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

JOÃO ANTONIO CURTIS NETO

**ESTUDOS TECNOLÓGICOS DE ROCHAS DA INTRUSÃO DE LIMEIRA,
VISANDO APLICAÇÃO COMO AGREGADOS EM OBRAS DE ENGENHARIA**

Versão corrigida

Original se encontra disponível na Unidade que aloja o Programa

SÃO CARLOS

2019

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

**ESTUDOS TECNOLÓGICOS DE ROCHAS DA INTRUSÃO DE LIMEIRA,
VISANDO APLICAÇÃO COMO AGREGADOS EM OBRAS DE ENGENHARIA**

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
2019**

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.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

Ce Curtis Neto, João Antonio
Estudos tecnológicos de rochas da Intrusão de
Limeira, visando aplicações como agregados em obras de
engenharia / João Antonio Curtis Neto; orientador
Rogério Pinto Ribeiro. São Carlos, .

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

1. agregados pétreos. 2. ensaios tecnológicos. 3.
variabilidade geológica. 4. mineração de agregados. 5.
concretos. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Geólogo **JOÃO ANTONIO CURTIS NETO.**

Título da dissertação: "Estudos tecnológicos de rochas da intrusão de limeira visando aplicação como agregados em obras de engenharia".

Data da defesa: 18/02/2019.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **Rogério Pinto Ribeiro**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EEESC)

Prof. Dra. **Ana Elisa Silva de Abreu**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Prof. Dr. **Ronaldo Lima Gomes**
(Universidade Estadual de Santa Cruz/UESC)

Resultado:

APROVADO

Aprovado

APROVADO

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:
Prof. Associada **Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues**

Presidente da Comissão de Pós Graduação:
Prof. Titular **Luis Fernando Costa Alberto**

AGRADECIMENTOS

A Deus e todas as forças que me trazem luz e me acompanham em todas as jornadas de estudo e pesquisa, dia a dia incansavelmente.

Aos meus pais por todo amor, apoio, dedicação, e compreensão de que um futuro melhor passa por escolhas, decisões de estudo, esforço, equilíbrio e fé. E aos meus familiares que sempre torceram por mim.

Ao professor, amigo e meu orientador Rogério Ribeiro, por todo esforço com este trabalho, para que esta realização de mestrado se torne bons frutos de pesquisa e profissional. Obrigado pela disposição, paciência, apoio e companheirismo.

Ao professor Paraguassú agradeço por toda a colaboração nas pesquisas, e pelas conversas engrandecedoras sobre Geologia de Engenharia e Tecnologia de Rochas. Ao professor Lázaro Zuquette pela recepção na Pós-Graduação, discussões sobre Geotecnia e conselhos profissionais e acadêmicos. Aos demais docentes do Departamento de Geotecnia agradeço por todo conhecimento passado, e dedicação pelo Programa de Pós-Graduação durante todas estas décadas. Aos profissionais técnicos de laboratório pelos auxílios e ensinamentos práticos, e a todo serviço prestado pelos técnicos administrativos.

Aos amigos da Pós-Graduação da EESC pela amizade e parceria. Em especial ao Geol. Thiago pelo auxílio em campo, Geol. Rony por todo empenho em me ajudar nas etapas laboratoriais, Geol. Rogério pelas conversas sobre Geologia pura e de aplicação. Aos amigos geólogos (João Monticeli e Lucas Lino) do IGc-USP também agradeço pelo apoio nas análises petrográficas relacionando sempre ao importante contexto genético das rochas.

Ao professor Gustavo Xavier (UENF) pela receptividade em Campos dos Goytacazes – RJ, e claro também pela colaboração para pesquisa. Ao amigo Ivan pelo apoio nos ensaios de RAA, agradeço pelo auxílio e conhecimento passado sobre concretos e agregados.

Agradeço também a CAPES pela bolsa concedida durante o período de mestrado.

*Minerals may be of no less importance to the national
economy for being of relatively low value per ton.
It is indeed often the low-value minerals,
that need to be most carefully considered
As much attention requires to be given
to supplies of such substances as sand, gravel or stone...
as to the more expensive or less common types of mineral.*
Autor desconhecido

RESUMO

CURTIS NETO, J. A.. **Estudos Tecnológicos de rochas da Intrusão de Limeira, visando aplicações como agregados em obras de engenharia.** 2019. 166p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

As fases de exploração em pedreiras de agregados rochosos envolvem principalmente etapas de fragmentação de rochas por desmontes e britagens. Levando em consideração a natureza destes produtos, bem como as aplicações em obras de engenharia, caracterizações tecnológicas são ferramentas fundamentais para uma seleção adequada de rochas. Estes materiais são extraídos de maciços que apresentam particularidades quanto a composição mineralógica, variações estruturais. O presente trabalho tem como objetivo a caracterização de rochas da Intrusão de Limeira, SP (Formação Serra Geral, Cretáceo), que recentes estudos mostraram que os processos geológicos são responsáveis pela ocorrência de litotipos diferenciados no referido maciço. Nas frentes de desmontes da pedreira em estudo foram coletadas amostras de: basalto, diabásio de textura fina e dois monzodioritos sendo um de granulação fina a média e outro fina a grossa. A preparação de amostras para ensaio foi realizada por procedimentos laboratoriais. Foram escolhidos e executados ensaios tecnológicos rotineiros de qualificação dos materiais, para uso em concretos de cimento portland e pavimentos asfálticos, maiores demandas comerciais de brita produzida pela indústria mineral local. Nos ensaios mecânicos foi observada a excelente resistência, não apresentando limitações para estas modalidades de uso. Entretanto nos ensaios de reações com ligantes (adesividade e RAA) há certas observações. No primeiro caso todas as rochas apresentaram resultados insatisfatórios, embora o basalto tenha apresentado muito menos descolamentos ao ligante asfáltico. Já os ensaios de RAA comprovaram que somente um monzodiorito não é reativo, e os outros litotipos tem grau de reatividade R1. Estes resultados estão relacionados à variação de características petrográficas. Portanto a importância dos estudos tecnológicos associados ao contexto geológico em pedreiras é decisiva. Também é válido ressaltar a necessidade de reprodução de levantamentos geológicos em escalas adequadas para cada situação.

Palavras-chave: agregados pétreos, ensaios tecnológicos, variabilidade geológica, mineração de agregados, concretos.

ABSTRACT

CURTIS NETO, J. A.. **Technological studies of rocks from Limeira Intrusion, aiming at application as aggregates in engineering works.** 2019. 166p. Dissertation (Master of Science in Geotechnical Engineering). São Carlos School Of Engineering. University of São Paulo, São Carlos.

The initial phases of mineral exploitation in the quarries aggregates involve the steps of blasting the massif, transporting the blocks for crushing and particle size sorting. These products are applied in several engineering works, being necessary their technological characterizations. As they are natural materials, they present several peculiarities regarding the mineralogical composition, structural and textural variations commonly observed in the geological massifs. The present study aimed to characterize rocks from the Limeira Intrusion, State of São Paulo (Serra Geral Formation, Cretaceous). Recent studies have shown that the processes of fractional crystallization and hydrothermalism are responsible for the occurrence of different lithotypes. At the quarry fronts studied, samples of basalt, fine-textured diabase and two monzodiorites were collected, one of fine to medium crystal size and one to fine to coarse. The preparation of test samples was performed by laboratory procedures: crushing and sieving. Routine technological tests of material qualification were chosen and executed, for use in concretes with Portland cement and asphalt pavements, greater commercial demands of crushed rocks produced by the local mineral industry. In the tests of strength the excellent mechanical quality of these rocks was observed, presenting no limitations for these modalities of use. However, binder reaction tests (adhesion and AAR) showed some comments. In the first case, only all the rocks had unsatisfactory results. In turn, the AAR tests showed that only fine-grained monzodiorite is not potentially reactive, and the other lithotypes have a level of reactivity R1. These results are related to the variation of petrographic characteristics. Therefore, the importance of the technological studies associated with the geological context in quarries is fundamental, so that the resulting parameters are tools to control the quality of the final products. It is also worth highlighting the need to reproduce geological surveys at scales appropriate to each situation.

