granito Taipas, CAN-O- Granito Cantareira Oeste, CAN-L- Granito Cantareira Leste; m - massa inicial; m₁- massa do material refido na peneira com abertura 1,7mm; P- Perda por abrasão.

Os limites máximos de perda por abrasão "P" da referida norma europeia varia de acordo com o tipo de uso da via férrea: 16% para trens de carga e 24% para trens de passageiros, este ultimo o índice que relaciona-se ao presente estudo. Assim sendo, de acordo com estas recomendações pouco mais conservadoras em comparação aos da norma brasileira NBR 5564 (ABNT, 2011), pode-se observar na Figura 5.16 que dois litotipos (granitos Itu e Tico-Tico) não atendem os valores de perda frente a este ensaio, com valores de perda por abrasão "P" de 31,3% e 29,2%, respectivamente, sendo ainda prudente destacar que o valor "P" do granito Terra Nova (23%) encontra-se muito próximo do limite de 24% da norma EN 13450 (DIN, 2013).

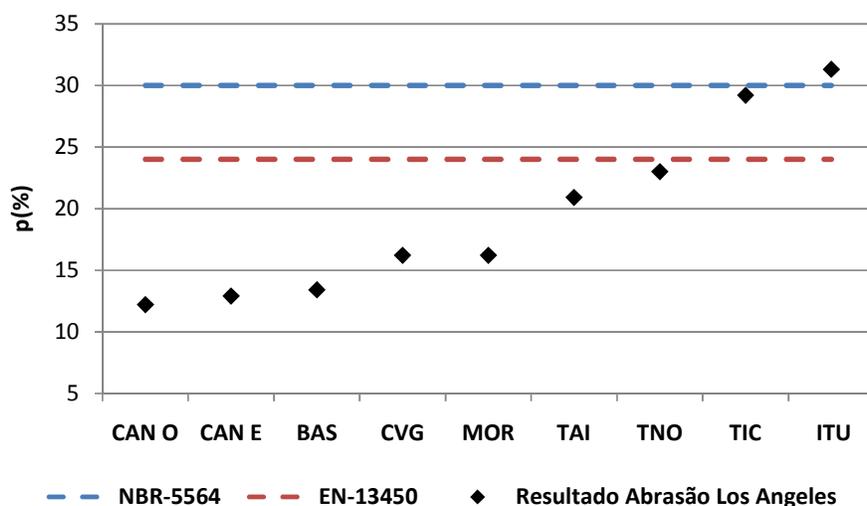


Figura 5.16 - – Resultados dos ensaios de abrasão Los Angeles. Legenda: BAS- Intrusivas básicas, CVG- Complexo Varginha Guaxupé, MOR- Granito Morungaba, ITU- Granito Itu, TNO- Granito Terra Nova, TIC- Granito Tico-Tico, TAI- Granito Taipas, CAN-0- Granito Cantareira Oeste, CAN-L- Granito Cantareira Leste. Linhas tracejadas em vermelho e azul indicam os valores máximos de perda por abrasão "P" recomendados pelas normas NBR 5564 (ABNT, 2011) e EN 13450 (DIN, 2013), respectivamente.

5.3.5 MICRODEVAL

As massas e resultados individuais dos ensaios Micro-Deval (MD) realizados nos corpos de prova das rochas estudadas, bem como os valores dos coeficientes Micro-Deval (M_{DE}) dos agregados são apresentados na Tabela 5.16.

Tabela 5.16 - Determinação dos coeficientes Micro-Deval (M_{DE}) dos agregados graúdos

Rocha	m_0 (g)	m_f (g)	M_{DE} (%)
BAS	500,2	455,7	8,90
CVG	500,5	464,9	7,12
MOR	500,3	480,7	3,92
ITU	500,2	466,7	6,70
TNO	500,3	472,1	5,64
TIC	500,4	460,4	8,00
TAI	500,0	469,8	6,04
CAN-E	500,4	464,0	7,28
CAN-0	500,3	457,2	8,62

LEGENDA: BAS- Intrusivas básicas, CVG- Complexo Varginha Guaxupé, MOR- Granito Morungaba, ITU- Granito Itu, TNO- Granito Terra Nova, TIC- Granito Tico-Tico, TAI- Granito Taipas, CAN-0- Granito Cantareira Oeste, CAN-L- Granito Cantareira Leste; m_0 - massa inicial; m_f - massa do material retido na peneira com abertura 1,7mm; M_{DE} - Perda por abrasão.

Este ensaio, como preconiza a norma EN 1097, foi realizado com 500 gramas de rocha com granulometria entre 9 e 14 mm, mais 5000g de carga abrasiva e 2,5 litros

de água. Todavia, a mesma norma em seu Anexo "A" quando trata de lastro para ferrovia aumenta a granulometria do material e remove a carga abrasiva, ficando assim: 5000g de rocha com granulometria entre 31,5 e 40mm e 5000g com granulometria entre 40 e 50mm e apenas 2 litros de água e sem a carga abrasiva. Condição esta similar a do ensaio de abrasão Los Angeles (gradação F), em termos das granulometrias das amostras que são próximas ao do lastro de ferrovia.

Como não havia laboratórios para atender ao requisitado no Anexo A da norma EN 1097, pois o tambor utilizado neste ensaio é de uma medida diferente em relação a do ensaio M_{DE} tradicional, optou-se por realizar o ensaio com a granulometria tradicional e os resultados serviram de apoio em caráter experimental e interpretativo, mas não foram usados em comparações aos limites máximos recomendados na norma EN 13450.

Conforme ilustrado na Figura 5.17, tentou-se compará-los com os resultados de ensaio de abrasão Los Angeles, mas pelas condições acima mencionadas, a correlação entre estes valores não apresentou índices satisfatórios.

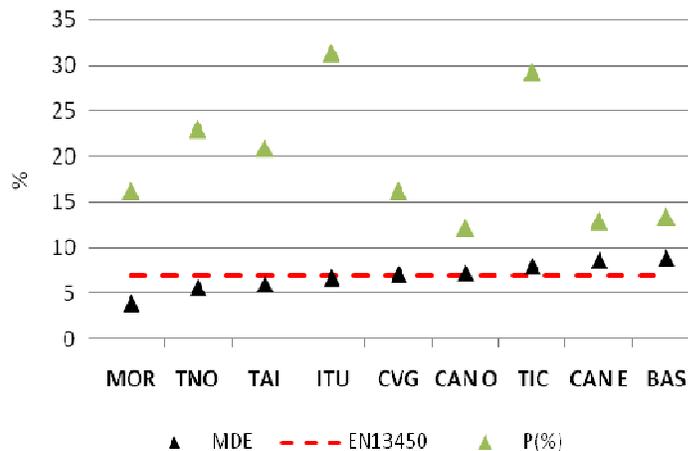


Figura 5.17 - Resultados dos ensaios de abrasão Los Angeles P(%) e Micro-Deval (MDE). Legenda: BAS- Intrusivas básicas, CVG- Complexo Varginha Guaxupé, MOR- Granito Morungaba, ITU- Granito Itu, TNO- Granito Terra Nova, TIC- Granito Tico-Tico, TAI- Granito Taipas, CAN-0- Granito Cantareira Oeste, CAN-L- Granito Cantareira Leste. Linhas tracejadas em vermelho indicam os valor máximo do coeficiente Micro-Deval (MDE) recomendado para lastro pela norma EN 13450 (DIN, 2013).

5.3.6 SÍNTESE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

De forma resumida, os resultados apresentados pelos litotipos com relação às propriedades mecânicas obtidos pelos ensaios de Carga Pontual, de abrasão Los Angeles e das resistências ao esmagamento e ao choque (Treton) são apresentados na Tabela 5.17.

Com base nos valores médios dos 36 resultados de ensaios mecânicos, verifica-se que 7 deles (2 dos ensaios "P" e 5 dos ensaios "T" excedem os limites máximos recomendados pelas normas, perfazendo 5,5% e 13,9% do total de ensaios mecânicos realizados.

Em referência aos nove materiais pétreos estudados, pode-se afirmar que cinco deles (ITU, TNO, TIC, TAI e CAN-O) atendem parcialmente aos requisitos de impacto Treton e de abrasão Los Angeles recomendados pelas normas NBR 5564 (ABNT, 2014) e EN 13450 (DIN,2013). Se considerarmos exclusivamente o ensaio de abrasão Los Angeles, o mais representativo deles, seriam dois os materiais (ITU e TIC) que não atenderiam aos limites mais conservadores da norma EN13450 (DIN, 2013), sendo que neste quesito o granito Terra Nova (TNO) deveria ser utilizado com cautela, por apresentar valor de "P" muito próximo ao recomendado. Os quatro materiais restantes (BAS, CVG, MOR e CAN-E) atendem a todos os requisitos.

Tabela 5.17 - Síntese dos resultados de ensaios mecânicos: carga pontual (Is50), resistências ao esmagamento R, ao impacto Treton T e à abrasão Los Angeles P

Rocha	Is ₅₀ (Mpa)		R		T		P		
	(MPa)	Status	(%)	Status (a)	(%)	Status	(%)	Status (b)	Status (c)
BAS	9,6	R	12,2	R	11,7	R	13,4	R	R
CVG	7,0	R	14,7	R	17,6	R	16,2	R	R
MOR	10,7	R	18,1	R	18,7	R	16,2	R	R
ITU	7,5	R	27,8	R	54,0	NR	31,3	NR	NR
TNO	9,6	R	20,7	R	32,5	NR	23,0	R	R
TIC	6,9	R	26,5	R	44,0	NR	29,2	R	NR
TAI	6,4	R	22,0	R	28,3	NR	20,9	R	R
CAN O	8,0	R	17,5	R	26,1	NR	12,2	R	R
CAN E	7,9	R	19,1	R	18,5	R	12,9	R	R

Legenda: BAS- Intrusivas básicas, CVG- Complexo Varginha Guaxupé, MOR- Granito Morungaba, ITU- Granito Itu, TNO- Granito Terra Nova, TIC- Granito Tico-Tico, TAI- Granito Taipas, CAN-O- Granito Cantareira Oeste, CAN-L- Granito Cantareira Leste; R- Recomendado, NR- Não Recomendado; (a),(b),(c) correspondem ao status do material comparado aos limites máximos recomendados pelas normas SABS 1083, NBR 5564 (ABNT, 2014) e EN 13450 (DIN, 2013), respectivamente.

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 e mapeamentos dos maciços rochosos em escalas de maior detalhe, subsidiando a otimização das etapas de desmonte e britagem nas pedreiras e, com uma produção mais seletiva dos agregados pétreos, atender os rígidos critérios de seleção para uso como lastro em uma obra de engenharia vultuosa, como é o caso do TAV brasileiro.

5.4 ENSAIOS DE ALTERAÇÃO ACELERADA

Com o objetivo de se obter informações a respeito da alteração intempérica das rochas em relação ao tempo de uso (exposição) em obra, foram realizados estudos de alteração acelerada seguindo-se as diretrizes do Anexo C da NBR5564 (ABNT,2014), específica para lastros e, como ensaios complementares, os de saturação em água e secagem cujos procedimentos e resultados serão apresentados e discutidos a seguir.

Tais ensaios foram selecionados levando-se em conta a exequibilidade dos experimentos e, também, verificar a adequação destes ensaios normatizados 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.

5.4.1 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À INTEMPÉRIE

Os valores da resistência a intempérie R_{i40} preconizada na norma EN 13450 (DIN, 2013) não deve ultrapassar 3%, enquanto que na norma NBR-5564 (ABNT, 2014) esse valor não deve exceder 10%.

Levando-se em conta as condições estabelecidas nos ensaios laboratoriais de ciclagem com solução de sulfato de sódio, com exceção da amostra do Granito Terra Nova (TNO), todos os demais litotipos estudados apresentaram resultados satisfatórios, como pode ser visto na Tabela 5.18 e Figura 5.18.

Tabela 5.18 - Dados e resultados de ensaios para determinação da resistência à intempérie Ri40.

Amostra	Dados (g)					Resultados (%)			
	M _i	M _{i10}	M _{i20}	M _{i30}	M _{i40}	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				
TIC	1298,48	1296,63	1291,68	1284,04	1277,60	0,14	0,52	1,11	1,61
TAI	1235,96	1235,03	1232,14	1229,29	1226,84	0,08	0,31	0,54	0,74
CAN-0	1335,74	1334,62	1333,50	1332,03	1330,74	0,08	0,17	0,28	0,37
CAN-L	1502,44	1500,57	1495,21	1489,38	1482,07	0,12	0,48	0,87	1,36

Legenda: BAS- Intrusivas básicas, CVG- Complexo Varginha Guaxupé, MOR- Granito Morungaba, ITU- Granito Itu, TNO- Granito Terra Nova, TIC- Granito Tico-Tico, TAI- Granito Taipas, CAN-0- Granito Cantareira Oeste, CAN-L- Granito Cantareira Leste; Mi- massa inicial, Mf10 a Mf40- massa final após o 10°, 20°, 30° e 40° ciclo; Ri10 a Ri40- resistência à intempérie pós o 10°, 20°, 30° e 40° ciclo. Anexo C da NBR 5564 (ABNT, 2014).

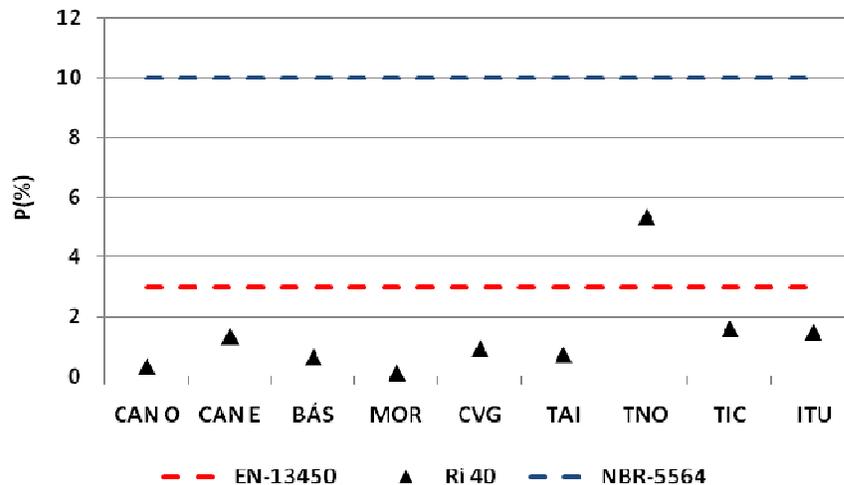


Figura 5.18 - Resultados dos ensaios de resistência a intempérie (Ri40) frente aos limites preconizados na norma EN 13450 (DIN, 2013) e NBR 5564 (ABNT, 2014).

Aliada à quantificação de perda de massa após a ciclagem em solução de sulfato de sódio e secagem em estufa, efetuou-se a avaliação qualitativa de todas as amostras (ver Tabela 4.5) por meio de exames visuais dos corpos de prova após cada 10 ciclos, com a verificação e registro fotográfico dos eventuais danos (fissuras, trincas, escamações, oxidação, desagregação, etc.).

Conforme já descrito no item 4.3.3.1, seguiu-se os termos sugeridos pela NBR 12696 (ABNT, 1992) para inspeção visual dos corpos de prova submetidos aos ensaios de determinação da resistência à intempérie. A referida terminologia é resumida a seguir:

- Desintegração: Perda de coesão dos grãos da rocha associada, ou não, à alteração;
- Fissuração: Formação de descontinuidades em uma face do agregado
- Rachadura: Extensão da fissuração por mais de uma dimensão do fragmento;
- Estes termos foram empregados seqüencialmente, considerando-se que fissurações originam rachaduras e, então, lasqueamento e fragmentação.

Por meio das observações visuais resumidas na Tabela 5.19, 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 notoriamente o granito Terra Nova (TNO), conforme ilustrado na Figura 5.19. Já nas demais oito 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, mas esta última afirmativa deveria ser confirmada pelo ensaio de saturação em água, o que não ocorreu, conforme detalhado a seguir (item 5.4.2)

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.

Tabela 5.19 - Exame visual das amostras submetidas à ciclagem com imersão em solução de sulfato de sódio e secagem em estufa.