Keywords: stone aggregates, technological tests, geological variability, aggregate mining.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Limites da composição granulométrica do agregado gráudo (ABNT 7211, 2009).....	43
Tabela 2-2: Tabela com as frações e quantidade de amostras do ensaio abrasão Los Angeles (NM 51, 2000).....	49
Tabela 2-3: Informações sobre a carga abrasiva e número de rotações para cada fração (NM 51, 2000)	49
Tabela 2-4: Limites aceitáveis de perda no ensaio de Micro-Deval pelas normas americanas.	52
Tabela 2-5: Frações granulométricas para ensaio de desgaste a Micro-Deval para agregados graúdos.....	52
Tabela 2-6: Limites aceitáveis para minerais reativos (ABNT NBR 15577, 2018)	57
Tabela 2-7: Classificação do grau de reatividade do agregado adaptado da NBR 15577-1 (ABNT, 2018).....	57
Tabela 2-8: Grau de risco de ocorrência de RAA adaptado da NBR 15577-1 (ABNT, 2018).....	58
Tabela 3-1: Roteiro dos ensaios geomecânicos e normas técnicas correspondentes	74
Tabela 3-2: Procedimentos dos ensaios de abrasão Los Angeles e especificações do equipamento utilizado	77
Tabela 3-3 Procedimentos dos ensaios de Micro-Deval, D6928 (ASTM, 2017).....	78
Tabela 3-4: Material passante na peneira 9,5 mm para ser ensaiado conforme norma DNER-ME 089/94 (DNER, 1994).....	84
Tabela 3-5: Material retido na peneira 4,8 mm para ensaiado conforme a norma DNER-ME 089/94 (DNER, 1994).....	84
Tabela 4-1: Sumário das características petrográficas das rochas estudadas.....	Erro!
Indicador não definido.	
Tabela 4-2: Massas e resultados de índices físicos do basalto (BAS).	101
Tabela 4-3: Massas e resultados de índices físicos do diabásio (DIA).....	101
Tabela 4-4: Massas e resultados de índices físicos do monzodiorito de granulação média (MON _M).....	102
Tabela 4-5: Massas e resultados de índices físicos do monzodiorito de granulação média (MON _{MG}).....	102

Tabela 4-6: Resultados do ensaio de RCU para o basalto (BAS).	104
Tabela 4-7: Resultados do RCU para o diabásio (DIA).	104
Tabela 4-8: Resultados do ensaio de RCU para o monzodiorito de granulação fina a média (MON _M)	104
Tabela 4-9: Resultados do ensaio de RCU para o monzodiorito de granulação fina a grossa (MON _{MG})	105
Tabela 4-10: Resultados da determinação das constantes elásticas para o basalto (BAS).	105
Tabela 4-11: Resultados da determinação das constantes elásticas para o diabásio (DIA).	105
Tabela 4-12: Resultados da determinação das constantes elásticas para o monzodiorito de granulação fina a média (MON _M).	106
Tabela 4-13: Resultados da determinação das constantes elásticas para o monzodiorito de granulação fina a média (MON _{MG}).	106
Tabela 4-14. Resultados dos ensaios de compressão diametral do basalto (BAS)...	107
Tabela 4-15. Resultados dos ensaios de compressão diametral do diabásio (DIA) .	107
Tabela 4-16. Resultados dos ensaios de compressão diametral do monzodiorito (MON _M)	107
Tabela 4-17. Resultados dos ensaios de compressão diametral do monzodiorito (MON _{MG})	108
Tabela 4-18: Resultados dos ensaios de Abrasão Los Angeles.	108
Tabela 4-19: Resultados dos ensaios de Micro Deval na graduação A e B.	109
Tabela 4-20. Resultados dos ensaios de resistência ao esmagamento.	110
Tabela 4-21. Resultados dos ensaios de Impacto Treton.	111
Tabela 4-22: Síntese de resultados dos ensaios físico-mecânicos para os litotipos de estudo.	112
Tabela 4-23. Resultados do ensaio de Sanidade no Sulfato para o BAS	113
Tabela 4-24. Resultados do ensaio de Sanidade no Sulfato para o diabásio DIA....	113
Tabela 4-25. Resultados do ensaio de Sanidade no Sulfato para o MD _M	113
Tabela 4-26. Resultados do ensaio de Sanidade no Sulfato para o MD _{MG}	114
Tabela 4-27: Sumário de normas e limites exigidos para aplicações de estudo.	121
Tabela 4-28: Sumário dos resultados dos ensaios tecnológicos desenvolvidos no presente estudo.	122

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1: Localização da pedreira estudada (polígono tracejado em amarelo) no Município de Limeira, SP. Fonte: Imagem Google Earth 2018 e IBGE.....	20
Figura 2-1: Perfil típico de um derrame de basalto (OLIVEIRA, 1981). (1) Material de intertrapeamento geralmente associado a brechas, com contato “c” com o derrame superior. (2) Zona do topo, basalto vesicular com fraturamento horizontal predominante ou irregular. (3) Zona do núcleo – basalto compacto com fraturamento vertical (diaclasamento colunar), ocorrem juntas de grande extensão lateral tipo “j”. (4) Zona da base, podendo ser vesicular com fraturamento horizontal predominante, acima do contato “c” com o derrame inferior.	23
Figura 2-2: Variedade litológica no Sill da Pedreira Basalto, próximo a Campinas. As faixas de	25
Figura 2-3: Mapa geológico local da Intrusão de Limeira. Fonte: Mapa geológico do Estado de São Paulo, escala original 1:100000 (CPRM, 2006)	26
Figura 2-4: Perfil esquemático da Pedreira Basalto 04 (FARIA, 2008).	27
Figura 2-5: Perfil geológico da Intrusão de Limeira (LINO, 2015).	28
Figura 2-6: Mapa com a delimitação dos corpos em subsuperfície modificado de Seixas et al. (2016)	29
Figura 2-7: Foto cava da Prospect Quarry. Material esbranquiçado diabásio e abaixo basalto com concentração de olivinas (MC NALLY, 1998).....	34
Figura 2-8: (A) Prensa servo-controlada utilizada em ensaios de rocha intacta, corpo prova (seta branca). (B) Corpo de prova instrumentado para determinação de módulos. (C e D) Sensores de determinação das deformações. Modificado de Paraguassú et al (2014).	45
Figura 2-9 Correlações adaptadas de Karahman & Fenner (2007). (A) Resultados para todos os litotipos de estudo. (B) Resultados para rochas com porosidade entre 1 a 5 %; (C) resultados obtidos para rochas com porosidade compreendida entre 0,18 a 0,38 % (D) resultados para rochas com alta porosidade (> 5 %).	46
Figura -2-10: Equipamento de desgaste Micro-Deval da UENF. Modificado de Da Costa (2016).	51

Figura 2-11: A) Correlação entre LA e MD para os andesitos de diversas pedreiras (em azul) e de alta qualidade (Komló) (em vermelho). B) Correlação entre os ensaios de LA e MD para o basalto de Uzsa. Modificado de Török (2015)	51
Figura 2-12: A) Especificações do dispositivo. B) Representação do carregamento realizado para determinação da resistência dos agregados. Modificado de Frazão e Paraguassú (1998).	53
Figura 2-13: Aparelho Treton (DNER, 1999).	54
Figura 2-14: Correlação entre ensaios de abrasão a Los Angeles e resistência treton para agregados graúdos de Ontário. Modificado de Senior & Rogers (1991)	55
Figura 2-15: Fotomicrografia (SEM-EDS) expansão e fissuras amostra MV6 (KORKANÇ & TUGRUL, 2005)	59
Figura 2-16: Interação entre os sistemas terra. Modificado de Carrol (1970).	61
Figura 2-17: Série de bowen em relação a estabilidade mineral Goldich (1938). Adaptado de Carrol (1970).	63
Figura 2-18. Perfil proposto para exploração de maciços rochoso com base nas alterações intempéricas , adaptado de Mc Nally (1998)	64
Figura 3-1: Fluxograma de estudos desenvolvidos na pesquisa, desde atividades de revisão bibliográfica, e de campo, ensaios laboratoriais e avaliação integrada das informações geradas	68
Figura 3-2: (A) Bancada expondo basalto maciço próximo a contato com arenitos/siltitos Itararé. Coleta de blocos e fragmentos irregulares no Ponto A ; (B) Detalhe de bloco rochoso amostrado para extração de CPs cilíndricos para determinação de RCU, BT e constantes elásticas; (C e D) Acondicionamento de fragmentos irregulares amostrados em campo para posterior britagem em laboratório	67
Figura 3-3: Mapa de localização dos pontos de reconhecimento geológico e amostragem na pedreira estudada destacada no mapa em amarelo.	69
Figura 3-4: Aspecto dos fragmentos e blocos irregulares do monzodiorito; inspeção do material destinado à britagem em laboratório	70
Figura 3-5: (A) Vista geral do mini britador utilizado na pesquisa; (B) Detalhe das mandíbulas; abertura ajustada para produzir britas com diâmetro máximo de 25 mm; (C) equipamento em funcionamento e (D) Material britado armazenado previamente em caixas plásticas.	71

Figura 3-6 (A) Vista geral de agitador mecânico para peneiramento e separação de diferentes faixas granulométricas de agregado gráúdo do monzodiorito MON _{MG} ; (B) Amostras de agregado já classificadas entre as faixas 19,1mm até o passante na peneira 4,75mm e (C) Balança utilizada na para pesagem de cada fração granulométrica de agregados gráúdo “britados” em laboratório.....	71
Figura 3-7: (A) Amostra de agregado gráúdo; (B) Homogeneização das amostras antes de seu quarteamento; (C) Alíquotas obtidas para ensaios de resistência a Abrasão Los Angeles e desgaste Micro Deval (brita 1 e pedrisco).	72
Figura 3-8: A) Obtenção das amostras cilíndricas utilizando-se perfuratriz com broca diamantada; (B) Retificação de topo e base dos CPs; (C) Corpo de prova instrumentado para determinação das constantes elásticas em prensa servo-controlada.....	75
Figura 3-9: (A) Corpos de prova e aparato de ensaio; (B) Disposição do conjunto antes de ser posicionado na prensa para determinação da resistência à compressão diametral.	76
Figura 3-10: (A) Equipamento de Abrasão Los Angeles do Laboratório de Estradas do Departamento de Engenharia de Transportes (EESC-USP); (B) Pesagem de alíquota para ensaio; (C) Bandeja com amostra e esferas depois de realizado o ensaio.....	76
Figura 3-11: (A) Tambor e conjunto de esferas metálicas utilizadas no ensaio Micro-Deval; (B) Vista parcial do equipamento de ensaio disponível no Lab. de Engenharia Civil da UENF (Campos, RJ): detalhe mostrando tambor metálico (esquerda) acoplado ao motor de funcionamento (direita).....	77
Figura 3-12(A) Vista parcial mostrando o aspecto de uma amostra (Graduação A) submetida ao ensaio Micro-Deval; observar a utilização de imã para retirada das esferas metálicas; (B) Detalhe de uma bandeja mostrando a amostra ensaiada depois de lavada em água corrente.	79
Figura 3-13: (A) Cilindro de aço com amostra sendo submetido à compressão em prensa servo-controlada; (B) Aspecto da amostra após o ensaio de esmagamento; (C) Determinação da massa final de ensaio por meio de peneiramento em uma malha de abertura 2,4mm (em cima - retido e embaixo - passante).....	79

Figura 3-14: (A) Equipamento Treton do Laboratório de Geologia de Engenharia do Departamento de Geotecnia da EESC-USP; (B) CPs previamente preparados para realização do ensaio; (C) CPs posteriores ao impacto do soquete (10 vezes).....	80
Figura 3-15: (A) Argamassadeira em utilização; (B) argamassa em preparação. (C) gabarito de barras de argamassas; (D) moldagem das barras de argamassa. Procedimentos realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UEMG (Passos, MG).	82
Figura 3-16: (A) Barras de argamassas produzidas (25mm x 25mm x 285mm); (B) Barras colocadas em recipiente de aço inox e solução com NaOH; (C) Estufa ventilada para manter as amostras a temperatura de 80° C durante o período de medições; (D) Aparato de medição utilizado para verificação da expansibilidade, com sensibilidade de 0,001mm (norma NBR 15577-4; ABNT, 2008). Laboratório de Materiais de Construção Civil da UEMG (Passos, MG).	82
Figura 3-17: (A) Disposição do CAP sobre os agregados; (B) Mistura entre os agregados e CAP; (C) Bécker contendo agregados devidamente envoltos pelo ligante asfáltico.	83
Figura 4-1. Mapa de Localização dentro da cava da pedreira visitada, contendo dos pontos de interesse. Imagem Google Earth 2018.	86
Figura 4-2: (A) Contato sub-horizontal entre as rochas da encaixante e as da intrusão, observado no ponto "E", apresenta de lente de arenito "cozido" em destaque na foto tracejado em cor preta. (B) Paredão escavado ao lado da estrada de acesso, onde há a maior porção de arenitos em contato irregular com os basaltos da intrusão, detalhe para o tracejado na fotografia em cor preta.....	87
Figura 4-3: (A): Fotografia de campo: Falhamento no contato entre o corpo intrusivo e as rochas do Sub-Grupo Itararé. (B): Fotografia de campo: Detalhe para o basalto cisalhado em contato com o arenito.	88
Figura 4-4: (A) Aspecto da superfície de uma fratura com carbonatos em fragmento de basalto (BAS); (B) Efervescência da superfície (carbonatos e ácido clorídrico).	88
Figura 4-5. (A) Vista parcial da base da bancada do ponto "D". (B) Aspecto macroscópico do material pétreo aflorante, diabásio exposto.	89

Figura 4-6. Vista panorâmica da porção sul da cava, a partir do ponto de amostragem do diabásio (DIA).	89
Figura 4-7: (A) Talude da bancada no ponto "B". (B) Detalhe do monzodiorito (MON _{MG}) amostrado com veios de riolito, ponto "B"	90
Figura 4-8: (A) Talude da bancada no ponto A. (B) Detalhe do monzodiorito (MON _M) no ponto C, material amostrado para estudos.	90
Figura 4-9: Perfil da intrusão de Limeira adaptado de (Martins, 2015). À leste a pedreira, cava onde foi realizada a amostragem e estudos tecnológicos, destacada com a seta em amarelo.	91
Figura 4-10: (A) Corpo de prova para ensaio de compressão diametral (diâmetro 56 mm). (B) Superfície após ao ensaio em detalhe.	92
Figura 4-11: Fotomicrografias do BAS com nicos em paralelo (A) e cruzado (B): apresentando os processos hidrotermais e devitrificação. Legenda: Cpx- clinopiroxênio, Op- opaco, Chl/Smc – clorita/ esmectita, Gls- vidro vulcânico, Srt- Sericita.	93
Figura 4-12: Fotomicrografias do BAS com nicos em paralelo (A) e cruzado (B): exibindo em detalhe as fissuras, processos de alteração e matriz. Legenda: Cpx- clinopiroxênio, Op- opaco, Chl/Smc – clorita/ esmectita, Qz- quartzo.	93
Figura 4-13: (A) Corpo de prova para ensaio de compressão diametral (diâmetro 56 mm). (B) Superfície após ao ensaio em detalhe.	94
Figura 4-14: Fotomicrografias do diabásio em nicos cruzados: (A) das bordas de corrosão e aglomerados de clorita/esmectita; (B) Matriz mineralógica do diabásio afetada por processos hidrotermais. Legenda: Cpx- clinopiroxênio, Op- Opaco, Chl/Smc – clorita/esmectitca.....	95
Figura 4-15: (A) Corpo de prova de ensaio de compressão diametral (56 mm de diâmetro), do monzodiorito do ponto "C" (granulação fina a média). (B) Detalhe macroscópico MON _M . (C) Corpo de prova de ensaio de compressão diametral (56 mm de diâmetro), do monzodiorito do ponto "B" (granulação fina a grossa). (D) Detalhe macroscópico do MON _{MG}	96
Figura 4-16: Fotomicrografias com nicos cruzados: (A) textura intergranular com fissuras trans e intraminerais (MON _{MG}); (B) textura de fluxo magmático nos plagiocásios e processos de alteração, bem como, agregados de clorita	

e esmectita (MON_M). Legenda: Cpx- clinopiroxênio, Op- Opaco, Chl/Smc – clorita/esmectitca. 96