Rocha	Ciclo 10	Ciclo 20	Ciclo 30	Ciclo 40
BAS	Leve oxidação	Oxidação dos fragmentos; em 4 deles observam-se FIS (1) e RAC (3) mais evidentes	Oxidação dos fragmentos; em 5 deles observou-se FIS (4) e RAC (1) mais evidentes, mas pouco pronunciadas	Fragmentos levemente oxidados; idem ciclo 30; pontualmente observou-se boxworks sub-milimétricos promovidos pela oxidação e lixiviação de minerais opacos (sulfetos?).
CVG	Leve oxidação	Oxidação dos fragmentos; em 1 deles aresta cortada por pronunciada RAC ortogonal ao bandamento .	Oxidação dos fragmentos; idem ciclo 20.	Oxidação dos fragmentos; idem ciclo 20.
MOR	Leve oxidação	Oxidação 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; oxidação pouco pronunciada; localmente lixiviação/alteração pouco mais evidente de minerais máficos e/ou opacos (?).
ITU	Leve oxidação; algumas fraturas com incipiente alteração.	Oxidação/descoloração mais evidenciada nos minerais máficos; em 3 fragmentos FIS e condições prováveis 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 pouco pronunciado podendo evoluir para PM	Oxidação mais intensa em todos os fragmentos; FIS (4) e RAC (3) com LAS evidente em um fragmento.
TNO	Microfissuras mais evidentes; cavidades de dissolução dispersas; 1 fragmento lascado.	Alteração mais pronunciada em todas as amostras; disseminação de boxworks (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.	Oxidação e fissuras em todas as amostras; RACs pronunciadas em seis fragmentos; disseminação de boxworks (sulfeto?) e uma amostra intensamente fragmentada.
TIC	Algumas microfissuras oxidadas	Oxidação dos fragmentos fraca a moderada; em 5 deles presença de pequenas FIS e RAC que podem induzir a FRAG das amostras	Oxidação moderada dos fragmentos; 3 deles com RAC bem marcadas (evidentes) mas não tão pronunciadas	Idem ciclo 20; FIS (2) e RAC (5); sendo em dois fragmentos muito penetrativas podendo evoluir para LAS/FRAG.

Legenda: BAS- Intrusivas básicas, CVG- Complexo Varginha Guaxupé, MOR- Granito Morungaba, ITU- Granito Itu, TNO- Granito Terra Nova, TIC- Granito Tico-Tico, TAI- Granito Taipas, CAN-0- Granito Cantareira Oeste, CAN-L- Granito Cantareira Leste; FIS- Fissura ou fissuração; RAC- Rachadura; LAS-Lasqueamento; FRAG-Fragmentação.

Tabela 5.19 Exame visual das amostras submetidas à ciclagem com imersão em solução de sulfato de sódio e secagem em estufa (Continuação).

Rocha	Ciclo 10	Ciclo 20	Ciclo 30	Ciclo 40
TAI	Leve oxidação dos fragmentos	Oxidação moderada na maioria das amostras; em 3 fragmentos mais oxidados FIS pequenas que tendem a evoluir para RAC e LAS	Oxidação moderada dos fragmentos; idem observações Ciclo 20	Oxidação moderada dos fragmentos; FIS (3) pouco contínuas; em um fragmento RAC mais evidente.
CAN-O	Oxidação leve a moderada dos fragmentos	Oxidação mais evidente; não foi observada a presença de FIS / RAC mais evidentes e contínuas nas amostras de mão.	Oxidação mais disseminada das amostras; idem observações Ciclo 20; em 1 fragmento LAS do canto da amostra	Oxidação moderada a intensa dos fragmentos; em três deles FIS mais evidentes mas pouco contínuas.
CAN-E	Descoloração pouco intensa dos fragmentos; LAS pouco pronunciado localmente	Oxidação baixa a moderada dos fragmentos; em 3 deles presenças de pequenas FIS.	Idem observações Ciclo 20	Oxidação moderada dos fragmentos; idem observações Ciclo 20.

Legenda: BAS- Intrusivas básicas, CVG- Complexo Varginha Guaxupé, MOR- Granito Morungaba, ITU- Granito Itu, TNO- Granito Terra Nova, TIC- Granito Tico-Tico, TAI- Granito Taipas, CAN-0- Granito Cantareira Oeste, CAN-L- Granito Cantareira Leste; FIS- Fissura ou fissuração; RAC- Rachadura; LAS-Lasqueamento; FRAG-Fragmentação.

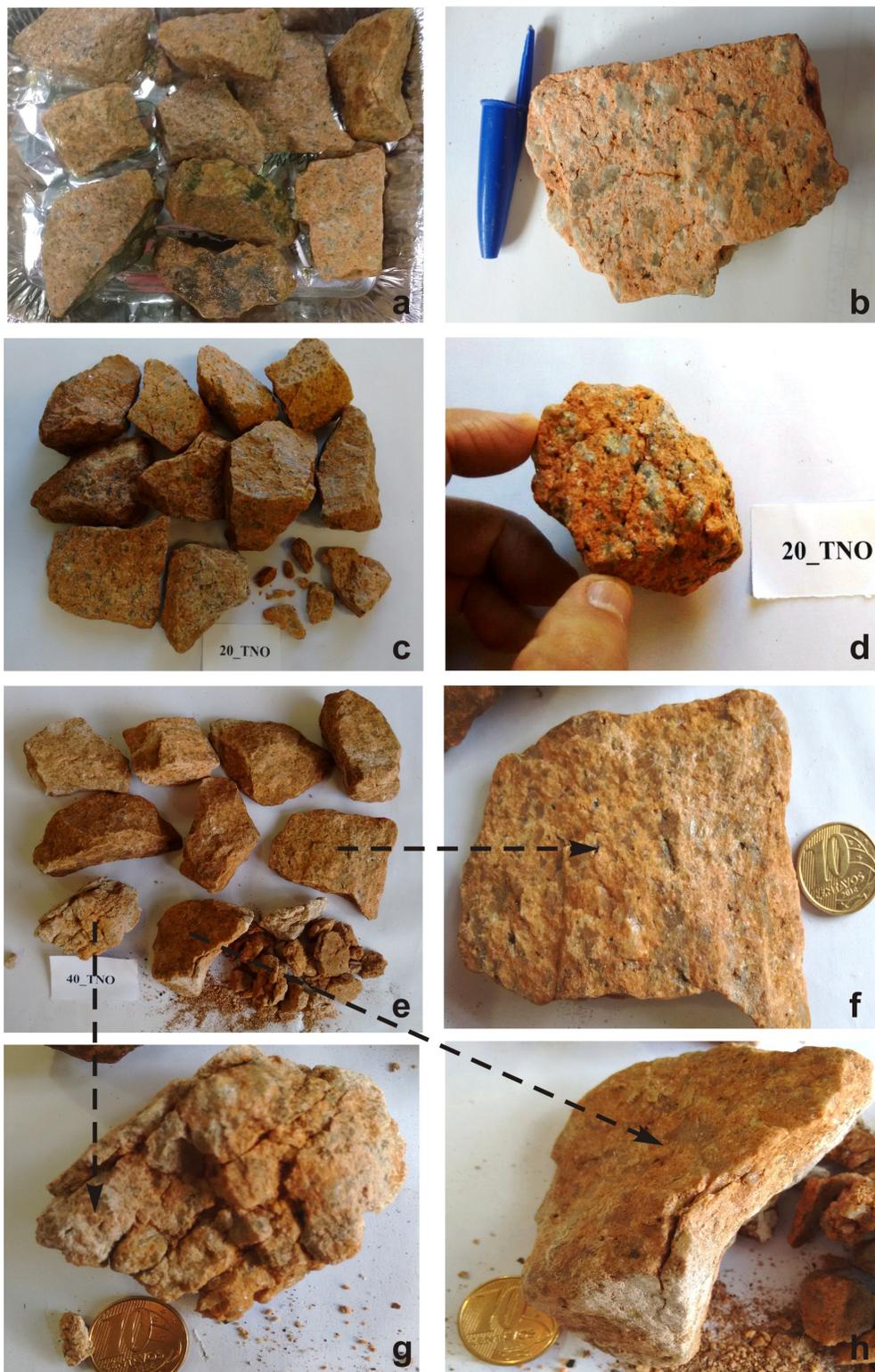


Figura 5.19 - Registro fotográfico das amostras da rocha (granito Terra Nova - TNO) que apresentou a maior perda de massa nos ensaios de ciclagem com solução de sulfato de sódio: **(a)**, **(c)**, **(e)** aspecto visual das amostras após o 10º, 20º e 40º ciclos e respectivos detalhes em **(b)** microfissuras e cavidades de dissolução de minerais opacos/sulfetos, **(d)** microfissuras e rachaduras mais evidentes e **(f, g, h)** danos mais intensos.

5.4.2 SATURAÇÃO EM ÁGUA E SECAGEM EM ESTUFA

Na tabela 5.20 são apresentados os resultados do ensaio de ciclagem água/estufa conforme preconiza a NBR 12696 (ABNT, 1992) que se encontra em atualização, onde as perdas em massa das amostras referência ficaram entre 2 e 2,6% aproximadamente, com exceção do granito ITU que teve perda inferior a 1%.

Antecipadamente pode-se dizer que a proximidade dos valores de resposta, com exceção do granito Itu que apresentou um valor mais baixo, indicam que as rochas tenderam a se alterar de modo similar, devido à composição mineralógica ser muito parecida, mudando apenas nas proporções dos principais minerais constituintes (quartzo e feldspatos, principalmente), obviamente excetuando-se a unidade Intrusiva Básica que é representada por um microgabro.

Tabela 5.20 - Resultados de perda de massa das amostras referências após 120 ciclos de saturação em água e secagem em estufa.

Unidade	M ₀ (g)	M _f (g)	PM (g)	PM (%)
BAS	3810,2	3718,5	91,7	2,4
CVG	2242	2194,4	47,6	2,1
MOR	4513,8	4413,1	100,7	2,2
ITU	2664,7	2643,2	21,5	0,8
TNO	2993	2919,7	73,3	2,4
TIC	2426,8	2375,6	51,2	2,1
TAI	3187,6	3105,6	82,0	2,6
CAN-O	3059,1	2986,1	73,0	2,4
CAN-L	3998	3914,6	83,4	2,1

Legenda: BAS- Intrusivas básicas, CVG- Complexo Varginha Guaxupé, MOR- Granito Morungaba, ITU- Granito Itu, TNO- Granito Terra Nova, TIC- Granito Tico-Tico, TAI- Granito Taipas, CAN-O- Granito Cantareira Oeste, CAN-L- Granito Cantareira Leste; **M₀** - massa inicial, **M_f** - massa final depois do 120º ciclo e **PM**- perda de massa verificada nos ensaios de ciclagem.

Pelo fato de não ser contemplado pelas normas vigentes, tanto nacional como internacionais para uso do lastro, os ensaios de ciclagem água-estufa foram realizados com o objetivo de subsidiar a classificação dos litotipos estudados em termos de sua alterabilidade, sendo que os espécimes com perda menor foram considerados melhores. Estes ensaios serviram também como método auxiliar comparativo aos valores dos ensaios de resistência mecânica pós ciclagem, cujos resultados serão tratados a seguir.

5.5 AVALIAÇÃO COMPARATIVA DOS RESULTADOS DE ENSAIOS POR SATURAÇÃO EM AGUA/SECAGEM CONJUGADOS A ENSAIOS MECÂNICOS

Neste capítulo serão discutidos os resultados dos ensaios Abrasão Los Angeles, Impacto ao Choque Treton e Esmagamento de amostras naturais, frente aos

resultados apresentados pelos mesmos ensaios realizados com amostras envelhecidas artificialmente.

Destaca-se novamente que os ensaios de envelhecimento artificial realizados seguiram as diretrizes da norma NBR 12696 (ABNT,1992) e sugestões de Frazão (2007), onde tanto as amostras referências como as frações específicas dos três ensaios mecânicos foram submergidas em tanques de água destilada por um período aproximado de 14 horas, após eram colocadas em estufa para secagem a temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ por volta de 8 horas. Estes dois períodos (14 horas submersos e 8 horas em estufa) completavam um ciclo, sendo que todas as amostras passaram por um total de 120 ciclos.

5.5.1 RESISTÊNCIAS À ABRASÃO LOS ANGELES DE AMOSTRAS NATURAIS E CICLADAS (P_{NAT} E P_{CIC})

Como já mostrado no item 5.3.4 (Tabela 5.15 e Figura 5.16), apenas duas amostras naturais não atendem as especificações das normas vigentes para lastro de ferrovia pelo ensaio de abrasão Los Angeles, sendo que uma delas (granito Tico-Tico) atende apenas ao limite máximo recomendado pela NBR-5564 (ABNT, 2014) enquanto que o granito ITU não atende também aos requisitos da norma EN 13450 (DIN, 2013).

As perdas de resistência à abrasão Los Angeles (P) das litologias estudadas promovidas pelo processo de envelhecimento artificial água-estufa são apresentadas na Tabela 5.21.

Tabela 5.21 - Valores de abrasão Los Angeles das amostras naturais (PNAT) e cicladas (PCIC).

Rocha	P_{NAT} (%)	P_{CIC} (%)	Limites máximos recomendados (%)	
			EN-13450 (DIN, 2013)	NBR-5564 (ABNT, 2014)
BAS	13,4	19,6		
CVG	16,2	19,3		
MOR	16,2	17,4		
ITU	31,3	38,8		
TNO	23,0	31,8	24	30
TIC	29,2	36,3		
TAI	20,9	23,7		
CAN O	12,2	13,1		
CAN E	12,9	13,3		

Legenda: BAS- Intrusivas básicas, CVG- Complexo Varginha Guaxupé, MOR- Granito Morungaba, ITU- Granito Itu, TNO- Granito Terra Nova, TIC- Granito Tico-Tico, TAI- Granito Taipas, CAN-O- Granito Cantareira Oeste, CAN-L- Granito Cantareira Leste.

Comparativamente aos resultados das rochas naturais, a perda de resistência à abrasão Los Angeles mediante ciclagem água-estufa é melhor observada na Figura 5.20, verificando-se que seis litologias (BAS, CVG, MOR, TAI, CAN-O e CAN-E) mesmo após o processo de envelhecimento mantiveram resistência suficiente para atender aos requisitos das normas ABNT e EN para lastros de ferrovia. Já os valores da amostra ciclada do granito Terra Nova (TNO) indicam que este material não atende aos requisitos normativos previamente destacados, levando-se em conta as condições de simulação laboratoriais realizadas nos ensaios. Atenção também deve ser dada ao granito Taipas (TAI), cujo valor de P_{CIC} mostra-se muito próximo do limite de 24% estabelecido pela norma EN 13450 (DIN, 2013).

Os dados dos ensaios de envelhecimento artificial indicam, também, que as perdas de resistência à abrasão Los Angeles foram muito consistentes, exibindo uma correlação muito próxima entre P_{NAT} e P_{CIC} , conforme tendência linear com R^2 de 0,95 (Figura 5.21). Tratam-se de averiguações importantes, reforçando o fato de que o ensaio Los Angeles realizado com amostras na graduação F garante a representatividade das solicitações reais impostas no lastro de uma ferrovia, sendo que para este ensaio é válida a experiência com apenas uma amostra natural versus uma amostra envelhecida.

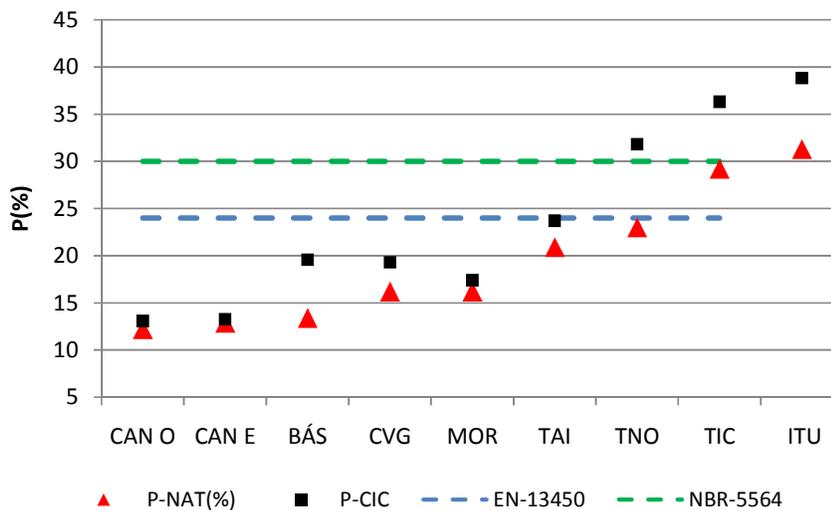


Figura 5.20 - Resultados dos ensaios de resistência a abrasão Los Angeles das amostras naturais (PNAT) e cicladas (PCIC), com limites máximos recomendados pelas normas EN 13450 (DIN, 2013) e NBR 5564 (ABNT, 2014).