Figura 4-17 Corpos de prova descartados de ensaio de tração indireta (MON_{MG}), com diâmetro de 56 mm e altura de 30 mm). (A) Veio milimétrico aplítico interceptando o CP ao meio; (B) Face de CP composta por riolito..... 97

Figura 4-18: Fotomicrografia com nicos em paralelo: (A) apresentando o aspecto do veio de composição quartzo-feldspática muito fina. B) Exibindo aglomerados de clorita/esmectica e processos de alteração no contato entre o MON_{MG} e veio de riolito. Legenda: Ab- albita, Cpx- clinopiroxênio, Op- Opaco, Chl/Smc – clorita/esmectitca, Qz- quartzo, Hbl - hornblenda. 97

Figura 4-19: Diagrama de número de Mg versus sílica para os principais litotipos da intrusão de Limeira. 99

Figura 4-20: (A) Aspecto superficial rugoso nos agregados de basalto anteriores ao ensaio de Micro-Deval (graduação A); (B) Aspecto superficial liso nos agregados (BAS) após sofrerem desgaste pelo ensaio de Micro-Deval (graduação A)..... 110

Figura 4-21 (A) Amostra do monzodiorito de granulação fina a grossa (MON_{MG}), na graduação C (passante na peneira com abertura de 19,00 mm e retido na de 9,5 mm) do ensaio após peneiramento. (B) Material perdido na peneira de abertura 9.5 mm, perda de 1,63%. 114

Figura 4-22: Gráfico com os resultados dos ensaios de RAA, método acelerado de barras de argamassa NBR 15577-4 (ABNT, 2018). 117

Figura 4-23. Fotografias dos materiais nos ensaios de adesividade, mostrando partículas com descolamento: (A) diabásio, (B) monzodiorito médio e (C) monzodiorito grosso. 118

Figura 4-24. Descolamentos do CAP no basalto (BAS), em detalhe amarelo tracejado. 118

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALA	Abrasão Los Angeles
ASTM	American Society for Testing and Materials
BT	Brazilian Test
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CCT	Centro de Ciência e Tecnologia UENF
CP	Corpo(s) de Prova e Cimento Portland
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
DNPM	Departamento Nacional de Pesquisas Minerais
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DRX	Difração de Raios-X
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EN	European Standards
FRX	Espectrometria de fluorescência de raios X
GTR	Grupo Tecnologia de Rochas EESC/USP
IQ/SC	Instituto de Química de São Carlos
ISO	Organização Internacional para Padronização
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISRM	International Society for Rock Mechanics
LECIV	Laboratório de Engenharia Civil UENF
LGA	Laboratório de Química Ambiental
MDE	Micro-Deval
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
RAA	Reação Álcali-Agregado
RCU	Resistência à Compressão Uniaxial
UHE	Usina Hidrelétrica
UEMG	Universidade Estadual de Minas Gerais
UENF	Universidade Estadual Norte Fluminense
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Grau Celsius
aa	Absorção D'água
ALA _B (%)	Abrasão Los Angeles graduação B
ALA _C (%)	Abrasão Los Angeles graduação C
BAS	Basalto
CP	Corpo (s) de Prova
Cbt	Carbonato
Chl +Scmc	Clorita/Esmectita
Cpx	Clinopiroxênio
E	Módulo de elasticidade estático
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy
DIA	Diabásio
G	unidade de medida - grama (s)
Gls	Vidro Vulcânico
GPa	Unidade de medida Giga Pascal
Kg	Unidade de medida Quilograma
kN	Unidade de medida Quilo Newton
Mi _{MDE} (g)	Massa Inicial ensaio Micro-Deval
Mf _{MDE} (g)	Massa de material retida na peneira 1,7mm
MDE _A (%)	Coeficiente MicroDeval na graduação A
MDE _B (%)	Coeficiente MicroDeval na graduação B
M _F (g)	Massa final do ensaio Abrasão Los Angeles
M _i (g)	Massa Inicial ensaio Abrasão Los Angeles
M _f (g)	Massa final do ensaio de resistência ao esmagamento
M _i (g)	Massa inicial do ensaio de resistência ao esmagamento
M _{ti} (g)	Massa inicial do ensaio de impacto treton
M _{tf} (g)	Massa final do ensaio de impacto treton
mm	unidade de medida - milímetro (s)
MPa	Unidade de medida Mega Pascal
MON _M	Monzodiorito de granulação fina a média
MON _{MG}	Monzodiorito de granulação fina a grossa
m _{sat} (g)	Massa saturada
m _{sec} (g)	Massa seca
m _{sub} (g)	Massa submersa
N	Unidade de medida Newton
Op	Minerais opacos
P (%)	Perda de Massa Pelo Ensaio de Abrasão Los Angeles
Pl	plagioclásio
PM	Perda de Massa Ciclagem Agua Estufa
PNAT (%)	Valores de abrasão Los Angeles das amostras Naturais
Qz	quartzo
R (%)	Resistência ao Esmagamento para uma alíquota

R_m (%)	Resistência ao Esmagamento
RCU (MPa)	Resistência a compressão Uniaxial
R0	Grau de reatividade 0
R1	Grau de reatividade 1
R_m (%)	Média da Resistência ao Esmagamento
T_m (%)	Resistência ao ensaio de impacto treton
ν	Coeficiente de Poisson
η_a	Porosidade Aparente
ρ_a	Massa Específica Aparente
σ_c	Resistência a compressão uniaxial
σ_T	Resistência a tração indireta
#Mg	Número de Mg

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	VIII
RESUMO.....	X
ABSTRACT.....	XII
LISTA DE TABELAS	3
LISTA DE SIGLAS	9
LISTA DE SÍMBOLOS	11
1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1. JUSTIFICATIVAS.....	19
1.2. OBJETIVOS.....	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL E LOCAL DA INTRUSÃO DE LIMEIRA.....	22
2.1.2. FORMAÇÃO SERRA GERAL: ASPECTOS GEOLÓGICOS.....	22
2.1.3. GEOLOGIA LOCAL DA INTRUSÃO DE LIMEIRA.....	25
2.2. AGREGADOS ROCHOSOS: PRODUÇÃO E APLICAÇÃO.....	29
2.2.1. MINERAÇÃO DE AGREGADOS ROCHOSOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	29
2.2.2. VARIAÇÕES GEOLÓGICAS NOS MACIÇOS E SUA RELEVÂNCIA NA MINERAÇÃO DE AGREGADOS.....	32
2.2.3. AGREGADOS ROCHOSOS EM APLICAÇÕES COM LIGANTES.....	35
2.2.3.1. CONCRETO ASFÁLTICO.....	37
2.2.3.2. CONCRETO HIDRÁULICO.....	37
2.3. CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS ROCHOSOS PARA LIGANTES.....	39
2.3.1. PETROGRAFIA.....	40
2.3.2. GRANULOMETRIA E FORMA DAS PARTÍCULAS.....	41
2.3.3. ÍNDICES FÍSICOS.....	43
2.3.4. PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	44
2.3.4.1. RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO UNIAxIAL, DETERMINAÇÃO DE MÓDULO DE DEFORMABILIDADE E COEFICIENTE DE POISSON	44
2.3.4.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	47
2.3.4.3. RESISTÊNCIA A ABRASÃO LOS ANGELES.....	47
2.3.4.4. DESGASTE MICRO-DEVAL.....	49

2.3.4.5.	RESISTÊNCIA AO ESMAGAMENTO DE AGREGADOS.....	52
2.3.4.6.	RESISTÊNCIA AO IMPACTO TRETON.....	54
2.3.5.	REAÇÕES NA PRESENÇA DE LIGANTES.....	55
2.3.5.1.	REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO.....	56
2.3.5.2.	ADESIVIDADE AO LIGANTE ASFÁLTICO.....	59
2.3.6.	ALTERAÇÃO E ALTERABILIDADE.....	61
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	65
3.1.	COMPILAÇÃO DE DADOS E INFORMAÇÕES GEOLÓGICAS.....	65
3.2.	ATIVIDADES DE CAMPO E AMOSTRAGEM.....	66
3.3.	PREPARAÇÃO DA BRITA LABORATORIAL.....	70
3.4.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA.....	72
3.4.1.	ANÁLISE PETROGRÁFICA.....	73
3.4.2.	ÍNDICES FÍSICOS.....	73
3.4.3.	ENSAIOS MECÂNICOS.....	73
3.4.3.1.	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAxIAL.....	74
3.4.3.2.	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	75
3.4.3.3.	RESISTÊNCIA A ABRASÃO LOS ANGELES.....	76
3.4.3.4.	DESGASTE MICRO-DEVAL.....	77
3.4.3.5.	RESISTÊNCIA AO ESMAGAMENTO.....	79
3.4.3.6.	RESISTÊNCIA AO IMPACTO TRETON.....	80
3.4.4.	ENSAIOS NA PRESENÇA DE LIGANTES.....	81
3.4.4.1.	REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO.....	81
3.4.4.2.	ADESIVIDADE DE AGREGADO GRAÚDO.....	83
3.4.5.	ENSAIO DE ALTERAÇÃO LABORATORIAL: SANIDADE A SOLUÇÃO DE SULFATO.....	83
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	85
4.1.	RECONHECIMENTO GEOLÓGICO.....	85
4.2.	PETROGRAFIA MACROSCÓPICA E MICROSCÓPICA.....	91
4.2.1.	BASALTO.....	91
4.2.2.	DIABÁSIO.....	93
4.2.3	MONZODIORITO.....	94

4.2.4. SÍNTESE DAS ANÁLISES PETROGRÁFICAS NO CONTEXTO DA DIFERENCIAÇÃO MAGMÁTICA.....	97
4.2. ÍNDICES FÍSICOS.....	101
4.3. ENSAIOS MECÂNICOS.....	103
4.3.1. RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES E DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES ELÁSTICAS.....	103
4.3.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	106
4.3.3. ABRASÃO LOS ANGELES.....	108
4.3.4. RESISTÊNCIA DO AGREGADO GRÁUDO POR ABRASÃO AO MICRO-DEVAL.....	108
4.3.5. RESISTÊNCIA AO ESMAGAMENTO.....	110
4.3.6. RESISTÊNCIA AO IMPACTO TRETON.....	110
4.3.7. SÍNTESE DAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS.....	111
4.4. ALTERAÇÃO ACELERADA: AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE PELO EMPREGO DE SOLUÇÕES DE SULFATO DE SÓDIO.....	112
4.5. ENSAIOS NA PRESENÇA DE LIGANTES.....	115
4.5.1. REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: MÉTODO ACELERADO DE BARRAS DE ARGAMASSA.....	115
4.5.2. ADESIVIDADE AO LIGANTE BETUMINOSO.....	117
4.6. APLICAÇÃO DOS MATERIAIS PÉTREOS EM CONCRETOS.....	119
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	123
5.1. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	126
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	128
<u>ANEXO A</u>.....	138
<u>ANEXO B</u>.....	144
<u>ANEXO C</u>.....	148

1. INTRODUÇÃO

Na indústria mineral do Estado de São Paulo, o primeiro bem mineral mais produzido e comercializado é o de agregados. Em valores comercializados os agregados (areias, britas e cascalhos) ultrapassaram os quatro bilhões de reais no ano de 2015 (DNPM, 2016). O destino final destes materiais é a construção civil, sendo aplicados com a presença de ligantes (concretos e pavimentos) e sem a presença de ligantes (in natura, em enrocamentos e lastro ferroviário).

Com localização no município de Limeira a área de estudos, não se difere da vocação paulista em termos de produção mineral, o que é demonstrado pela presença de quatro pedreiras de magmatitos básicos no município em questão. Os dados do DNPM datam mais de trinta anos de exploração mineral no maciço estudado em duas destas mineradoras, notando-se a um histórico produtivo de agregados especialmente para elaboração de misturas asfálticas e composição de concretos hidráulicos.

Exemplos como os da indústria limeirense de britas, de modo geral, iniciam se mostrando como áreas com propensão à produção de agregados, tanto pela proximidade dos centros consumidores. Quanto à presença de matéria-prima rochosa de boa qualidade tendo em vista o emprego final, neste caso relatado por diversos autores corpos intrusivos da Formação Serra Geral ocorrem na região da área de estudos.

Considerando as diversas experiências de emprego de rochas, principalmente em grandes obras, problemas causados, pela presença de minerais potencialmente reativos e de baixa resistência ao intemperismo por exemplo, mostram a importância dos estudos tecnológicos representativos conforme a variabilidade geológica do maciço.

Nas fases iniciais de pesquisa mineral para maciços rochosos a serem explorados o reconhecimento litológico é essencial, bem como o detalhamento das propriedades geotécnicas dos materiais empregados como agregado. Estes aspectos são estudados de modo a empregar-se métodos investigativos e amostragens adequados, levando em conta as variedades geológicas. Entretanto nem sempre o devido detalhamento necessário é reproduzido, gerando incertezas nos produtos finais de um empreendimento mineral.

Para uma exploração mineral de qualidade apreciável ao longo das etapas de desenvolvimento de uma jazida, testes avaliativos devem ser rotineiros, sendo que a variabilidade em termos tecnológicos se deve às diferenças de cunho geológico do maciço, incluindo o acompanhamento ao longo do tempo de vida útil do mesmo.

Nesse contexto se enquadra a intrusão de Limeira, constituída por diferentes rochas (basaltos, diabásios, monzodioritos e quartzo-monzodioritos e até riolitos) e que vem sendo objeto de pesquisas geológicas, principalmente de cunho genético e tectônico (Faria, 2008; Lino, 2015, Lino *et al* 2016; Guibu *et al* 2018 e Lino *et al*, 2018), com destaque aos detalhamentos petrográficos das rochas presentes no corpo geológico, que permitem uma análise de possíveis problemas em aplicações destes materiais como agregados em obras

O referido maciço se caracteriza como um grande fornecedor de matéria prima atendendo a demanda por rochas britadas na região, pois duas pedreiras exploram este jazimento (Figura 1-1). As informações e experiências de campo já colhidas demonstraram que os processos de beneficiamento mineral destas pedreiras não levam em conta os diferentes materiais geológicos, matérias-primas de britas. Portanto desmontes realizados no maciço, podem conduzir diferentes fácies aos processos de cominuição mineral, tornando os materiais granulares de escala industrial não representativos para caracterização tecnológica.

Estas constatações motivaram o desenvolvimento deste estudo, que tem foco em análises petrográficas e ensaios tecnológicos das variedades de rochas presentes para as principais aplicações em obras de engenharia. Para abranger a problemática, uma revisão bibliográfica foi realizada contendo tópicos relevantes sobre a geologia local e tecnologia de rochas. Atividades de campo foram realizadas visando o reconhecimento expedito geológico-geotécnico, bem como amostragem de diferentes materiais pétreos representativos em uma pedreira.

A preparação de amostra de agregados para ensaios mecânicos e químicos foi realizada em escala laboratorial, utilizando-se de um mini-britador e peneirador mecânico. Foram realizados ensaios para caracterização das aplicações de maior demanda da região, sendo estas britas para concreto hidráulico e asfáltico.

Portanto esta pesquisa trata-se de um estudo científico aplicado a um problema da indústria mineral de agregados, que explora maciços rochosos com certa complexidade. Os resultados obtidos são contribuições às pesquisas

desenvolvidas pelo Grupo de Tecnologia de Rochas (GTR), que há mais de 30 anos vêm desenvolvendo estudos sobre materiais pétreos aplicados para construção civil.

1.1. JUSTIFICATIVAS

Em geral, atividades minerárias de agregados no Brasil não apresentam muitos problemas quanto o emprego destes materiais em obras de engenharia, pois a disponibilidade de rochas duras cristalinas (magmáticas e metamórficas) é grande no território nacional. No entanto propriedades particulares, físico-mecânicas ou químicas, podem ser influenciadas por algumas características petrográficas como a composição mineralógica e textura, de modo que algum limite de aplicação previsto por norma seja crítico ou até mesmo ultrapassado.