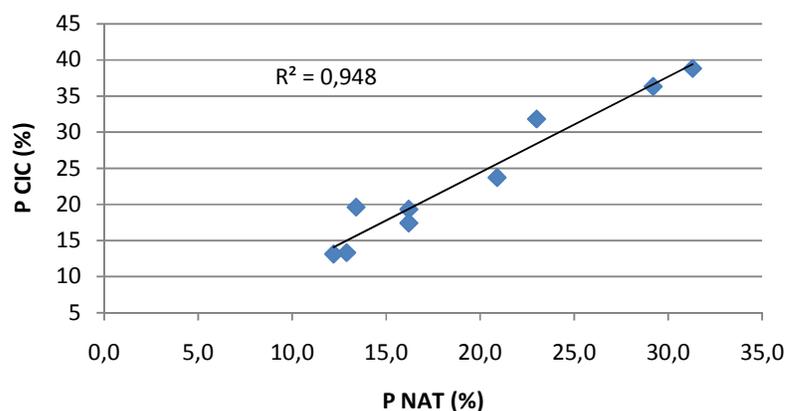


Figura 5.21 - Correlação entre os valores de perda por abrasão das amostras naturais (PNAT) e cicladas (PCIC).

5.5.2 RESISTÊNCIAS AO ESMAGAMENTO DE AMOSTRAS NATURAIS E CICLADAS (R_{NAT} E R_{CIC})

Os valores obtidos por este ensaio, tanto em rochas naturais quanto envelhecidas artificialmente, ficaram dentro do limite máximo recomendado por Frazão (2007) e estabelecido com base nas diretrizes da norma SABS 1083 (2013). Esperava-se por este processo de ciclagem que, assim como no ensaio de abrasão Los Angeles, todas as amostras diminuíssem a resistência ao esmagamento. Como pode ser visto na Tabela 5.22 e na Figura 5.22, isto não ocorreu e inclusive três das amostras apresentaram resultados ligeiramente melhores após os 120 ciclos de envelhecimento, neste caso as amostras dos granitos Cantareira Leste (CAN-E), Morungaba (MOR) e Tico-Tico (TIC). Em outras quatro litologias (CVG, ITU, TNO e TAI), os valores de R_{NAT} e R_{CIC} permaneceram praticamente inalterados.

Tabela 5.22 - Valores de resistência ao esmagamento das amostras naturais (R_{NAT}) e cicladas (R_{CIC}).

Rocha	R_{NAT} (%)	R_{CIC} (%)	Limite máximo (%) (FRAZÃO, 2007)
BAS	12,2	15,2	29
CVG	14,7	14,6	
MOR	18,1	17,3	
TNO	20,7	20,6	
TIC	26,5	25,4	
TAI	22	21,9	
CAN O	17,5	19,4	
CAN E	19,1	18,5	

Legenda: BAS- Intrusivas básicas, CVG- Complexo Varginha Guaxupé, MOR- Granito Morungaba, ITU- Granito Itu, TNO- Granito Terra Nova, TIC- Granito Tico-Tico, TAI- Granito Taipas, CAN-0- Granito Cantareira Oeste, CAN-L- Granito Cantareira Leste.

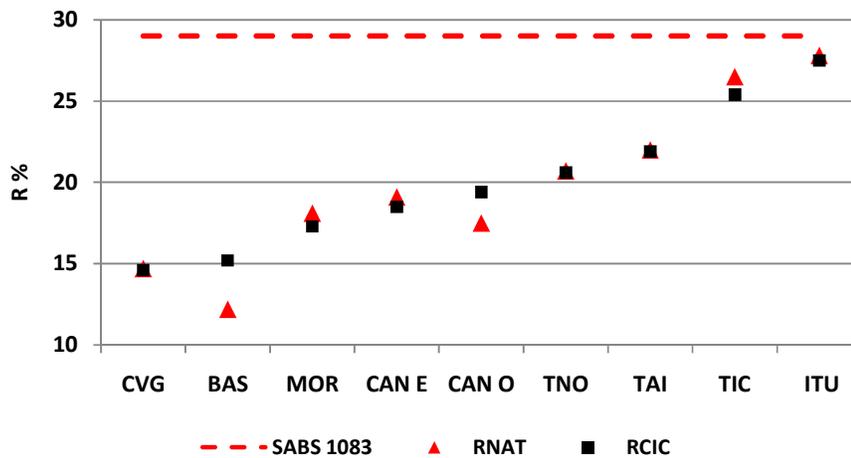


Figura 5.22 - Resultados dos ensaios de resistência ao esmagamento das amostras naturais (RNAT) e cicladas (RCIC), com limites máximos recomendados pela norma SABS 1083 (2013).

Os dados mostram que as amostras que tiveram maior perda de resistência ao esmagamento depois de cicladas foram o microgabro da unidade Intrusiva Básica (BAS) e o granito Cantareira Oeste (CAN-O). Com relação à unidade BAS, a explicação fica por conta da mineralogia, levando-se em conta a ausência de quartzo e a abundância de augita. Este último mineral que, de acordo com às séries reacionais de Bowen, dentre os minerais presentes nos litotipos estudados, é o mais susceptível à alteração, ou seja, é o menos estável, daí a possível explicação para a maior perda de resistência ao esmagamento verificada nestes ensaios de ciclagem (3%). Mas também deve ser mencionado que as referidas não uniformidades dos resultados podem refletir limitações intrínsecas do método de ensaio, tanto em termos da granulometria como também da compactação das camadas de brita para se obter a amostra padrão de teste.

5.5.3 RESISTÊNCIAS AO CHOQUE DE AMOSTRAS NATURAIS E CICLADAS (T_{NAT} E T_{CIC})

A exemplo do ocorrido na ciclagem com ensaios conjugados de esmagamento, no estudo comparativo entre os valores de resistência ao choque (Impacto Treton – T) de amostras naturais e cicladas também verificou-se uma relação não esperada, onde cinco (ITU, TNO, TIC, TAI E CAN-O) das nove amostras cicladas apresentaram valores de T significativamente melhores que as amostras naturais (Tabela 5.23).

Tabela 5.23 - Valores de resistência ao choque das amostras naturais (TNAT) e cicladas (TCIC).

Rocha	T _{NAT} (%)	T _{CIC} (%)	Limite máximo recomendado (%) NBR 5564 (ABNT, 2014)
BAS	11,7	12,5	25
CVG	17,6	20,5	
MOR	18,7	19,9	
ITU	54,0	35,0	
TNO	32,5	24,4	
TIC	44,0	29,2	
TAI	28,3	22,4	
CAN O	26,1	19,4	
CAN E	18,5	21,2	

Legenda: BAS- Intrusivas básicas, CVG- Complexo Varginha Guaxupé, MOR- Granito Morungaba, ITU- Granito Itu, TNO- Granito Terra Nova, TIC- Granito Tico-Tico, TAI- Granito Taipas, CAN-0- Granito Cantareira Oeste, CAN-L- Granito Cantareira Leste.

Mesmo seguindo os procedimentos previstos no Anexo E da norma NBR 5564 (ABNT, 2014), há de se considerar uma limitação prática deste ensaio que se refere à preparação “artesanal” para retirar as arestas e evitar fragmentos com eixos alongados, para se aproximar da forma equidimensional fazendo com que estes fragmentos mais regulares passem na malha quadrada #19,1mm e fiquem retidos na de #15,9mm. Em outras palavras, pequenas diferenças na forma dos fragmentos que compõem a amostra padrão podem fazer com que o impacto do soquete do ensaio seja, mesmo que parcialmente, absorvido por fragmentos pouco mais salientes. Esta constatações podem talvez explicar as diferenças “anômalas” dos valores de T verificadas em algumas das amostras estudadas.

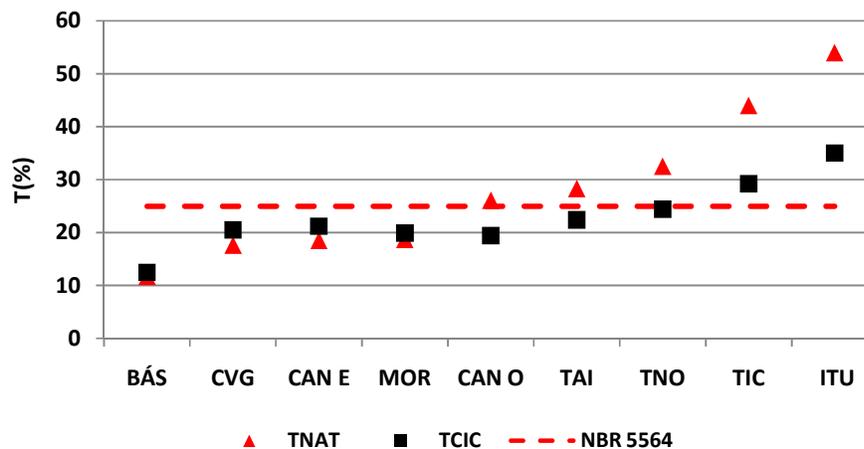


Figura 5.23 Resultados dos ensaios de resistência ao choque Treton das amostras naturais (TNAT) e cicladas (TCIC), com limites máximos recomendados pela norma NBR-5564 (ABNT, 2014).

Conforme mostrado na Figura 5.23, verifica-se que os quatro litotipos (BAS, CVG, MOR, CAN-E) com os melhores valores de impacto treton T nas amostras naturais e satisfatórios quanto aos requisitos da norma NBR 5564 (ABNT, 2014), foram os únicos materiais que apresentaram uma piora nos resultados após o envelhecimento, mostrando que em condições naturais foram realmente as amostras com melhor qualidade mecânica no tocante as solicitações de impacto.

5.5.4 SÍNTESE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ALTERAÇÃO ACELERADA

A comparação entre os valores obtidos nos ensaios mecânicos realizados nos materiais envelhecidos artificialmente e em estado natural mostrou resultados interessantes. Como mostrado na Tabela 5.24, ao contrário do previsto neste tipo de análise, em alguns ensaios com amostras cicladas verificaram-se ganhos relativos de resistência mecânica. Por exemplo, as amostras do granito Taipas (TAI) que após a degradação em água/estufa passaram a atender ao índice recomendado à resistência ao esmagamento.

Em linhas gerais, o comportamento esperado era uma perda de resistência como ocorrido nos ensaios de Abrasão Los Angeles, com algum tipo de variação proporcional comparado aos ensaios de impacto Treton e de esmagamento, uma vez que estes testes índices retratam características mecânicas diferentes de cada material.

Tabela 5.24 - Síntese das determinações das resistências à abrasão Los Angeles P, ao esmagamento R e ao choque (impacto Treton) T e panorama das amostras cicladas frente aos requisitos tecnológicos para lastro de ferrovia.

Rocha	Esmagamento (%)			Choque - Treton (%)			Abrasão Los Angeles (%)			
	R _{NAT}	R _{CIC}	Status (a)	T _{NAT}	T _{CIC}	Status (b)	P _{NAT}	P _{CIC}	Status (b)	Status (c)
BAS	12,2	15,2	R	11,7	12,5	R	13,4	19,6	R	R
CVG	14,7	14,6	R	17,6	20,5	R	16,2	19,3	R	R
MOR	18,1	17,3	R	18,7	19,9	R	16,2	17,4	R	R
ITU	20,7	27,5	R	54,0	35,0	NR	31,3	38,8	NR	NR
TNO	26,5	20,6	R	32,5	24,4	R	<i>23,0</i>	31,8	NR	NR
TIC	22,0	25,4	R	44,0	29,2	NR	29,2	36,3	NR	NR
TAI	17,5	21,9	R	28,3	22,4	R	20,9	<i>23,7</i>	R	R
CAN O	19,1	19,4	R	26,1	19,4	R	12,2	13,1	R	R
CAN E	12,2	18,5	R	18,5	21,2	R	12,9	13,3	R	R

Legenda: BAS- Intrusivas básicas, CVG- Complexo Varginha Guaxupé, MOR- Granito Morungaba, ITU- Granito Itu, TNO- Granito Terra Nova, TIC- Granito Tico-Tico, TAI- Granito Taipas, CAN-O- Granito Cantareira Oeste, CAN-L- Granito Cantareira Leste; R- Recomendado, NR- Não Recomendado; (a),(b),(c) status do material comparado aos limites máximos recomendados pelas normas SABS 1083, NBR 5564 (ABNT, 2014) e EN 13450 (DIN, 2013), respectivamente.

Conforme já mencionado, mesmo com os cuidados adotados na execução dos ensaios, as discrepâncias observadas em alguns resultados provavelmente guardam relações com as condições de preparação das amostras teste, no caso do ensaio de impacto Treton, ou da compactação dos fragmentos dentro do recipiente padrão no ensaio de esmagamento. Estas constatações parecem indicar certas limitações destes ensaios, mas não necessariamente do material pétreo estudado. Fato este merecedor de estudos mais detalhados também com outros tipos de rochas.

Já nos ensaios de Abrasão Los Angeles, por contar com um volume bastante superior de material ensaiado e com granulometria similar ao do agregado graúdo utilizado como lastro de ferrovia, os valores obtidos de P indicam que este ensaio tende a ser estatisticamente sempre o mais representativo. Assim sendo, parece prudente considerar seis dos materiais estudados (BAS, CVG, MOR, TAI, CAN-O e CAN-E) como recomendados para uso como lastro no trecho do TAV brasileiro estudado. Cautela ainda deve ser dada ao granito Taipas (TAI), cujas amostras cicladas indicaram valores médios de perda por abrasão P muito próximos ao limite de 24% recomendados pela norma internacional EN 13450 (DIN,2013) para este tipo de ferrovia.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com relação ao método construtivo de uma via férrea de alta velocidade, a pesquisa bibliográfica realizada mostra que, no caso do projeto do TAV brasileiro, o modelo tradicional composto por via lastrada parece ser o mais indicado, levando-se em conta aspectos como o custo de implantação, a disponibilidade de materiais pétreos de boa qualidade no entorno do traçado da obra e também peculiaridades geotécnicas que ganham relevância em alguns trechos da futura obra, especialmente no trecho entre Campinas e São Paulo, área de alcance da presente pesquisa.

Nesta região foram estudados nove tipos de rochas, aqui consideradas como representativas das seguintes unidades geológicas de rochas cristalinas: Intrusivas Básicas BAS (micro-gabro), Complexo Varginha Guaxupé CVG (gnaisse) e o restante representado por sete variações de rochas graníticas: Complexo Morungaba MOR, Complexo ITU, granito Terra Nova TNO, granito TICO TICO, granito TAIPAS e granitos do Complexo Cantareira (CAN-O e CAN-E).

Os referidos maciços detem vocação fortemente consolidada na produção de agregados, todos com pedreiras em atividade que atendem demandas comerciais notadamente para concreto com cimento Portland e para pavimentação, mas que não necessariamente se encontram bem qualificados visando seu uso como lastro de ferrovia, ou seja, sem ligante e com o material pétreo sujeito às condições intempéricas típicas de clima tropical.

Com base nas diretrizes de normas técnicas (nacional e internacional) específicas para lastro, foram testadas amostras de agregados coletadas diretamente nas pilhas de britagem das referidas pedreiras. Definiram-se parâmetros petrográficos e propriedades físicas e mecânicas em estado natural e suas evoluções por meio de ciclos de envelhecimento artificial (saturação em solução de sulfato de sódio / secagem em estufa e ciclagem água e estufa) conjugados a alguns dos ensaios mecânicos (abrasão Los Angeles, esmagamento e choque ou impacto Treton). Destaca-se ainda a realização, de certa forma inédita em pesquisas nacionais se contemplado o uso como lastro, de ensaios de abrasão Micro-Deval aqui considerados pilotos mas que efetivamente não foram utilizados nas comparações estabelecidas.

Dos materiais estudados, seis deles (BAS, CVG, MOR, TAI, CAN-O e CAN-E) atendem às recomendações das normas vigentes, levando-se em conta também

os resultados obtidos nos ensaios complementares de alteração acelerada por saturação em água e secagem em estufa.

Os materiais que atendem parcialmente (ITU, TNO e TIC), deverão ser reamostrados de maneira criteriosa, uma vez que a variação faciológica das unidades geológica implicam em substanciais diferenças nos resultados, não sendo recomendado utilizar estes resultados apresentados como critério de rejeição ou aceite dos materiais, servindo este estudo apenas como um norteador de futuros estudos para esta tão importante obra, o TAV brasileiro. Em outras palavras, devem-se considerar quaisquer resultados obtidos neste trabalho como pontuais.

Após os ensaios de alteração acelerada, observou-se que as perdas de resistência foram mais evidenciadas nas determinações da perda por desgaste no equipamento Los Angeles, onde a correlação entre valores das amostras naturais e cicladas apresentou uma tendência linear com R^2 de 0,95, indicando que para este ensaio é válida a experiência com apenas uma amostra natural e outra envelhecida. No caso dos testes mecânicos de choque (impacto) Treton e esmagamento, sugere-se que seja realizado uma série mais ampla de ensaios comparativos, envolvendo uma quantidade mais representativa de corpos de prova das rochas estudadas, para garantir a representatividade estatística dos ensaios de ciclagem acelerada e de ensaios em condição natural que também devem ser realizados para, conjuntamente, avaliar a degradação mecânica dos materiais petreos ao longo do tempo.

Quanto ao grau de alteração e granulometria das amostras no tocante à utilização como lastro, os experimentos realizados indicaram que os ensaios laboratoriais de alteração acelerada escolhidos mostraram-se lentos para a redução das propriedades estudadas. Isto considerando que os materiais utilizados são produtos de desmonte, o qual é realizado sem estudos específicos para o controle do microfissuramento; a variabilidade das características petrográficas peculiares a cada unidade geológica, bem como fatores extrínsecos à rocha, como temperatura, pH, Eh, quantidade de água e forças bióticas.

Em resumo, para a criação de um quadro comparativo de qualidade juntamente com resistência a intempérie do material, considerando as condições tropicais típicas do traçado da ferrovia, recomenda-se a execução de ensaios Micro-Deval aliada aos envelhecimento natural e artificial por saturação e secagem água/estufa, assim complementando as recomendações previstas em normas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 5564: Via Férrea – Lastro-Padrão- Requisitos e Métodos de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2014.
- ABNT NBR 6465: Agregados – Determinação da abrasão Los Angeles. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1984.
- ABNT NBR 6954. Lastro-padrão - Determinação da forma do material. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1989.
- ABNT NBR 12696 Agregados - Verificação do comportamento mediante ciclagem artificial água-estufa - Método de ensaio- Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1992
- ABNT NBR 8938 - Agregados - Determinação da resistência ao choque - Método de ensaio- Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1985
- ABNT NBR 7217: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1987.
- ABNT NBR 10341 Agregado graúdo para concreto - Determinação do módulo de deformação estático e do diagrama tensão-deformação em rocha matriz - Método de ensaio- Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2006
- ABNT NBR NM 51: Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles” Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001). . Rio de Janeiro. 6p.
- ABNT NBR 7389 (NB 47)- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). : Análise petrográfica de agregado para concreto. Parte 2. Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 9938: Agregados – Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos. Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT NBR NM 26 Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2009.
- ABNT NBR 15845. Rochas para revestimento – Métodos de Ensaio. Anexo E – Resistência a compressão uniaxial. Rio de Janeiro (2010e). p.16-18.
- ADIF (www.adiafaltavelocidade.es) consulta em dezembro 2014.
- AL-HARTHI, A.A. A field index to determine the strength characteristics of crushed aggregate. Bull Eng Geol Env. 60: 193-200. 2001.
- Almeida, F.F.M. *et al.* Aspectos evolutivos da geossutura Tocantins-Araguaia. *In: Sociedade Brasileira de Geologia, Congresso Brasileiro de Geologia, 34, Goiânia. Anais, 3:1269-1284. 1986.*
- AMIRKHANIAN, S., D. Kaczmarek, and J. Burati, "Effects of Los Angeles Abrasion Test Values on the Strengths of Laboratory-Prepared Marshall Specimens," Transportation Research Record, No. 1301, 1991, pp. 77-86.
- AREMA. Manual for Railway Engineering. Lanham: American Railway Engineering and Maintenance of Way Association – AREMA, 2009.
- ASTM D5731-95 Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications.
- ASTM (2014). D7012. Standard methods for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures. Philadelphia. 9p.
- ASTM D4644 – (2016) Standard Test Method for Slake Durability of Shales and Other Similar Weak Rocks.
- ASTM C88 – (2013) Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate

- BLUM, A; LASAGA, A. The role surface of especiation in the dissolution of the albite. *Geochimica e Cosmochimica Acta*. Oxford, v 55, p 2193-2201, 1991.
- BORGES, C.K.O.; ALMEIDA, P.C.M.; XAVIER, G.C. Uso dos ensaios de desgaste para o estudo da perda de massa da rocha basáltica do enrocamento da usina hidrelétrica de Marimbondo. *Proceedings... Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, Mecânica das Rochas e Engenharia de Rochas para Inovação e Desenvolvimento. Conferência Especializada ISRM 2016*. 7p. Formato eletrônico.2016.
- BOUCHER, D.L.; SELIG, E. T. Application of Petrographic Analysis to Ballast Performance Evaluation. *Transportation Research Record*, Washington, D. C., n. 1131, p.15-25, 1987
- 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, 1985. v. 2. p. 561-571.
- CASEY, W. H., BUNKER, B. The Leaching Mineral and Glass Surfaces During Dissolution. Ed. I *Mineral Water interface Geochemistry*. Washinton Mineralogical Society fo America, 1996.
- CASTELLO BRANCO, J. E. S. A segregação da infraestrutura como elemento reestruturador do sistema ferroviário de carga no Brasil. Tese (doutorado). Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2008, pp. 219.
- CHRISMER, S. M. Considerations of factors affecting ballast performance. *Bulletin 704 of the American Railway Engineering Association*. Vol. 87, 1986, pp. 118-150.
- CLAISSE, P; CALLA, C. Rail ballast conclusions from a historical perspective. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. Transport 159. Maio, 2006 . p. 69–74.
- COMISSION FOR INTEGRATED TRANSPORT – UK. *High Speed Rail:International Comparisons*. Final Report, Londres, fev. 2004.
- CPRM. Mapeamento Geológico geotécnico do Traçado referencial do Trem de Alta Velocidade TAV. *Relatório Técnico*, 2009.
- DA SILVA, M. L. (2002). *Fundamentos teórico-experimentais da Mecânica dos Pavimentos Ferroviários e esboço de um sistema de gerência aplicado à manutenção da via permanente*. Tese de Doutorado. UFRJ, 2002.
- DANTAS, A.S.L. *Geologia da Faixa São Roque e Intrusivas Associadas na Região entre São Paulo e Mairiporã, Norte de São Paulo - SP*. São Paulo. 217 p. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. 1990.
- DIAS FILHO, J. L. E. Estudo do Efeito da Energia de Desgaste na Previsão da Durabilidade de Gnaises Ornamentais de Pádua-RJ- *Dissertação de mestrado apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro*, 2012.
- DIAS FILHO, J. L. E; MAIA, P. C. A; XAVIER, G. de C.; FERNANDES, P. A. M. Estudo do Efeito da Energia de Desgaste na Previsão da Durabilidade de Gnaisse Ornamental de Pádua-RJ. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA*, 16., 2012, Porto de Galinhas/PE. 7p. 2012.
- DNER-IE 006- Departamento Nacional de Estradas e Rodagem- *Análise petrográfica, instruções de ensaio* -1994
- Drever, J. I., 1988. *The Geochemistry of Natural Waters*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 437 p

- EN 13450 (DIN 2013) Aggregates for railway ballast”, Maio 2013.
- EN 1097-1(DIN 2011) Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 1: Determination of the resistance to wear (micro-Deval).
- FARJALLAT, J.E.S. Estudos experimentais sobre degradação de rochas basálticas. São Paulo. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências e Astronomia da Universidade de São Paulo. 1971.
- FARJALLAT, J.E.S; MONTEZZO NETO, V.; RATTI, G. Relações entre desagregação de rochas basálticas e seu conteúdo em argilas expansivas. In: Semana Paulista de Geologia Aplicada, 4, 1972, São Paulo. Anais...São Paulo: APGA. p.123-155. 1972.
- FARMER, I. W. Engineering properties of rocks. Spon, Londres, 1968, 180pp
- FRANKLIN, J.A. *et al.* Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties. In: Brown, E.T. Rock characterization testing and monitoring: ISRM Suggested Methods. London:Pergamon Press, p.79-89. 1981.
- FRAZÃO, E.B. A importância das características tecnológicas da pedra britada para lastro ferroviário. Solos e Rochas. V.10. N.3. p.11-20. 1987.
- FRAZÃO, E.B. Metodologia para avaliação da alterabilidade de rochas a partir de estudo experimental em amostras de basaltos da UHE de Três Irmãos - Estado de São Paulo. São Carlos. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 1993.
- FRAZÃO, E.B. Alteração de rochas como critério de seleção de agregados. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. 123p. 2012.
- FRAZÃO, E.B.; CARUSO, L.G. (1983) Síntese do conhecimento sobre alterabilidade de rochas basálticas como material de construção em algumas barragens da Bacia do Alto Paraná. In: SIMPÓSIO SOBRE A GEOTECNIA DA BACIA DO ALTO PARANÁ, São Paulo. Anais. São Paulo, ABMS/ABGE. v.2.A, p.21-33.
- FRAZÃO, E.B.; FRASCÁ, M.H.B.O. Relação entre índice petrográfico e índices de alterabilidade na previsão da desagregabilidade de rochas basálticas. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 9, 1999, São Pedro. Anais... São Pedro: ABGE. p.253-263. 1999.
- Frazão, E.B.; Paraguassú, A.B. (1998). Materiais Rochosos para Construção. In: *Geologia de Engenharia*, São Paulo: ABGE. p.331-342.
- Frazão, E. B.- Agregados para a construção civil no Brasil – Capítulo 1- Organização : Tannús, M. B., Cardoso, J. C. C. -: contribuições para a formulação de políticas públicas.CETEC. 2007
- GALEMBECK, T.M.B. Aspectos geológicos e geoquímicos da Intrusão Cabreúva - Complexo granitóide Itu (SP). Rio Claro, 1991. 195 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Universidade Estadual Paulista.
- GALEMBECK, T.M.B.; WERNICK, E.; ARTUR, A.C. Estruturação, faciologia e petrografia da Intrusão Cabreúva, Complexo Rapakivi Itu, SP. In: SIMP. GEOL. SUDESTE, 2. São Paulo, 1991. Atas... São Paulo, SBG/NSP-NRJ. p. 113-120. 1991.
- GALEMBECK, T. M. B. ; WERNICK, Eberhard ; GODOY, Antonio Misson . Tipologia de Zircão de Granitos (I) e (A) (Rapakivi) coexistentes no Complexo Granitóide Itu, SP. Geociências (São Paulo), São Paulo, v. 20, n.1/2, p. 25-36, 2001.
- GASS, I.G.; SMITH, P.J.; WILSON, R.C.L. Vamos Compreender a Terra. Liv. Almedina. Coimbra. 450 p. 1978.

- GIANNAKOS, K. Loads on track, Ballast Fouling and Life-cycle under Dynamic Loading in Railways. *Journal of Transportation Engineering*. ASCE. 136 (12): 1075-1084. 2010.
- GIANNAKOS, K. ; LOIZOS, A.; PLATI, C. Ballast Specifications' Requirements Related to Ballast Hardness and Life-Cycle. *Modern Traffic and Transportation Engineering Research (MTTER)* MTTER 3 (2): 37-47. 2014.
- GIANNAKOS, K. ; LOIZOS, A.; PLATI, C. Railway ballast requirements for high speed and heavy haul lines: hardness, fouling, life cycle. 2013
- GOLDICH, S. S. A study in rock weathering. *Journal of Geology*, Chicago, v. 46, p. 11-58, 1938.
- GOKALP, I.;UZ, V.U.; SALTAN, m. Testing the abrasion resistance of aggregates including by-products by using Micro-Deval apparatus with different standard test methods. *Construction and Building Materials*. N. 123, p.1-7. 2016.
- GOMES, R. L. Características tecnológicas e alterabilidade dos compartimentos entablamento e colunata de derrames basálticos da porção setentrional da bacia do Paraná. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 2001.
- GUZZI, T.C.E. índices de alteração e de alterabilidade de rochas. Aplicação para amostras de basalto da Pedreira Bandeirantes. São Carlos. 68p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 1995.
- Hanna, A., K. Folliard, and K. Smith, "Aggregate Tests for Portland Cement Concrete Pavements: Review and Recommendations," *Research Results Digest*, No. 281, NCHRP, 2003.
- HASUI, Y. *et al.* Os granitos e granitóides da região de dobramentos sudeste nos estados de São Paulo e Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, XXX, Recife, 1978c. *Anais do...*, Recife, SBG, 1978. v. 6, p. 2594-2608.
- 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., 378 p., 1984.
- HYPÓLITO, R.; VALARELLI, J.V. Alteração experimental de diabásios. In: *Semana Paulista de Geologia Aplicada*, 4, 1972, *Anais...*São Paulo:APGA, p.103-122. 1972.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. (1980). *Características Tecnológicas das Rochas Ornamentais Utilizadas como Materiais de Construção Civil do Estado de São Paulo*. São Paulo. (IPT, relatório, 14.710).
- International Society for Rock Mechanics (1985). Commission on testing methods, Suggested methods for determining point load strength. In: *International Journal on Rock Mechanics Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Great Britain, v.22, n.2, p. 51-60.
- JULIANI, C., BELIAVSKIS, P., SCHORSCHER, H.D. Petrogênese do Vulcanismo e Aspectos Metalogenéticos Associados:Grupo Serra do Itaberaba na Região do São Roque –SP. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 34, Goiânia, *Anais*, 2:730-745. 1986.
- JUNQUEIRA, J. H. N. A ferrovia de alta velocidade para o transporte de passageiros, um estudo de caso brasileiro. Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado). Instituto Militar de Engenharia. 1979.
- KALINOWSKI, B. E. Dissolution kinetics and alteration products of [nics and epidote In acidro solutions at room temperature. 1997. 62 p. Doctoral (Thesis) - Stockholm University, Stockholm.

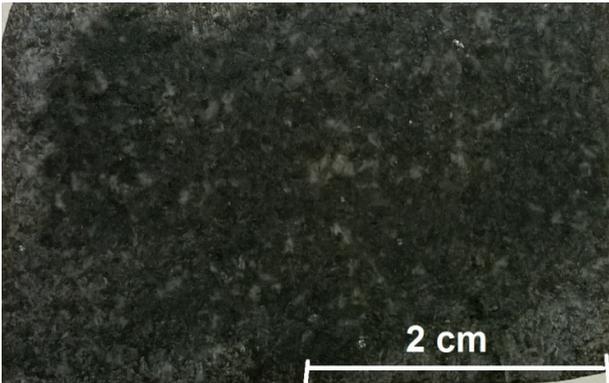
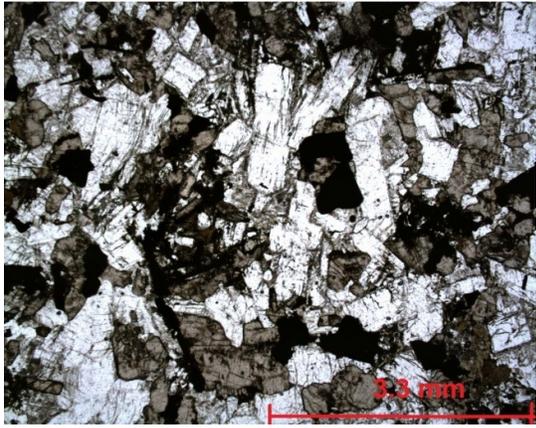
- KEIKHA, T.; KEYKHA, H.A. Correlation between mineralogical characteristics and engineering properties of granitic rocks. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. V.18. N.5. p.4055-4065. 2013.
- KLINCEVICIUS, M. G. Y. Estudo de propriedade de tensões do comportamento mecânico de lastros ferroviários. São Paulo. 171p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2011.
- LEA'S Chemistry of Cement and Concrete " Ed. Peter C. Hewelett and Ed. Arnold U. K. I, 1998
- LASAGA, A. C. Atomic treatment of mineral-water surface reactions. In: HOCELLA JR., M. F.; WHITE, A. F. (Ed.). *Mineral-water interface geochemistry*. Washington, DC: Mineralogical Society of America, 1990. p. 17- 80. (Reviews in Mineralogy, v. 23).
- MACHADO, F.B.; NARDY, A.J.R.; OLIVEIRA, M.A.F. Geologia e aspectos petrológicos das rochas intrusivas e efusivas mesozóicas de parte da borda leste da bacia do Paraná no estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*. 37(1): 64-80. 2007
- MAIA, P.C.A. Avaliação do comportamento geomecânico e de alterabilidade de enrocamentos. Rio de Janeiro. Tese (Doutorado). Pontifícia Universidade Católica. 2001.
- MARRANO, A. Caracterização tecnológica de rochas basálticas da usina hidrelétrica Canoas I, Rio Paranapanema, SP/BR. São Carlos. 208p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 1997.
- MARRANO, A.; PARAGUASSÚ, A.B. Caracterização tecnológica de rochas basálticas da usina hidrelétrica Canoas I, Rio Paranapanema, SP/BR, Brasil. *Solos e Rochas*. V.21. N.3. p.143-164. 1998.
- MARQUES, L.S.; ERNESTO, M. O magmatismo toleítico da Bacia do Paraná. In: MANTESSO-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. p. 3. 1988.
- MEURER, P. *et al.* Influência da composição mineralógica de rochas matrizes nas propriedades físico-químicas e mecânicas de agregados beneficiados para a pavimentação. *Proceedings... Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, Mecânica das Rochas e Engenharia de Rochas para Inovação e Desenvolvimento. Conferência Especializada ISRM 2016*. 7p. Formato eletrônico.2016.
- MONTICELLI, J.P. *et al.* O uso da análise petrográfica e micromorfológica na determinação dos graus de alteração de um maciço rochoso gnáissico. *Proceedings... Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, Mecânica das Rochas e Engenharia de Rochas para Inovação e Desenvolvimento. Conferência Especializada ISRM 2016*. 8p. Formato eletrônico.2016.
- NAGALLI, B.; VASCONCELLOS, E. M. G. ; NAGALLI, A. . Correlation between petrographic and physico-mechanical variables of basalts of the Paraná Magmatic Province. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, v. 21, p. 363-374, 2016.
- NALSUND, R. Effect of grading on degradation of crushed-rock Railway Ballast and on Permanent Axial Deformation. *Transportation Research Record*, Washington, D. C., No. 2154. p.149-155. 2014.