A presente pesquisa constitui um caso de heterogeneidade do maciço rochoso descrito por diversos autores até então com viés ligado à geologia *stricto sensu*. Destaca-se que há rochas de composição química bem diferenciada nesta ocorrência geológica, variando de rochas básicas (basaltos e diabásios), a intermediárias (monzodioritos e quartzo-monzodioritos) até ácidas (riolitos). Reconhecido estas variações e levando-se em conta de que as propriedades tecnológicas de rochas são estreitamente ligadas à sua gênese, torna-se importante uma caracterização tecnológica adequada, de modo a balizar os principais litotipos frente ao uso como agregados.

Segundo Raisanen & Torppa (2005) a mineração de maciços heterogêneos embasada na avaliação da qualidade de rocha dos litotipos, pode setorizar os recursos minerais de acordo com a qualidade, de forma que um agregado de alta qualidade não seja utilizado onde um agregado de baixa qualidade atenda as exigências. Esta abordagem operacional pode maximizar a produção e longevidade de uma jazida para agregados.

Nesta perspectiva, os estudos tecnológicos podem produzir dados relevantes quanto à qualidade dos materiais em questão, e demonstrar devidas aplicações para cada rocha. De modo a contribuir com os processos de lavra e beneficiamento mineral de explorações comerciais deste maciço, assim como maciços semelhantes ou com expressiva variação composicional.

Figura 1-1: Localização da pedreira estudada (polígono tracejado em amarelo) no Município de Limeira, SP. Fonte: Imagem Google Earth 2018 e IBGE.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo geral dessa pesquisa é a avaliação das propriedades tecnológicas de diferentes rochas da intrusão de Limeira, presentes em uma pedreira ativa situada a sudoeste da mancha urbana de Limeira, junto à Rodovia Anhanguera, permitindo o estabelecimento de correlações entre as propriedades dos materiais pétreos que compõem o maciço investigado, demonstrando a qualidade mecânica e reatividade em ligantes. Desta forma, os dados poderão contribuir num sentido de melhor aproveitamento e seleção destes materiais, de acordo com as exigências técnicas consagradas no meio comercial

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL E LOCAL DA INTRUSÃO DE LIMEIRA

A Intrusão de Limeira trata-se de um dos corpos da Formação Serra Geral intrudidos em rochas sedimentares da Bacia do Paraná. Desta forma uma breve revisão sobre o contexto geológico da Formação Serra Geral, bem como um detalhamento sobre a ocorrência local também é apresentado a seguir.

2.1.1. FORMAÇÃO SERRA GERAL: ASPECTOS GEOLÓGICOS

A Formação Serra Geral está inserida no contexto geológico da Província Magmática do Paraná-Etendeka (PMPE), localiza-se na Bacia do Paraná, uma bacia intracratônica de grande extensão, 1,2 milhões de km² (AMEILDA, 1981). As rochas da Formação Serra Geral são compostas por derrames de lavas basálticas, intercaladas aos arenitos da Formação Botucatu, ainda havendo intrusões na forma de diques, *sills* ou lacólitos, intrudindo aos sedimentos paleozoicos da Bacia do Paraná (MACHADO *et al.*, 2005).

O volume estimado por Nardy *et al.* (2002) para os derrames é de 790.000 km³, em maioria de caráter toleítico predominando basaltos, as rochas ácidas e intermediárias não devem atingir 3% do volume total de rochas vulcânicas. Quanto a gênese dos derrames basálticos segundo Machado *et al.* (2009) está relacionada a um processo de extravasamento fissural contínuo, sendo que diversos eventos magmáticos interligados a questões de esforços tectônicos que provocaram a quebra do Gondwana.

De acordo com Frazão (1993) a distribuição extensa dos magmatitos básicos da Formação Serra Geral, seja em derrames ou diques e soleiras, faz com que estas rochas sejam importantes fontes de material de construção. Frank (2008) compila uma lista de 34 Usinas Hidrelétricas (UHEs) estabelecidas em rochas da Formação Serra Geral, essas UHEs estão localizadas nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Goiás. Diversos pesquisas realizadas em UHEs contribuíram para a compreensão dos aspectos geológico-geotécnicos das rochas importantes para as fundações de barragens e também na utilização desses materiais como material construtivo dessas grandes obras.

Oliveira (1981) propõe um perfil típico de um derrame de basalto, podendo se definir como uma "estratificação", devida intercalação entre basaltos vesiculares ou amigaloidais e compactos. Nas bordas, base e principalmente topo geralmente ocorrem com vesículas ou amígdalas. Essa alternância de camadas fica evidente quando há rochas clásticas de diversos graus de coerência "intertrapeando" os derrames. Sobre a geologia estrutural dos derrames, as feições de juntas de grande extensão com ocorrência em localidades de instalações de barragens com extensões possíveis até centenas de metros. As fraturas de contato têm grandes extensões acompanhando os derrames, apresentam quase sempre aberturas expressivas, de 0,1 mm a 3 mm, chegando até 3,0 a 10 cm restritas a pequenas extensões (Figura 2-1).

Figura 2-1: Perfil típico de um derrame de basalto (OLIVEIRA, 1981). (1) Material de intertrapeamento geralmente associado a brechas, com contato "c" com o derrame superior. (2) Zona do topo, basalto vesicular com fraturamento horizontal predominante ou irregular. (3) Zona do núcleo – basalto compacto com fraturamento vertical (diaclasamento colunar), ocorrem juntas de grande extensão lateral tipo "j". (4) Zona da base, podendo ser vesicular com fraturamento horizontal predominante, acima do contato "c" com o derrame inferior.

Machado *et al.* (2007) investigaram rochas extrusivas e intrusivas da Formação Serra Geral, provenientes de regiões dos estados de São Paulo e Minas Gerais. Os estudos petrográficos demonstraram que em geral, a composição mineralógica dessas rochas é composta essencialmente por 25% a 50% de plagioclásio (em maioria labradorita), 20 a 40% de piroxênios (augitas e pigeonitas), até 4% de olivina, de 4 a 10% de opacos (magnetita e ilmenita) e mesóstase (vítrea e/ou intergranular). As

condições para a respeito do grau de cristalinidade estão diretamente ligadas ao resfriamento, ou seja, profundidade de cristalização.

Além dos derrames de basaltos, manifestações intrusivas ligadas ao vulcanismo Serra Geral, ocorrem por todos os limites da província magmática. Os afloramentos maiores estão localizados na porção centro-leste do Estado de São Paulo. Há grades exposições na porção oriental da bacia, possivelmente ligada a reativações de alinhamentos estruturais de direção NW-SE (GODOY, 2006). Essas intrusões quando em forma de *sill* têm espessura típica de 2 a 200 metros (ERNESTO *et al.*, 1999).

Soleiras em Reserva e em Salto do Itararé no Paraná foram estudadas quimicamente por Maniesi & Oliveira (1997). Para as duas intrusões variações composicionais foram notadas, havendo a ocorrência de rochas básicas (basaltos), intermediárias (andesitos) e ácidas. As manifestações ácidas são diferentes nos *sills* em Reserva, ocorrendo em veios pegmatóides granofíricos próximos ao topo da intrusão. Entretanto em Salto do Itararé os veios riolíticos são milimétricos. Os autores sugerem que um processo de cristalização fracionada ou ainda que as rochas ácidas poderiam surgir de fases minerais em desequilíbrio, sendo incluídas nos *sills* durante processo mecânico de migração para locais de baixa pressão.

Segundo Petersohn *et al.* (2007) as rochas aflorantes de soleiras da formação Serra Geral no Estado do Paraná são petrograficamente classificadas como basaltos, microgabros e gabros, em função da granulação dos cristais. Com tudo, estas litologias são quimicamente classificadas como basaltos andesíticos, andesitos, latí-andesitos, latitos e um quartzo latito.

A soleira do Cerro Coronel com área total de 12,4 km², localizada na região do Vale do Rio Pardo (RS), foi investigada por Sarmento (2010) e Sarmento *et al* (2014). O crescimento dos cristais da borda para o centro entre os diabásios foi reconhecido por meio de análises petrográficas de microscopia ótica. Aspectos estruturais típicos de derrames de basaltos também ocorrem neste corpo geológico, sendo estas descritas como: disjunções colunares (clássicas) e fraturamentos sub-verticais.