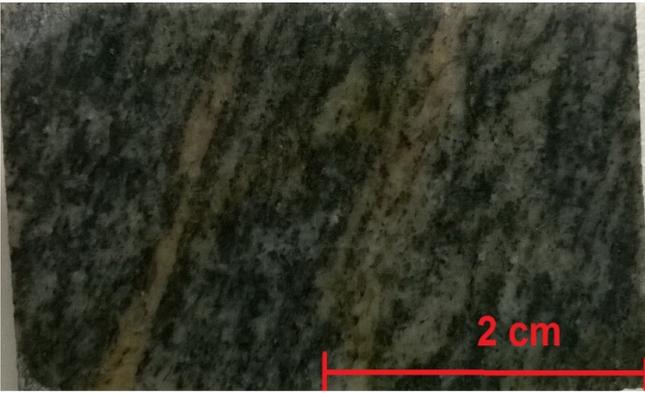
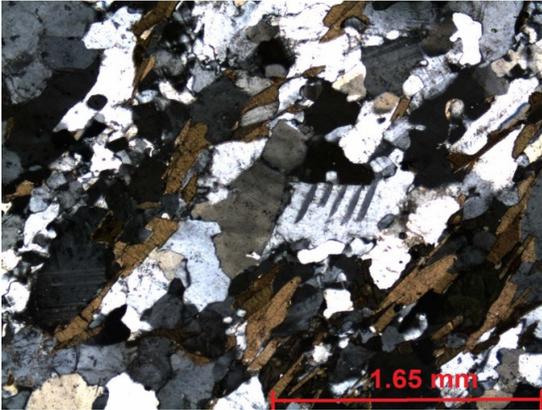
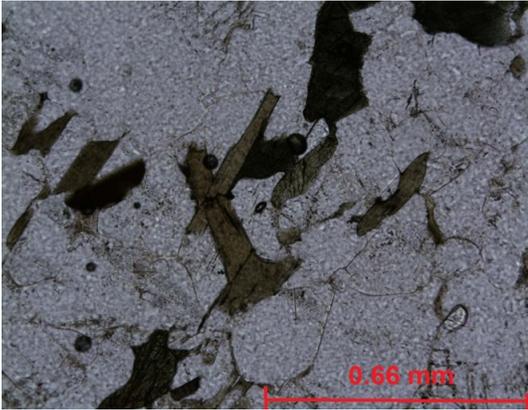
- PAC -Programa de Aceleração do Crescimento – site www.pac.gov.br/obra/8173, consultado em janeiro 2015.
- OLIVEIRA, P.C.; PATIAS, J.; ZUQUETTE, L.V. Considerações sobre o ensaios de ciclagem acelerada (NBR 12696) aplicadas a litotipos basálticos da área da Usina Hidrelétrica de Itaipu. In: XXIX Seminário Nacional de Grandes Barragens. Porto de Galinhas. p.1-20. 2013.
- PADERNO, Chiara, Comportement du ballast sous l'action du bourrage et du trafic ferroviaire- Programme Doctoral En Structures - École Polytechnique Fédérale De Lausanne, 2010.
- PARAGUASSÚ, A.B. *et al.* Indústria da Pedra: da Extração à aplicação final. São Carlos: EESC-USP. 130p. Formato eletrônico:2014.
- PARIZOTTO, J.C.V. Degradação hidromecânica de rochas brandas silto-argilosas. São Carlos. 231p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 2015.
- PARIZOTTO, J.C.V ; RIBEIRO, R.P. ; PARAGUASSÚ, A.B. Rochas brandas: extração e preparação de corpos de prova para estudos geomecânicos. Proceedings... Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, Mecânica das Rochas e Engenharia de Rochas para Inovação e Desenvolvimento. Conferência Especializada ISRM 2016. 8p. Formato eletrônico.2016.
- RAYMOND, G. P. Railroad ballast specification and evaluation. Queen's University, Lecture Notes, Kingston, Canada, 1985.
- RAYMOND, G. P. Railroad ballast specification and evaluation. Queen's University, Lecture Notes, Kingston, Canada, 1995.
- SALES, R.O.; MAIA, P.C.A. Estudo experimental da durabilidade de rochas ornamentais através de procedimentos especiais de laboratório. In:Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 13, Curitiba. 2006.
- SELIG, E.T.; BOUCHER, D.L. Abrasion tests for railroad ballast. Geotechnical Testing Journal. 13(4):301-311.1990.
- SELIG, E.T., WATERS, J.M. Track geotechnology and substructures Management. Londres: Thomas Telford Services Ltd. 446p. 1994.
- SOARES, L. C. Ferrovia de Alta Velocidade no Corredor Rio de Janeiro - São Paulo: Proposta de Modelo de Financiamento. Rio de Janeiro: 142p. Dissertação (Mestrado). Instituto Militar de Engenharia. 2005.
- SOUZA JR, N.N. O (1992). O “Entablamento” em Derrames Basálticos da Bacia do Paraná: Aspectos Genéticos e Caracterização Geotécnica. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos - USP, 257 p.
- SPARKS, D.L. Kinetics of soil chemical processes. London: Academic Press. 210p. 1989.
- SSF Ingeniure- portfólio digital – <http://www.ssf-ing.de>. (consultado em abril 2014)
- TAV Brasil: Vol 4 - Operações Ferroviárias e Tecnologia - Relatório Final- Consorcio Consórcio Halcrow – SINERGIA Estudos e Projetos LTDA-2009.
- UIC, 2005a. High Speed. Rail's Leading Asset for Customers and Society. UIC Publications, Paris November 2005. Accessible at: [/www.uic.asso.fr](http://www.uic.asso.fr) Speed. 2002a.
- VALEC – ENGENHARIA, CONSTRUÇÕES E FERROVIAS S.A.) 2012Estudo de viabilidade técnica e Ambiental (EF-151) Relatório final volume.
- VERHOEF, P.N.W. & VAN DE WALL, A.R.G. (1998). Application of petrography in durability assessment of rock construction materials. Aggregate Resources, Balkema, p. 307-330.

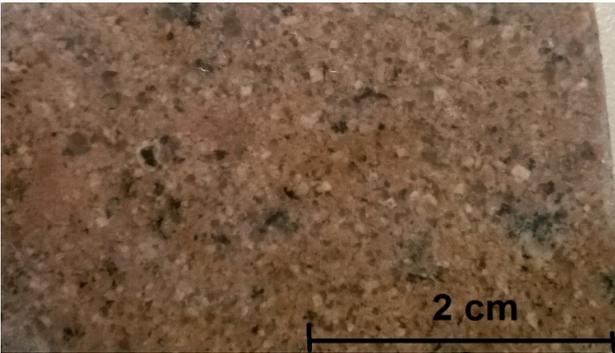
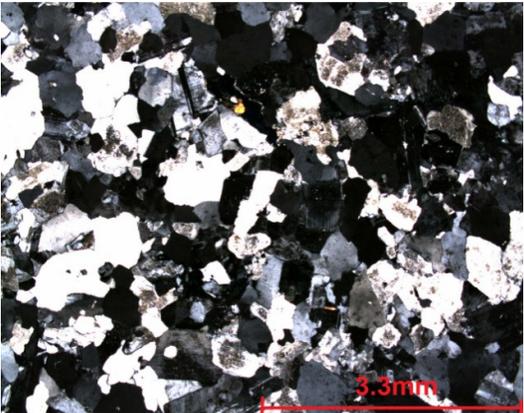
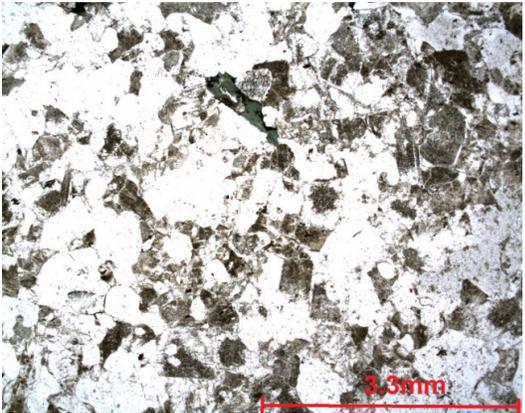
- VLACH, S.R.F. Geologia, petrografia e geocronologia das partes meridional e oriental do Complexo de Morungaba, SP. São Paulo. 253p. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. 1985.
- WATTERS, B. R., KLASSEN, M. J., CLIFTON, A. W. Appendix: CP Rail specification for ballast. Transportation Research Record, TRB,. 1131:59-63, 1987.
- WERNICK, E. *et al.* 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.
- WHITE, A F.; BLUM, A E.; BULLEN, T. D.; VIVIT, D. V.; SCHULZ, M.; FITZPATRICK, J. The effect of temperature on experimental and natural chemical weathering rates of granitoid rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Oxford, v. 58, p. 2761-2775, 1999.
- YOKOIAMA, Atuchi. Infrastructure for High Speed Lines in Japan (*International practicum on implementing High speed rail in United Statesem, 2011*).

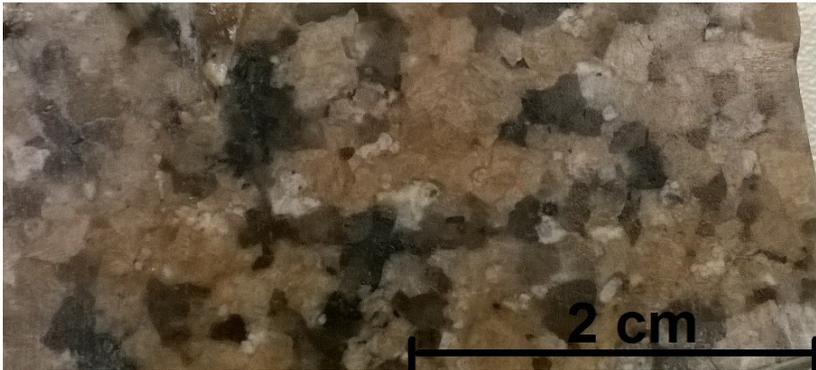
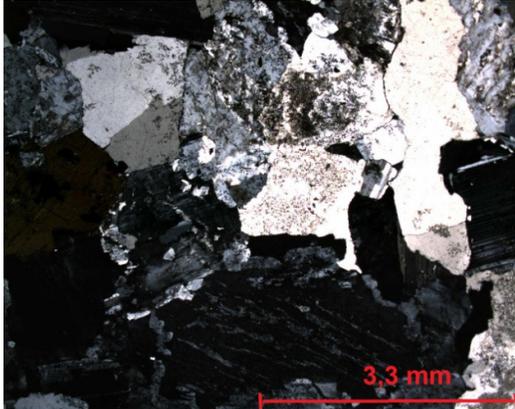
APÊNDICE A

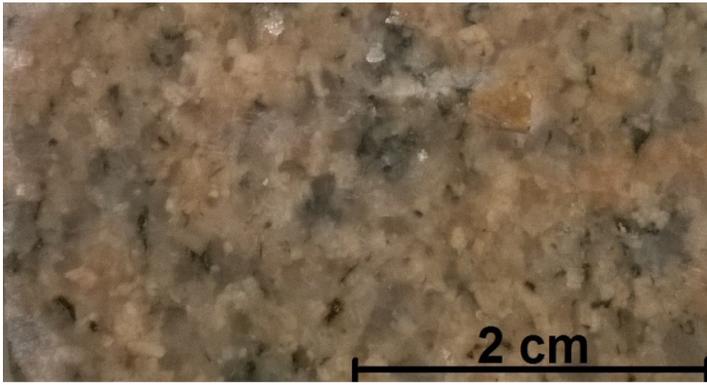
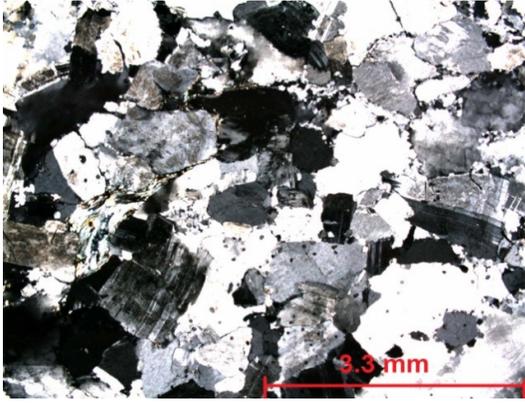
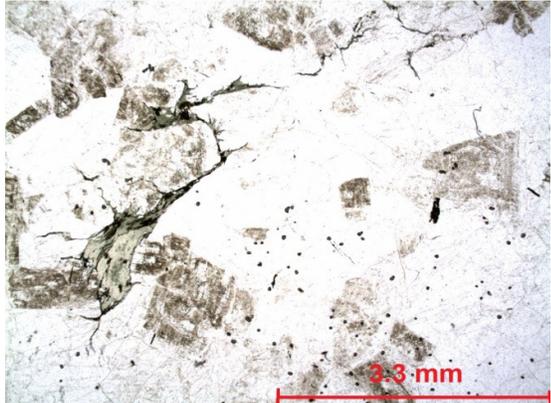
FICHAS DE ANÁLISES PETROGRÁFICAS

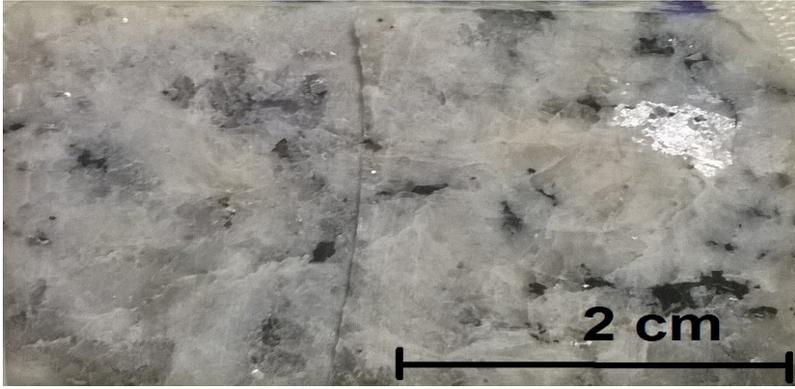
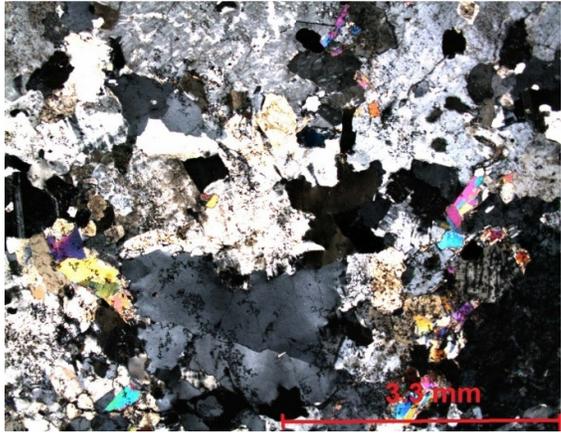
AMOSTRA	INTRUSIVA BASICA
DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA	
COR DA ROCHA SÃ: Cinza escuro	
COR DA ROCHA ALTERADA: Amarelo escuro	
GRANULAÇÃO: Fina	
TEXTURA: Equigranular	
ESTRUTURA: Maciça granular	
GRAU DE ALTERAÇÃO: Incipiente / baixo	
MINERAIS OBSERVÁVEIS: Plagioclásio, biotita e piroxênio.	
NOTAS: Rocha de aspecto são, macroscopicamente equigranular. Provável presença de magnetita.	
	