Oliveira *et al.* (1998) apontaram feições de bandamento composicional em um *sill* aflorante na Pedreira Basalto próxima a Campinas. Sendo esta feição intercalações de diabásios de granulação média a fina com monzodioritos de

granulação grossa. As lentes de monzodiorito são centimétricas e chegam até 6 metros de espessura (Figura 2-2). A interpretação genética é que as rochas intermediárias se originaram de um líquido fracionado mais residual. Nesse aspecto os autores destacam possíveis implicações para exploração mineral dos derrames de basalto do Paraná.

Figura 2-2: Variedade litológica no Sill da Pedreira Basalto, próximo a Campinas. As faixas de rochas mais claras são os monzodioritos; observar a escala de uma pessoa no círculo. Modificado de Oliveira et al. (1998).

2.1.2. GEOLOGIA LOCAL DA INTRUSÃO DE LIMEIRA

Estudos de cunho geológico e genético vem sido realizados na intrusão de Limeira na última década, diversos pesquisadores vêm investigando os processos de diferenciação magmática dos corpos intrusivos da Formação Serra Geral, em exemplo: Faria (2008), Oliveira *et al.* (2008), Lino (2015) e Lino & Vlach (2016) e Lino *et al* (2018).

Basicamente o maciço rochoso estudado é constituído por rochas da intrusão de Limeira, encontrando-se exposto principalmente nas cavas das pedreiras que exploram os litotipos aflorantes. As rochas encaixantes são arenitos e siltitos do Subgrupo Itararé, conforme a Figura 2-3, apresentando vasta variação gradando de basaltos na borda para diabásios, monzodioritos até quartzo-monzodioritos (FARIA, 2008).

Figura 2-3: Mapa geológico local da Intrusão de Limeira. Fonte: Mapa geológico do Estado de São Paulo, escala original 1:100000 (CPRM, 2006)

Através de observações de campo na pedreira Cavinatto, Souza Junior (1985) aponta que o corpo geológico é intrusivo, composto por diabásio, havendo na borda superior uma auréola de contato com o arenito, composta por uma rocha escura compacta e afanítica, discrepante das rochas subjacentes, que são bem mais grosseiras e claras.

Carvalho *et al.* (1998) intitularam na região a existência do *sill* Limeira-Cosmópolis, contendo na realidade uma série de corpos de diabásios em forma de soleiras e lacólitos não contínuos horizontalmente. Intrudido nas rochas do Grupo Itararé e com cerca de 280 metros de profundidade e 60 quilômetros, sendo essa grande extensão justificada por testemunhos de sondagem de perfurações para águas subterrâneas nas regiões de Cosmópolis e Paulínia (SOARES, 1985 *apud* LINO, 2015). As rochas da intrusão de Limeira são as mais diferenciadas das intrusões semelhantes. Essas rochas possuem acidez intermediária, análises químicas (FRX) encontraram teores de sílica entre 54-55% (MACHADO *et al.*, 2005).

Faria (2008) aponta que a grande variação composicional é resultado de processos de diferenciação magmática, especificamente cristalização fracionada. O perfil da Figura 2-4, sintetiza a ocorrência dos principais litotipos, sendo a borda de contato com as rochas encaixantes de composição de um basalto denso (afanítico a fanerítico fino), abaixo há uma camada enriquecida de amígdalas preenchidas por minerais hidrotermais, ainda subsequente há a presença de ocelos de

composição quartzo-monzodiorítica. Essa faixa de ocelos e amígdalas ocorrem nos basaltos e diabásios. Os diabásios variam de fino a médios, chegando até os 15 metros do contato com a encaixante, seguidos de monzodioritos e quartzo-monzodioritos de textura fanerítica média a muito grossa. Há ainda a presença de veios centimétricos a decimétricos de rochas ácidas.

Figura 2-4: Perfil esquemático da Pedreira Basalto 04 (FARIA, 2008).

Os estudos de campo e petrológicos de Lino (2015), avaliando a cava da Pedreira Cavinatto, definiram que a borda de contato é composta por basalto afanítico variado a fanerítico muito fino, com espessura de 1 a 1,3 metros, sendo observado a presença de 30 cm presença de amígdalas com granulação muito fina. Os diabásios ocorrem desde 1,3 metros até 20 metros de profundidade com granulação progressiva em direção ao fundo. Os contatos entre o diabásio e monzodiorito é abrupto, os monzodioritos afloram entre 20 metros e 60 metros da borda, ainda no fundo da cava são encontradas rochas de composição ácida como quartzo-monzodioritos (Figura 2-5).

Figura 2-5: Perfil geológico da Intrusão de Limeira (LINO, 2015).

Seixas *et al.* (2016) ao realizaram estudos geofísicos, por meio de método magnetométrico, com o intuito de delimitação do corpo magmático, obtiveram resultados que divergem com a proposta de Soares (1985). Os corpos delimitados por Seixas *et al.* (2016) e cartografados com auxílio dos métodos indiretos, revelaram que a intrusão tem continuidade restrita (Figura 2-6).

Segundo Lino & Vlach (2016) as variações estruturais e texturais que se dão das bordas até as regiões mais próximas ao centro da intrusão, comprovam que a ocorrência não é de uma soleira. Os estudos de campo e geofísicos mais recentes de Lino *et al* (2018) sugerem que se trata de um lopólito este corpo geológico cretácico. Segundo estes autores as evidências são: a sequência de rochas não apresenta continuidade lateral como esperado; a colocação estrutural ao longo da intrusão sugere que há afinamento para noroeste, sudeste e leste; os contatos enclausurados com siltitos do Grupo Itararé são sub-verticais e chegam a uma profundidade de até 30 a 40 metros.

Figura 2-6: Mapa com a delimitação dos corpos em subsuperfície modificado de Seixas et al. (2016)

2.2. AGREGADOS ROCHOSOS: PRODUÇÃO E APLICAÇÃO

A cadeia de produção de agregados rochosos envolve principalmente etapas de fragmentação das rochas, no intuito de adequação granulométrica para as devidas aplicações. No que se refere as utilizações em construção civil exigências e normas técnicas são empregadas para caracterização destes materiais.

2.2.1. MINERAÇÃO DE AGREGADOS ROCHOSOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL

Os critérios para seleção de locais para exploração de rochas como pedreiras são essencialmente geológicos e econômicos (MC NALLY, 1998). De modo que os custos para extração possam produzir uma variedade com qualidade contínua de produtos para enrocamento, lastro e base de pavimentação. Qualidades inferiores de rochas podem também gerar britas utilizáveis por meio de *blends* seletivos.

De acordo com Petrinice (1990) no ramo de materiais para construção civil, o principal aspecto considerado é a distância da fonte para o mercado consumidor. Consequentemente a escolha das áreas favoráveis para prospecção mineral pode ser limitada também por fatores não geológicos, como a presença de vias de acesso, disponibilidade de energia dentre outros.

Após definida a finalidade econômica, mercado consumidor ou obra de grande porte de demanda, devem-se iniciar fases de exploração mineral. Bell (1977) indica que as etapas iniciais devem ser:

- Dados geológicos de referências, assim como mapas geológicos, trazem informações dos tipos de rochas, idades geocronológicas e topografia;
- Grandes tipos de rochas, trazendo informações iniciais de acordo com a literatura consagrada;
- Topografia, possibilitando a escolha de áreas altas onde há a erosão de materiais alterados e baixa laterização;
- Idades das rochas, por si só têm estreita ligação com as qualidades dos produtos finais, rochas mais antigas geralmente produzem melhores britas (nos casos onde há maior conservação aos processos intempéricos, ou seja, em grandes profundidades).

Os métodos investigativos são complementares às etapas iniciais, de modo a confirmar as expectativas de quantidade e qualidade de rochas. Segundo Mc Nally (1998) a perfuração de testemunhos é mais usual, entretanto métodos geofísicos também são usuais.