MICROSCOPIA	
GRANULAÇÃO: Fina, entre 0,5 e 1,5mm	
GRAU DE ALTERAÇÃO: Baixo, do tipo intempérico	
ESTADO MICROFISSURAL: grau baixo, do tipo intragranular	
MINERAIS ESSENCIAIS: Plagioclásio (46%); augita (36%), opacos(magnetitas) 16 (%).	
MINERAIS ACESSÓRIOS: Apatita 1%, epídoto 1%, quartzo 1%.	
MINERAIS SECUNDÁRIOS: Sericita e/ou saussurita.	
NOTAS: Apresenta incipiente sericitizaçãoe/ou saussuritização; alguns óxidos podem ser encontrados, mas sem relação com supergênese.	
FOTOMICROGRAFIAS	
	
Nicóis cruzados	Nicóis Paralelos
CLASSIFICAÇÃO DA ROCHA	Microgabro

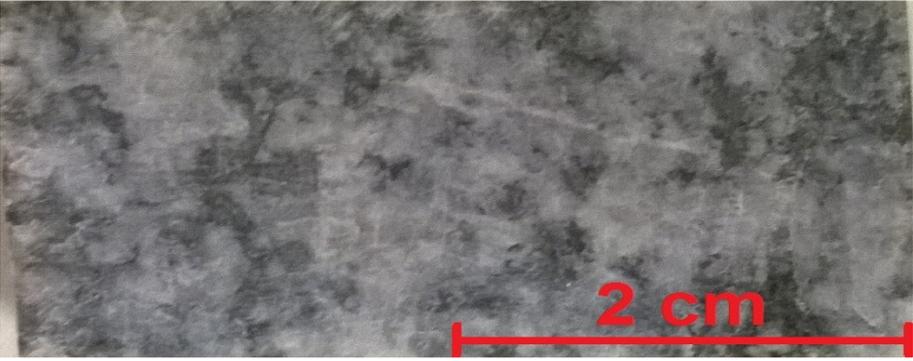
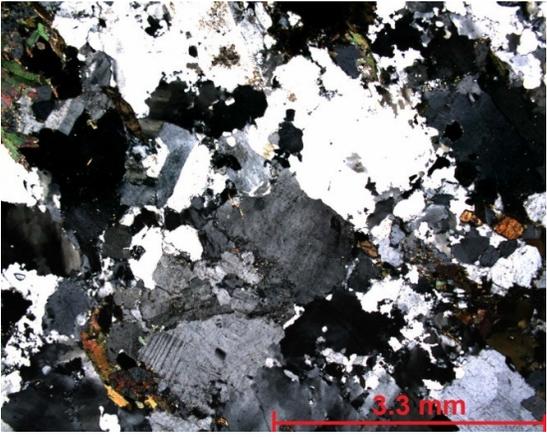
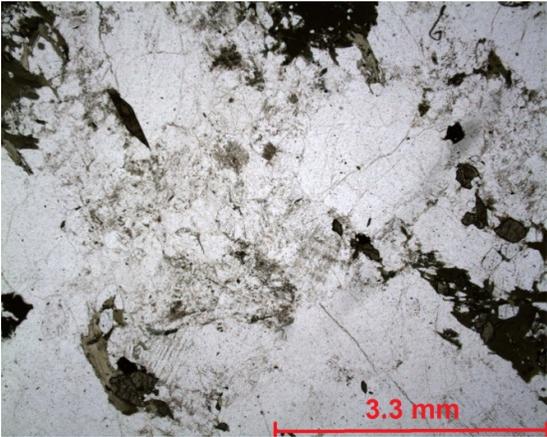
AMOSTRA	COMPLEXO VARGINHA-GUAXUPÉ
DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA	
COR DA ROCHA SÃ: Cinza	
COR DA ROCHA ALTERADA: Cinza esbranquiçado	
GRANULAÇÃO: Fina	
TEXTURA: Inequigranular fina	
ESTRUTURA: Foliação ou bandamento gnáissico	
GRAU DE ALTERAÇÃO: Incipiente / baixo	
MINERAIS OBSERVÁVEIS:: Quartzo, feldspato alcalino, plagioclásio, biotita, anfibólio	
NOTAS: Rocha apresenta bandamento quartzo feldspático.	
	
MICROSCOPIA	
GRANULAÇÃO: Fina, entre 0,1 e 1,5 mm	
METAMORFISMO: Regional do fácies anfibolito	
GRAU DE ALTERAÇÃO: Baixo, do tipo intempérico	
ESTADO MICROFISSURAL: Preferencialmente intragranular	
MINERAIS ESSENCIAIS: Feldspato alcalino (39%), plagioclásio (29%); quartzo (24%), biotita (5%)	
MINERAIS ACESSÓRIOS: Apatita (1%), zircão (1%)	
MINERAIS SECUNDÁRIOS: Sericita e/ou saussurita., óxidos (<1%)	
NOTAS: Apresenta sericitizaçãoe/ou saussuritização baixos, alguns óxidos encontram-se associados ao minerais máficos	
FOTOMICROGRAFIAS	
	
Nicóis cruzados	Nicóis paralelos
CLASSIFICAÇÃO DA ROCHA	Gnaisse

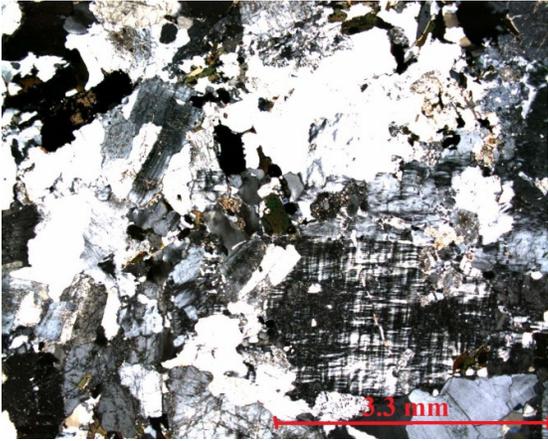
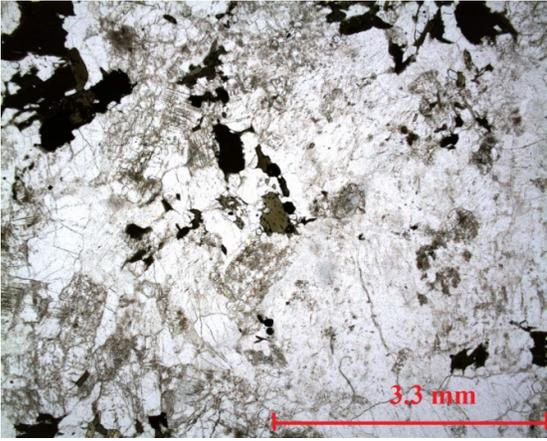
AMOSTRA	COMPLEXO MORUNGABA
DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA	
COR DA ROCHA SÃ: Rosa	
COR DA ROCHA ALTERADA: Rosa	
GRANULAÇÃO: Fina a média	
TEXTURA: Equigranular	
ESTRUTURA: Maciça granular	
GRAU DE ALTERAÇÃO: Incipiente / baixo	
MINERAIS OBSERVÁVEIS: Quartzo, Plagioclásio, Feldspato Alcalino, biotita	
NOTAS: Rocha de aspecto são, macroscopicamente equigranular.	
	
MICROSCOPIA	
GRANULAÇÃO: Entre 0,5 e 1,5 mm	
GRAU DE ALTERAÇÃO: Incipiente a baixo, do tipo intempérico	
ESTADO MICROFISSURAL: Intragranular	
MINERAIS ESSENCIAIS: Feldspato alcalino (39%); plagioclásio (29%); quartzo (25%); biotita (5%), muscovita (1%)	
MINERAIS ACESSÓRIOS: Zircão, titanita, opacos (1%)	
MINERAIS SECUNDÁRIOS: Sericita e saussurita e óxidos	
NOTAS: Rocha exibe processos de sericitização e/ou saussuritização pouco intensos; alguns óxidos são encontrados mas sem relações com supergênese.	
FOTOMICROGRAFIAS	
	
Nicóis cruzados	Nicóis Paralelos
CLASSIFICAÇÃO DA ROCHA	Biotita monzogranito

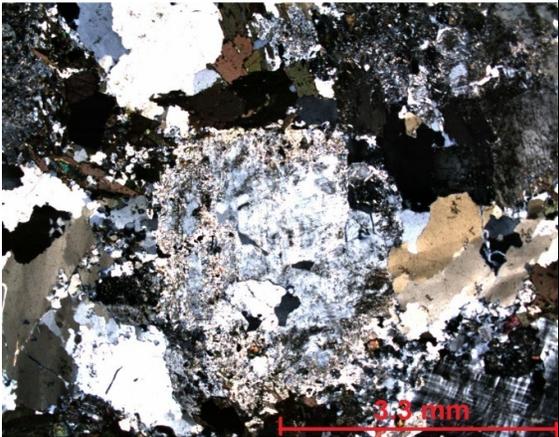
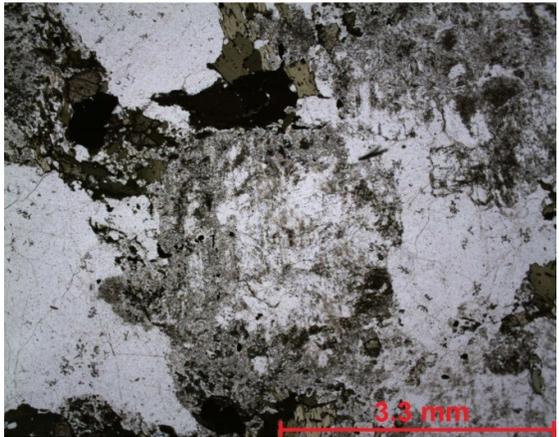
AMOSTRA	COMPLEXO ITU
DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA	
COR DA ROCHA SÃ: Rosa	
COR DA ROCHA ALTERADA: Rosa esbranquiçado	
GRANULAÇÃO: Grossa	
TEXTURA: Equigranular	
ESTRUTURA: Maciça granular	
GRAU DE ALTERAÇÃO: Incipiente a baixo	
MINERAIS OBSERVÁVEIS : Quartzo, plagioclásio, feldspato alcalino, biotita, anfibólio	
NOTAS: Rocha de aspecto são, equigranular.	
	
MICROSCOPIA	
GRANULAÇÃO: Entre 2 e 5 mm	
GRAU DE ALTERAÇÃO: Baixo a moderado, do tipo intempérico	
ESTADO MICROFISSURAL: Intragranular	
MINERAIS ESSENCIAIS: Quartzo (40%); feldspato alcalino (30%); plagioclásio (20%); hornblenda (5%), biotita (2%).	
MINERAIS ACESSÓRIOS: Zircão, titanita, opacos (2%)	
MINERAIS SECUNDÁRIOS: Sericita, saussurita e óxidos (1%)	
NOTAS: Observa-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.	
FOTOMICROGRAFIAS	
	
Nicóis cruzados	Nicóis Paralelos
CLASSIFICAÇÃO DA ROCHA	Monzogranito

AMOSTRA	GRANITO TERRA NOVA
DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA	
COR DA ROCHA SÃ: Rosa	
COR DA ROCHA ALTERADA: Rosa claro	
GRANULAÇÃO: Média	
TEXTURA: Equigranular	
ESTRUTURA: Maciça granular	
GRAU DE ALTERAÇÃO: Baixo a moderado	
MINERAIS OBSERVÁVEIS: Quartzo, feldspato alcalino, plagioclásio, biotita, muscovita	
NOTAS: Rocha apresenta bandamento quartzo feldspático.	
	
MICROSCOPIA	
GRANULAÇÃO: Entre 1,0 A 2 mm	
GRAU DE ALTERAÇÃO: Baixo a moderado, do tipo intempérico	
ESTADO MICROFISSURAL: Intergranular	
MINERAIS ESSENCIAIS: Feldspato alcalino (42%), plagioclásio (30%), quartzo 20(%), biotita (5%), muscovita (1%)	
MINERAIS ACESSÓRIOS: Apatita (1%), zircão (1%)	
MINERAIS SECUNDÁRIOS: Sericita e/ou saussurita., óxidos (<1%)	
NOTAS: Comparativamente ao monzogranito do COMPLEXO ITU, observa-se que os processos de sericitização e/ou saussuritização dos feldspatos são pouco menos evidentes. Alguns óxidos encontram-se associados à biotita; alguns óxidos ocorrem associados à biotita.	
FOTOMICROGRAFIAS	
	
Nicóis cruzados	Nicóis Paralelos
CLASSIFICAÇÃO DA ROCHA	Biotita monzogranito

AMOSTRA	GRANITO MORRO DO TICO-TICO
DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA	
COR DA ROCHA SÃ: Branco acinzentado	
COR DA ROCHA ALTERADA: Branco amarelado	
GRANULAÇÃO: Grossa	
TEXTURA: Fanerítica inequigranular (porfírica)	
ESTRUTURA: Maciça granular	
GRAU DE ALTERAÇÃO: Incipiente a baixo	
MINERAIS OBSERVÁVEIS: Quartzo, plagioclásio, feldspato alcalino, biotita, muscovita	
NOTAS: Lamelas de biotita destacam-se configurando uma coloração amarela esverdeada em algumas porções da amostra.	
	
MICROSCOPIA	
GRANULAÇÃO: 1 até maior que 20 mm	
GRAU DE ALTERAÇÃO: baixo a moderado, dos tipos intempéricos e hidrotermal	
ESTADO MICROFISSURAL: Intragranular	
MINERAIS ESSENCIAIS: Microclínio (43%), quartzo (34%); plagioclásio (14%), muscovita (5%), biotita (2%)	
MINERAIS ACESSÓRIOS: Turmalina, apatita, zircão, granada (2%)	
MINERAIS SECUNDÁRIOS:	
NOTAS: Observam-se abundantes lamelas de exsolução onde ????, com variação elevada da granulação.	
FOTOMICROGRAFIAS	
	
Nicóis cruzados	Nicóis Paralelos
CLASSIFICAÇÃO DA ROCHA	Biotita sienogranito

AMOSTRA	GRANITO TAIPAS
DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA	
COR DA ROCHA SÃ: Cinza	
COR DA ROCHA ALTERADA: Cinza amarelado	
GRANULAÇÃO: Grossa	
TEXTURA: Fanerítica inerquigranular	
ESTRUTURA: Maciça granular	
GRAU DE ALTERAÇÃO: Incipiente a baixo	
MINERAIS OBSERVÁVEIS: Quartzo, plagioclásio, feldspato alcalino, biotita, opacos (magnetita)	
NOTAS: Entre as rochas estudadas, presença proporcionalmente mais significativa de biotita verde a marrom; processos de saussuritização e/ou sericitização pouco evidentes.	
	
MICROSCOPIA	
GRANULAÇÃO: 2 a 10 mm	
GRAU DE ALTERAÇÃO: Incipiente a baixo, do tipo intempérico	
ESTADO MICROFISSURAL: Transgranular / intergranular	
MINERAIS ESSENCIAIS: Quartzo (39%), plagioclásio (24%), microclínio (24%), biotita (10%).	
MINERAIS ACESSÓRIOS: Titanita (1%).	
MINERAIS SECUNDÁRIOS: Óxidos associados à titanita (1%), sericita (1%)	
FOTOMICROGRAFIAS	
	
Nicóis cruzados	Nicóis Paralelos
CLASSIFICAÇÃO DA ROCHA	Monzogranito

AMOSTRA:	CANTAREIRA OESTE
DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA	
COR DA ROCHA SÃ: cinza	
COR DA ROCHA ALTERADA: cinza amarelado	
GRANULAÇÃO: grossa	
TEXTURA: inequigranular	
ESTRUTURA: maciça granular	
GRAU DE ALTERAÇÃO: incipiente / baixo	
MINERAIS OBSERVÁVEIS: Quartzo, Plagioclásio, Feldspato Alcalino, biotita, opacos (magnetita)	
	
MICROSCOPIA	
GRANULAÇÃO: Até 15mm	
GRAU DE ALTERAÇÃO: incipiente a baixo, do tipo intempérico	
ESTADO MICROFISSURAL: grau baixo, do tipo transgranular com microfissuras geralmente preenchidas por sericita	
MINERAIS ESSENCIAIS: Quartzo (40%); Plagioclásio (20%); Microclínio (35%); Biotita (5%).	
MINERAIS ACESSÓRIOS: Opacos (pirita e magnetita) (3%); Muscovita, Zircão, apatita e Epídoto (1%),	
MINERAIS SECUNDÁRIOS: Óxidos (1%)	
FOTOMICROGRAFIAS	
 <p>Nicóis cruzados</p>	 <p>Nicóis Paralelos</p>
CLASSIFICAÇÃO DA ROCHA:	Biotita sienogranito

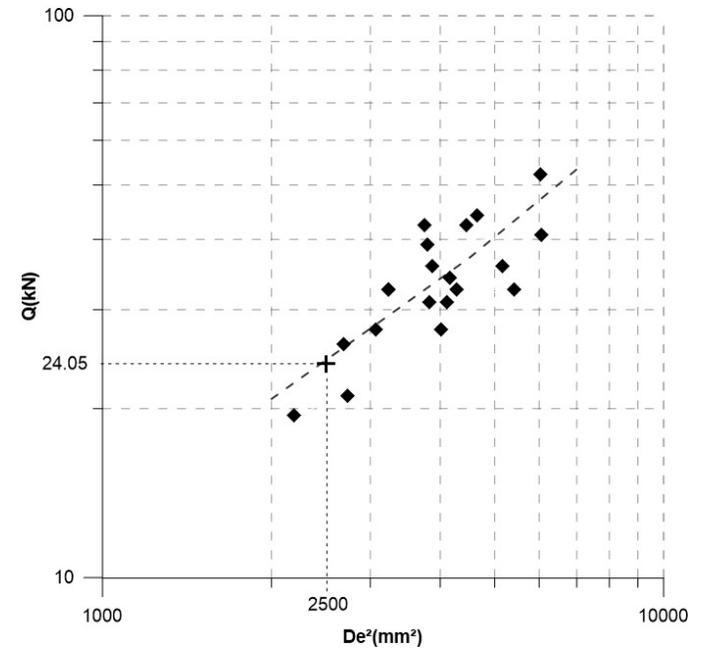
AMOSTRA	CANTAREIRA LESTE
DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA	
COR DA ROCHA SÃ: cinza	
COR DA ROCHA ALTERADA: cinza amarelado	
GRANULAÇÃO (mm): grossa	
TEXTURA: inequigranular	
ESTRUTURA: maciça granular	
GRAU DE ALTERAÇÃO: incipiente / baixo	
MINERAIS OBSERVÁVEIS : Quartzo, Plagioclásio, Feldspato Alcalino, biotita, opacos (magnetita)	
NOTAS: Biotita verde a marrom destacam-se dando uma coloração amarela esverdeada em algumas porções da amostra.	
	
MICROSCOPIA	
GRANULAÇÃO(mm): 2 até maior que 10 mm (microclínio)	
GRAU DE ALTERAÇÃO: baixo, do tipo intempérico	
ESTADO MICROFISSURAL: grau baixo, do tipo intragranular.	
MINERAIS ESSENCIAIS: Quartzo (35%); Plagioclásio (10%); Microclínio (45%); Biotita (5%).	
MINERAIS ACESSÓRIOS: Titanita euédrica (2%), muscovita, zircão (1%)	
MINERAIS SECUNDÁRIOS: Óxidos (1%), Sericita (1%), epidoto (1%)	
NOTAS: Os minerais opacos encontram-se associados à titanita e ou biotita. Fenômenos de exsolução, bem como de saussuritização e sericitização são evidentes e bastante avançados.	
FOTOMICROGRAFIAS	
	
Nicóis cruzados	Nicóis Paralelos
CLASSIFICAÇÃO DA ROCHA	Monzogranito

APÊNDICE B

DADOS E GRAFICOS DOS ENSAIOS DE CARGA PONTUAL

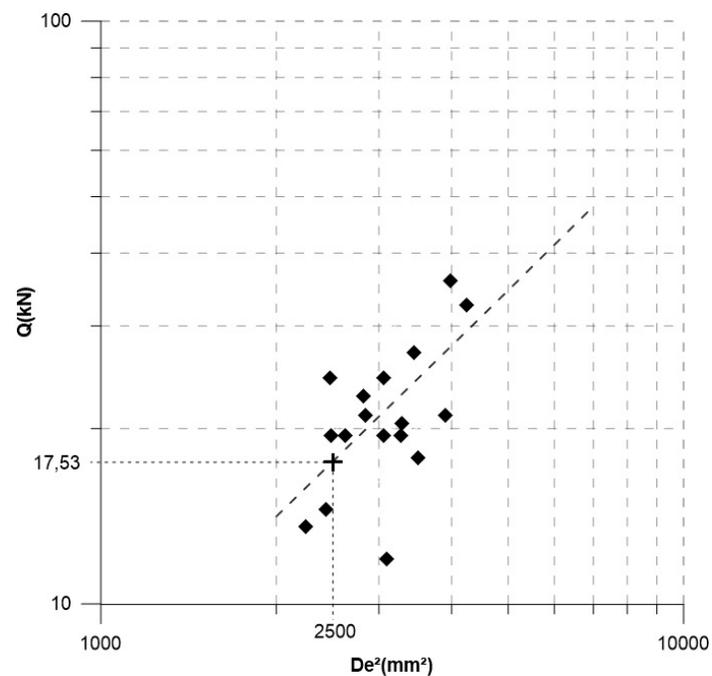
Ensaio de resistência à compressão puntiforme - Unidade Intrusivas Básicas

Nº Amostra	Dados			Resultados				
	D (mm)	W (mm)	P (kgf/cm ²)	D _e ² (mm ²)	Q (KN)	I _s (D _e) (MPa)	I _s 50 (MPa)	D _e (mm)
21	25	69	60	2196	19	8,86	8,6	46,9
20	37	57	80	2685	26	9,69	9,8	51,8
18	33	65	65	2731	21	7,73	7,9	52,3
16	34	71	85	3074	28	9,00	9,4	55,4
1	38,5	66	100	3235	33	10,07	10,7	56,9
14	41	62	100	3237	33	10,07	10,7	56,9
8	46	64	130	3749	42	11,32	12,4	61,2
9	42	71	120	3797	39	10,31	11,3	61,6
12	39	77	95	3824	31	8,09	8,9	61,8
10	38	80	110	3871	36	9,27	10,2	62,2
17	38	83	85	4016	28	6,89	7,7	63,4
11	43	75	95	4106	31	7,54	8,4	64,1
15	46	71	105	4159	34	8,23	9,2	64,5
7	41	82	100	4281	33	7,61	8,6	65,4
4	46	76	130	4451	42	9,53	10,9	66,7
5	53	69	135	4656	44	9,46	10,9	68,2
13	50	81	110	5157	36	6,95	8,2	71,8
6	50	85	100	5411	33	6,02	7,2	73,6
2	57	83	160	6024	52	8,68	10,6	77,6
3	56	85	125	6061	41	6,73	8,2	77,9
Média				4036	34	9,4		
Desvio Padrão				1055	8,0			
Estatística	Mínimo			2196	19			
	Máximo			6061	52			
Numero de amostras				20				
Gráfico	Q ₅₀ (KN)					24,05		
	I _s 50 (MPa)					9,6		
	R ²					0,55		



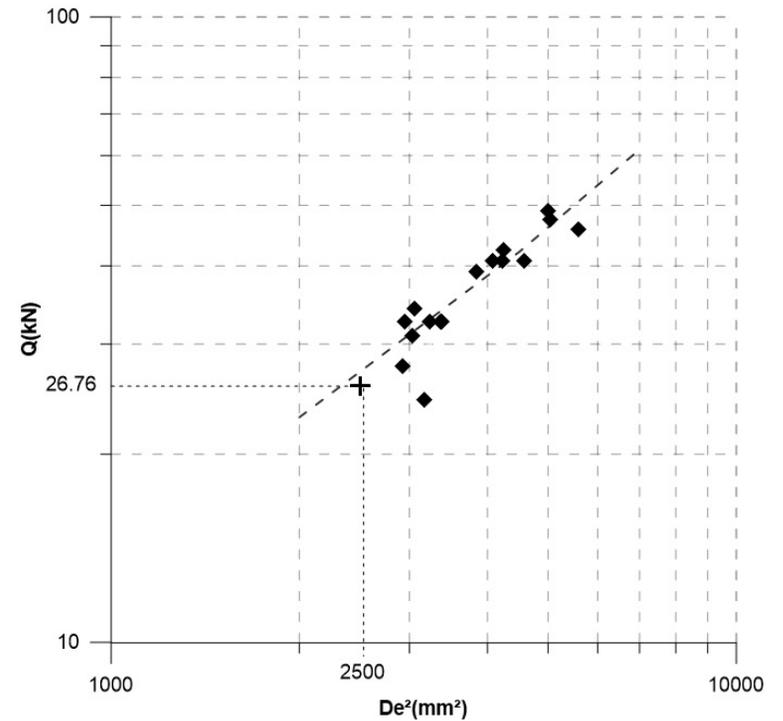
Ensaio de resistência à compressão pontiforme - Unidade Complexo Varginha Guaxupé

Nº Amostra	Dados			Resultados				
	D (mm)	W (mm)	P (kgf/cm ²)	D _e ² (mm ²)	Q (KN)	I _s (D _e) (MPa)	I _s 50 (MPa)	D _e (mm)
2	28,5	62	42	2250	14	6,03	5,9	47,4
12	41,5	46	45	2431	15	5,98	5,9	49,3
3	33,2	58,2	86	2460	28	11,38	11,3	49,6
20	38	51,2	75	2477	24	9,84	9,8	49,8
16	42	46,5	60	2487	19	7,83	7,8	49,9
5	42,5	46	110	2489	36	14,41	14,4	49,9
6	43	48	60	2628	19	7,41	7,5	51,3
19	46,5	47,6	70	2818	23	8,07	8,3	53,1
8	41,3	54	65	2840	21	7,43	7,6	53,3
9	42,8	56	75	3052	24	7,99	8,4	55,2
1	48	50	60	3056	19	6,37	6,7	55,3
18	45,5	53,5	37	3099	12	3,85	4,0	55,7
4	36,4	67,6	34	3133	11	3,49	3,7	56,0
7	45	57	60	3266	19	5,96	6,3	57,1
11	41	63	63	3289	20	6,22	6,6	57,3
14	38,2	70	30	3405	10	2,83	3,0	58,4
21	47,5	57	83	3447	27	7,83	8,4	58,7
17	38	72,5	55	3508	18	5,08	5,5	59,2
15	45,8	67	65	3907	21	5,40	6,0	62,5
22	54	58	110	3988	36	8,99	10,0	63,1
13	47	71	100	4249	33	7,67	8,6	65,2
Estatística	Média			3061	21,42			7,3
	Desvio Padrão			557	7,5			
	Mínimo			2250	10			
	Máximo			4249	36			
	Numero de amostras			21				
Gráfico	Q ₅₀ (KN)							17,53
	I _s 50 (MPa)							7,01
	R ²							0,55



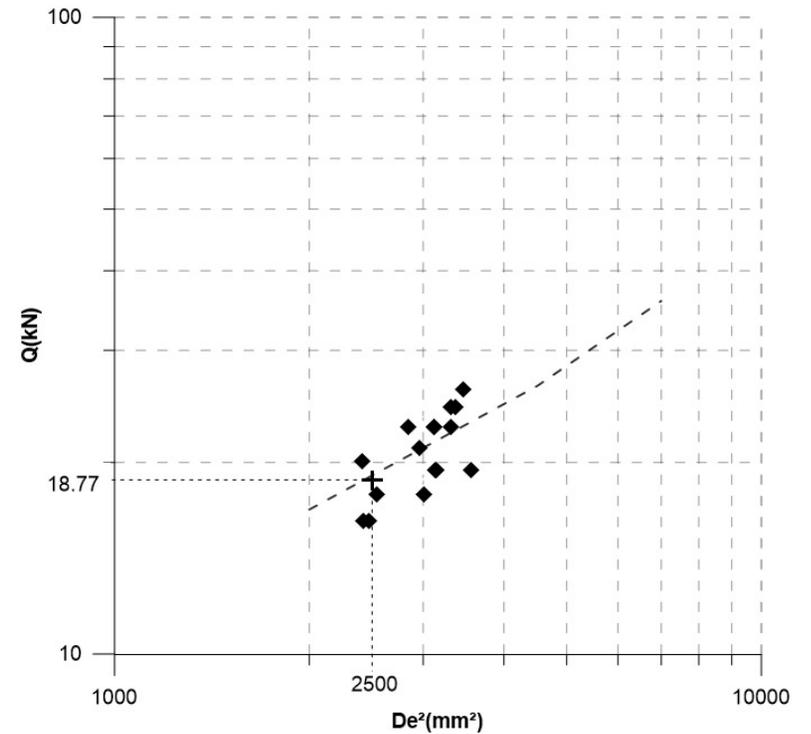
Ensaio de resistência à compressão puntiforme - Unidade Granito Morungada

Nº Amostra	Dados			Resultados				
	D (mm)	W (mm)	P (kgf/cm ²)	D _e ² (mm ²)	Q (KN)	I _s (D _e) (MPa)	I _s 50 (MPa)	D _e (mm)
16	50	34	55	2165	18	8,23	8,0	46,5
5	56	41	85	2923	28	9,46	9,8	54,1
2	61	38	100	2951	33	11,04	11,5	54,3
3	61	38	110	2951	36	12,15	12,6	54,3
10	53	45	95	3037	31	10,19	10,6	55,1
17	50	48	105	3056	34	11,20	11,7	55,3
12	71	35	75	3164	24	7,71	8,1	56,3
11	62	41	100	3237	33	10,07	10,7	56,9
18	63	42	100	3369	33	9,67	10,3	58,0
7	68	39	100	3377	33	9,65	10,3	58,1
20	58	52	120	3840	39	10,19	11,2	62,0
14	72	43	80	3942	26	6,60	7,3	62,8
13	80	40	125	4074	41	10,01	11,2	63,8
9	65	51	125	4221	41	9,66	10,9	65,0
1	68	49	130	4243	42	10,00	11,3	65,1
19	67	51	150	4351	49	11,26	12,8	66,0
4	61	59	125	4583	41	8,90	10,2	67,7
6	74	53	150	4994	49	9,81	11,5	70,7
15	72	55	145	5042	47	9,39	11,0	71,0
8	72	61	140	5592	46	8,17	9,8	74,8
Média				3755	36			
Desvio Padrão				878	8,6			
Mínimo				2165	18			
Máximo				5592	49			
Número de amostras				20				
Estatística								
Gráfico						Q ₅₀ (KN)	26,76	
						I _s 50 (MPa)	10,7	
						R ²	0,70	



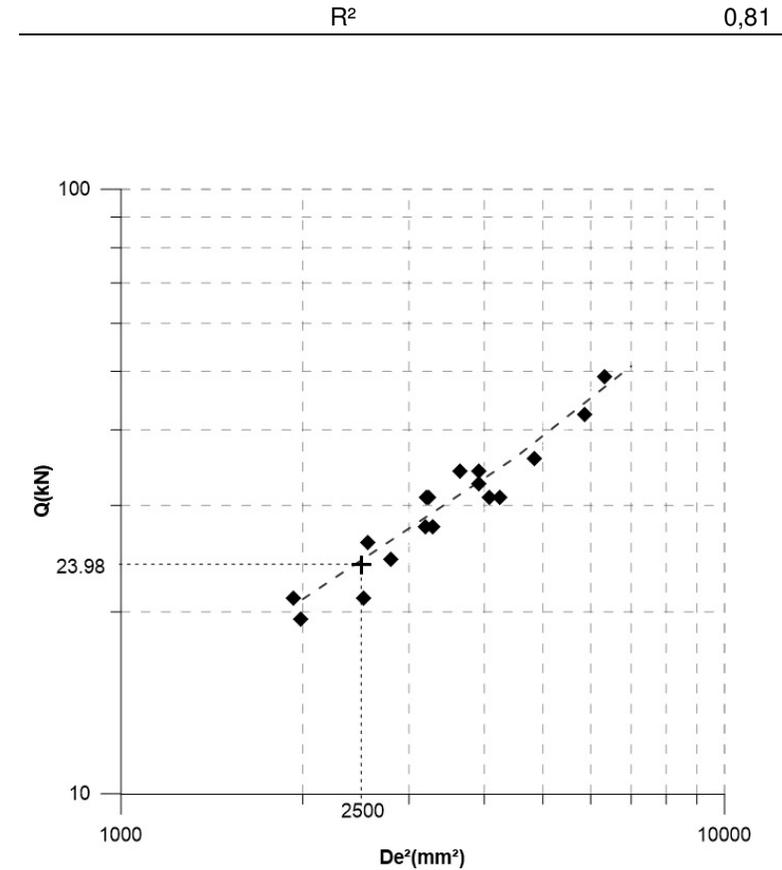
Ensaio de resistência à compressão puntiforme - Unidade Granito Itu

Nº Amostra	Dados			Resultados				
	D (mm)	W (mm)	P (kgf/cm ²)	D _e ² (mm ²)	Q (KN)	I _s (D _e) (MPa)	I _s 50 (MPa)	D _e (mm)
19	36	43	55	1971	18	9,04	8,6	44,4
6	34	48,3	40	2091	13	6,17	5,9	45,7
4	34,8	54,5	62	2415	20	8,33	8,3	49,1
1	43,2	44,1	50	2426	16	6,67	6,6	49,3
5	37	52,5	50	2473	16	6,54	6,5	49,7
7	39	51,2	55	2542	18	7,01	7,0	50,4
13	41,3	54	70	2840	23	8,01	8,2	53,3
8	46,2	50,3	65	2959	21	7,13	7,4	54,4
3	33,2	71,2	55	3010	18	5,92	6,2	54,9
9	37	64,5	75	3039	24	8,02	8,4	55,1
10	35	70	70	3120	23	7,29	7,7	55,9
12	42,8	57,3	70	3123	23	7,28	7,7	55,9
2	39	63	60	3128	19	6,22	6,5	55,9
17	46,2	53,5	60	3147	19	6,18	6,5	56,1
14	46	56,5	75	3309	24	7,37	7,8	57,5
18	51	51	70	3312	23	6,87	7,3	57,5
11	41	64,5	75	3367	24	7,24	7,7	58,0
16	50,5	53,8	80	3459	26	7,52	8,1	58,8
15	45	62	60	3552	19	5,48	5,9	59,6
20	53	72,3	75	4879	24	5,00	5,8	69,9
		Média		3008	20,6		7,2	
		Desvio Padrão		628	3,5			
Estatística		Mínimo		1971	13			
		Máximo		4879	26			
		Número de amostras		20				
Gráfico		Q ₅₀ (KN)				18,77		
		I _s 50 (MPa)				7,5		
		R ²				0,47		



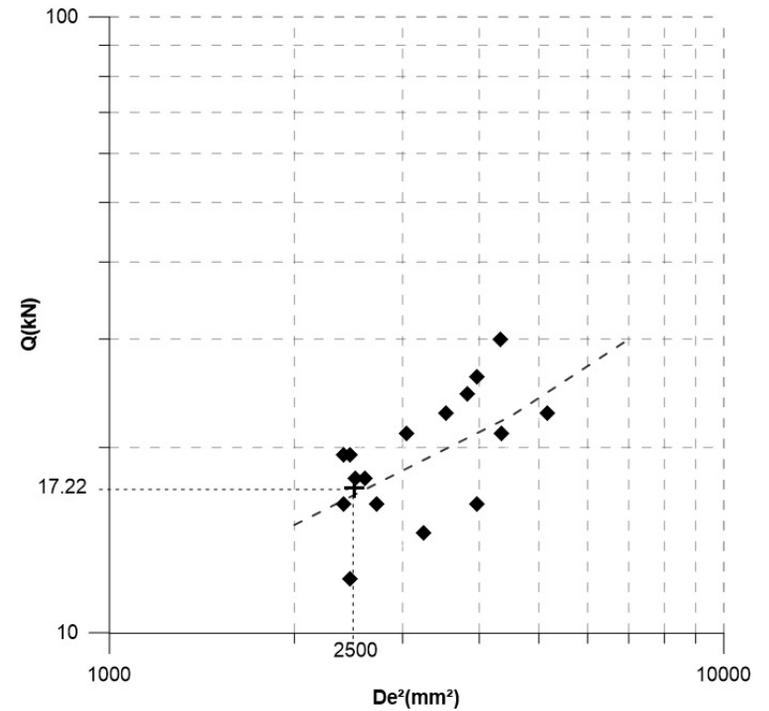
Ensaio de resistência à compressão puntiforme - Unidade Granito Terra Nova

Nº Amostra	Dados			Resultados				
	D (mm)	W (mm)	P (kgf/cm ²)	D _e ² (mm ²)	Q (kn)	I _s (D _e) (MPa)	I _s 50 (MPa)	D _e (mm)
23	49	31	65	1934	21	10,91	10,3	44,0
11	59	26	75	1953	24	12,48	11,8	44,2
21	60	26	60	1986	19	9,80	9,3	44,6
14	62	32	65	2526	21	8,35	8,4	50,3
15	53	38	80	2564	26	10,15	10,2	50,6
13	61	36	75	2796	24	8,72	8,9	52,9
6	72	31	65	2842	21	7,43	7,6	53,3
19	65	38	70	3145	23	7,23	7,6	56,1
18	57	44	85	3193	28	8,66	9,2	56,5
20	60	42	95	3209	31	9,64	10,2	56,6
12	54	47	95	3232	31	9,58	10,1	56,8
7	68	38	85	3290	28	8,41	8,9	57,4
9	63	45,4	105	3642	34	9,40	10,2	60,3
3	77	40	100	3922	33	8,31	9,2	62,6
5	67	46	105	3924	34	8,72	9,7	62,6
8	80	40	95	4074	31	7,59	8,5	63,8
16	64	50	130	4074	42	10,41	11,6	63,8
10	64	52	95	4237	31	7,30	8,2	65,1
4	69	55	110	4832	36	7,42	8,6	69,5
2	73	63	130	5856	42	7,24	8,8	76,5
1	79	63	150	6337	49	7,73	9,5	79,6
Estatística	Média			3503	30	9,3		
	Desvio Padrão			1168	7,9			
	Mínimo			1934	19			
	Máximo			6337	49			
Gráfico	Número de Amostras			21				
	Q ₅₀ (KN)					23,98		
I _s 50 (MPa)					9,6			



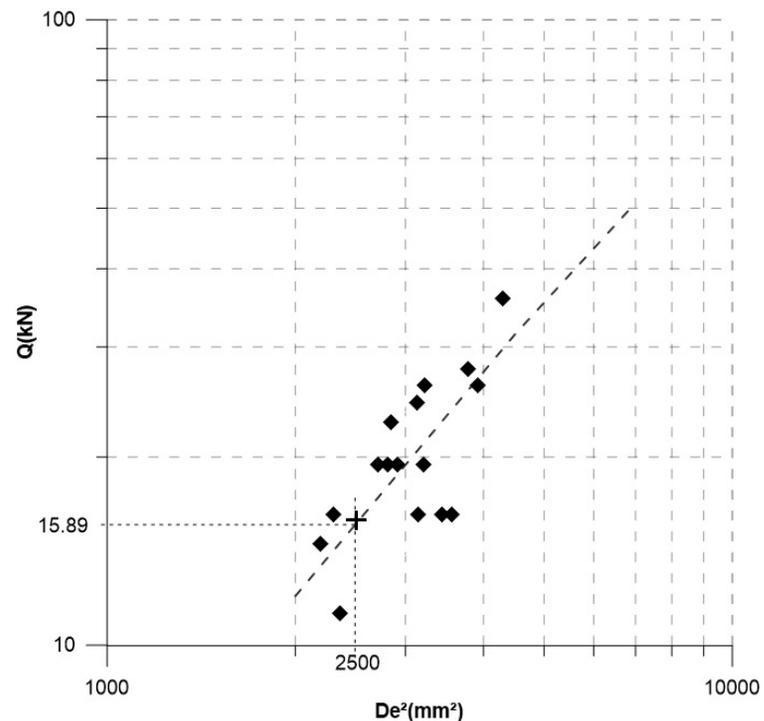
Ensaio de resistência à compressão puntiforme - Unidade Granito Tico Tico

Nº Amostra	Dados			Resultados				
	D (mm)	W (mm)	P (kgf/cm ²)	D _e ² (mm ²)	Q (KN)	I _s (D _e) (MPa)	I _s 50 (MPa)	D _e (mm)
9	34,1	55,4	50	2405	16	6,73	6,7	49,0
10	40,2	47	60	2406	19	8,09	8,0	49,0
8	36	53,8	38	2466	12	4,97	5,0	49,7
7	34	57	60	2468	19	7,89	7,9	49,7
6	38	52	55	2516	18	7,08	7,1	50,2
5	37,5	52,8	30	2521	10	3,82	3,8	50,2
3	32,7	62,5	55	2602	18	6,85	6,9	51,0
12	45	47,6	50	2727	16	5,93	6,1	52,2
11	41,3	53	68	2787	22	7,93	8,1	52,8
14	46	52	65	3046	21	6,93	7,2	55,2
1	45,2	53	40	3050	13	4,23	4,4	55,2
4	40,5	63	45	3249	15	4,48	4,7	57,0
19	44	63	70	3530	23	6,44	7,0	59,4
15	52,5	57,3	75	3830	24	6,37	7,0	61,9
17	50,5	59,8	100	3845	33	8,47	9,3	62,0
16	42,9	72,5	80	3960	26	6,57	7,3	62,9
20	49	63,5	50	3962	16	4,09	4,5	62,9
13	47,8	71	92	4321	30	6,93	7,8	65,7
2	51,5	66,2	65	4341	21	4,86	5,5	65,9
18	56,2	72	70	5152	23	4,41	5,2	71,8
Estatística	Média			3259	20	6,5		
	Desvio Padrão			809	5,8			
	Mínimo			2405	10			
	Máximo			5152	33			
	Número de Amostras			20				
Gráfico	Q ₅₀ (KN)					17,22		
	I _s 50 (MPa)					6,9		
	R ²					0,48		



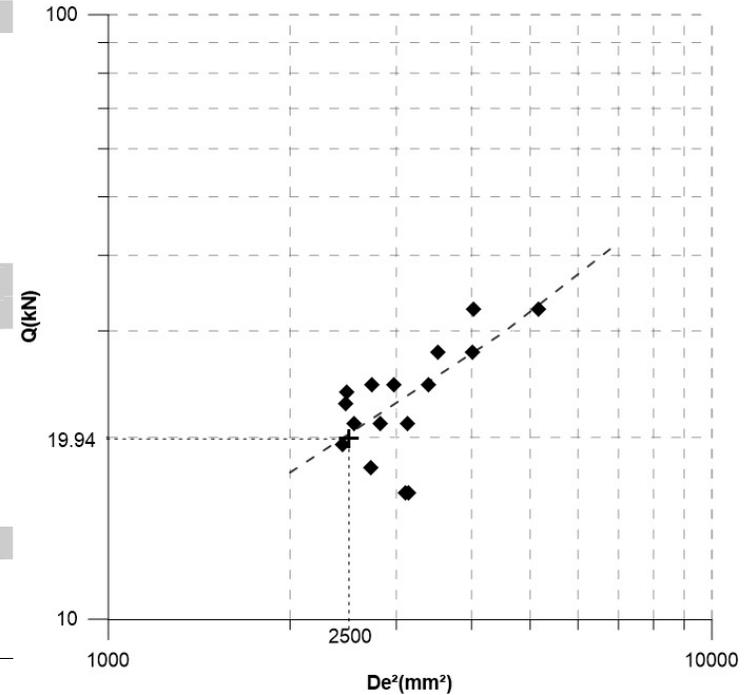
Ensaio de resistência à compressão puntiforme - Unidade Granito Taipas

Nº Amostra	Dados			Resultados				
	D (mm)	W (mm)	P (kgf/cm ²)	D _e ² (mm ²)	Q (kn)	I _s (D _e) (MPa)	I _s 50 (MPa)	D _e (mm)
7	35	49,3	45	2197	15	6,62	6,4	46,9
9	38,5	45,5	70	2230	23	10,20	9,9	47,2
5	40,2	45	50	2303	16	7,03	6,9	48,0
3	36,8	50	70	2343	23	9,71	9,6	48,4
2	35	52,8	35	2353	11	4,79	4,7	48,5
1	37,3	55,2	25	2622	8	3,05	3,1	51,2
4	37,1	57,5	60	2716	19	7,17	7,3	52,1
6	36,9	59,8	60	2810	19	6,93	7,1	53,0
11	43	52	70	2847	23	7,99	8,2	53,4
19	44,8	51	60	2909	19	6,69	6,9	53,9
15	45,2	54,5	75	3137	24	7,77	8,2	56,0
10	39,2	63	50	3144	16	5,15	5,4	56,1
8	38,2	66	60	3210	19	6,06	6,4	56,7
20	40,5	62,5	80	3223	26	8,07	8,5	56,8
14	41	64,1	40	3346	13	3,86	4,1	57,8
18	40,5	66,5	50	3429	16	4,72	5,1	58,6
16	41,5	67,3	50	3556	16	4,55	4,9	59,6
12	48	61,8	85	3777	28	7,32	8,0	61,5
17	45,2	68	80	3914	26	6,65	7,4	62,6
13	51,5	65,4	110	4289	36	8,36	9,4	65,5
Estatística	Média			3017	20	6,9		
	Desvio Padrão			594	6,4			
	Mínimo			2197	8			
	Máximo			4289	36			
	Número de Amostras			20				
Gráfico	Q ₅₀ (KN)					15,89		
	I _s 50 (MPa)					6,4		
	R ²					0,56		



Ensaio de resistência à compressão puntiforme - Unidade Granito Cantareira Oeste

Nº Amostra	Dados			Resultados				
	D (mm)	W (mm)	P (kgf/cm ²)	D _e ² (mm ²)	Q (kn)	I _s (D _e) (MPa)	I _s 50 (MPa)	D _e (mm)
11	27,5	58,6	65	2052	21	10,29	9,8	45,3
3	36,6	52,5	60	2447	19	7,96	7,9	49,5
9	35	55,6	70	2478	23	9,18	9,2	49,8
4	36,2	53,8	73	2480	24	9,57	9,6	49,8
13	37,5	53,5	65	2555	21	8,26	8,3	50,5
12	34,5	62	55	2724	18	6,54	6,7	52,2
6	33,8	63,5	75	2733	24	8,92	9,1	52,3
20	37,3	59,5	65	2826	21	7,47	7,7	53,2
2	40	55,8	25	2842	8	2,81	2,9	53,3
7	37	60,7	40	2860	13	4,51	4,7	53,5
5	42	55,6	75	2973	24	8,20	8,5	54,5
10	35,6	68,5	50	3105	16	5,21	5,5	55,7
17	42,5	57,8	65	3128	21	6,75	7,1	55,9
8	40,3	61,4	50	3151	16	5,14	5,4	56,1
14	45,2	59	75	3396	24	7,18	7,7	58,3
16	43,2	64	85	3520	28	7,86	8,5	59,3
19	49	61,3	105	3825	34	8,95	9,8	61,8
1	51	61,8	85	4013	28	6,89	7,7	63,3
15	50,5	62,7	100	4032	33	8,08	9,0	63,5
18	56,2	72	100	5152	33	6,32	7,4	71,8
Estatística	Média			3114	22	7,8		
	Desvio Padrão			718	6,6			
	Mínimo			2052	8			
	Máximo			5152	34			
	Número de Amostras			20				
Gráfico	Q ₅₀ (KN)					19,94		
	I _s 50 (MPa)					8,0		
	R ²					0,60		



Ensaio de resistência à compressão puntiforme - Unidade Granito Cantareira Leste

Nº Amostra	Dados			Resultados				
	D (mm)	W (mm)	P (kgf/cm ²)	D _e ² (mm ²)	Q (kn)	I _s (D _e) (MPa)	I _s 50 (MPa)	D _e (mm)
16	32	55	55	2241	18	7,95	7,8	47,3
8	40,2	46,4	70	2375	23	9,58	9,5	48,7
1	31,2	60	65	2384	21	8,85	8,8	48,8
2	30,4	67,6	45	2617	15	5,56	5,6	51,2
7	35,2	59	60	2644	19	7,36	7,5	51,4
5	40	54,2	60	2760	19	7,05	7,2	52,5
6	32,7	71	80	2956	26	8,80	9,1	54,4
3	36,2	65	65	2996	21	7,04	7,3	54,7
4	40	59	40	3005	13	4,29	4,5	54,8
13	42,5	59,3	55	3209	18	5,55	5,9	56,6
12	44,2	61	70	3433	23	6,63	7,1	58,6
9	46	59,5	75	3485	24	7,00	7,5	59,0
11	41,5	71	95	3752	31	8,25	9,0	61,3
10	53	61	55	4117	18	4,33	4,8	64,2
14	55	70,2	70	4916	23	4,63	5,4	70,1
15	58,5	70,2	155	5229	51	9,68	11,4	72,3
Estatística	Média			3257	23	7,4		
	Desvio Padrão			877	8,6			
	Mínimo			2241	13			
	Máximo			5229	51			
	Número de Amostras			16				
Gráfico	Q ₅₀ (KN)					19,74		
	I _s 50 (MPa)					7,9		
	R ²					0,48		