Recentemente destacam-se algumas pesquisas no Brasil sobre o tema, assim como a investigação geofísica realizada por Martins (2014) na cava pedreira da Embu, na Região Metropolitana de São Paulo. Sondagens elétricas verticais foram empregadas para identificação de zonas de transição solo-rocha, bem como contatos de diferentes litologias, contribuindo para melhor aproveitamento do maciço rochoso.

Bravo, Galán e Silvestre (2016) realizaram uma pesquisa numa pedreira situada na Zona de Cisalhamento Campinas-Valinhos, município de Campinas, São Paulo. Empregaram-se mapeamentos geológicos expeditos, perfilagem ótica de poço tubular já existente e sondagens complementares. Os resultados como mapas

geológicos e cálculo das reservas, mostraram-se úteis na redução de custos de avaliação mineral e possíveis reavaliações.

Após a definição da área para instalação do empreendimento mineral produtor de brita iniciam-se as atividades de lavra a céu aberto (FRAZÃO, 2002; FRAZÃO, 2007). O terreno deve ser preparado para começar as operações de lavra, portanto espessas coberturas de solo residual devem ser removidas através de processos mecânicos. Posteriormente, seguem-se com as perfurações com objetivo de efetuar uma malha correta segurando que os desmontes sejam melhor realizados e aproveitados (KOPPE & COSTA, 2012).

Os processos de perfuração em rochas segundo Zhang (2016) são feitos por meio de métodos percussivos ou rotativos. O primeiro realiza o avanço na sondagem através de rupturas no maciço através de impacto de um martelo. No segundo caso utiliza-se de coroa diamantada na extremidade de ferramentas de perfuração sendo empregado normalmente em minas a céu aberto, grandes pedreiras e indústria do petróleo, primordialmente para pesquisa mineral e cubagem de jazidas. Koppe & Costa (2012) comentam que na indústria da brita brasileira o método mais usual é o de perfuração percussiva.

Segundo Almeida (2003) os furos no maciço rochas são carregados com explosivos, objetivando uma detonação satisfatória, de modo que os fragmentos produzidos sejam adequados para as próximas etapas. Caso contrário podem ser necessários desmontes secundários, ou a utilização de marteletes para a quebrar os blocos inadequados para britagem, incorrendo em custos adicionais de produção.

Quanto à avaliação do maciço, os sistemas de juntas são importantes mais para os desmontes que os processos de cominuição. De modo que aberturas maiores de um milímetro podem confinar as tensões propagadas em pequenos blocos, outro efeito é a presença da água nas juntas abertas podendo impedir o uso de explosivos (MCNALLY, 1998).

Os próximos estágios serão responsáveis pelo transporte, britagem e separação granulométrica. Koppe e Costa (2009) destacam que o carregamento e transporte em pedreiras geralmente é realizado por sistema de carregadeira e caminhões, podendo incluir retroescavadeiras. A etapa de britagem tem grande ligação com as propriedades da rocha beneficiada, quantidade e qualidade de produção, operação e manutenção de equipamentos (FRAZÃO, 2002; FRAZÃO 2007).

McNally (1998) enfatiza que as propriedades de rocha intacta frente a britagem têm grande importância, principalmente resistência a tração e módulo de elasticidade. A fragmentação nessa operação tem carregamentos mais lentos, se comparada aos desmontes, de modo que as propriedades geomecânicas estáticas obtidas por laboratórios tem maior relevância.

O equipamento utilizado na britagem dos blocos gerados pelos desmontes é o britador primário, tendo a função de reduzir radicalmente o tamanho dos fragmentos. Posteriormente são utilizados processos de britagem secundárias, terciárias se necessário. Resultado desses processos de cominuição são as britas em diversos tamanhos, sendo relocadas por correias transportadoras para britadores e peneiras. Finalmente as frações granulométricas são separadas em pilhas de estoque de agregados (ALMEIDA, 2003).

Segundo a norma NBR 9935 (ABNT, 2011) as frações mais finas resultantes das britagens com diâmetro menor que 4.8 mm são classificadas em: areia de britagem com grãos passantes pela peneira com malha de 4.8 mm e retidos na peneira com abertura de 150 µm; e finos todo material granular passante na peneira de malha 150 µm. Estes materiais vindo sendo caracterizados para emprego em concretos hidráulicos por diversos autores como: Sbrighi Neto (1976); Sbrighi Neto (1986); Sbrighi Neto & Soares(1996); Zanquetta & Soares (2003), Calaes & Martinez Gozales (2006) e Damo (2012).

Mendes (1999) avaliou a viabilidade econômica do uso de finos materiais menores que 4,8mm de diâmetro, de uma pedreira no município de Borborema, São Paulo. Esses materiais têm contexto geológico da Formação Serra Geral sendo provenientes de basaltos densos britados. Esta pesquisa revelou possibilidades de aplicação dos materiais como agregados miúdos em concretos compactados de rolo para pavimentação rodoviária.

2.2.2. VARIAÇÕES GEOLÓGICAS NOS MACIÇOS E SUA RELEVÂNCIA NA MINERAÇÃO DE AGREGADOS

McNally (1998) destaca que as rochas como diabásios (intrusivas) geralmente apresentam qualidades superiores e com menos problemas de alterabilidade se comparados a derrames basálticos. Entretanto alterações deutéricas, diferenciações magmáticas e múltiplas intrusões podem variar a qualidade tecnológica de uma

pedreira. Pequenos *sills* e diques de espessura menores de 20 metros podem gerar um bom maciço a ser explorado, e pequenos corpos de gabro são melhores ainda.

A pedreira Prospect Quarry localizada na metrópole de Sydney, Austrália, teve atividades de exploração e beneficiamento de rocha para brita iniciadas em 1870, já no início do século XX, a extração de rocha anual atingiu 2 milhões de toneladas. Nos anos 50 a primeira usina de asfalto foi consolidada, enquanto que duas plantas de britagem e mais uma usina de asfalto já estavam em funcionamento em 1992. O fechamento da pedreira começou em 2001, a área foi utilizada para indústrias leves e pequenas casas (PROSPECT HERITAGE TRUST INC., S/D).

O lacólito, corpo intrusivo, que foi explorado na pedreira Prospect Quarry, segundo McNally (1998) é um exemplo das consequências das variações geológicas e localização no aperfeiçoamento de exploração de rocha, onde há escassez de materiais rochosos para agregados. Problemas devido à alta alterabilidade das rochas presentes no maciço, determinaram classes de acordo com a qualidade do material. As porções superiores da intrusão são compostas por diabásios, chegando até basaltos picríticos na base (Figura 2-7). Os processos de diferenciação magmática têm efeito de concentração de olivina em profundidade ocasionando na desintegração rápida em exposição. Ainda há alteração deutérica formando minerais hidrotermais, constituintes em 20 a 70% das rochas, como: zeólita, calcita, prehnita e analcita. As aplicações dos produtos granulares da pedreira eram destinadas a base e sub-base para pavimentação.

Figura 2-7: Foto cava da Prospect Quarry. Material esbranquiçado diabásio e abaixo basalto com concentração de olivinas (MC NALLY, 1998).

Em Northumberland, Inglaterra, o *sill* “Whin” explorado por diversas pedreiras para produção de agregados, trata-se de um corpo geológico composto de diabásios. Segundo Dearman *et al* (1984) em certas localidades da intrusão havia-se rochas com baixas resistências, através de análises petrográficas e de caracterização, os materiais de qualidade inferiores foram descartados, os processos de hidrotermais provocavam sericitização, culminando no aumento da porosidade e perda de resistência mecânica.

Gomes & Rodrigues (1999) realizaram reconhecimentos de campo em afloramentos de frente de lavra de pedreiras nos municípios paulistas de Ribeirão Preto, São Carlos, Araraquara, Jaú, São Manuel e Assis, todos em áreas de substâncias basalto e diabásios, segundo informações do DNPM (Figura 10). Foram notadas feições de derrame de lava, entablamento e colunata. Nas transições superiores e inferiores dos derrames há a presença de basaltos vesiculares-amigdaloidais com espessuras de 1,5m a 2m, representando de 5% a 10% dos derrames. Informações verbais dos funcionários destacam que cada compartimento apresenta características diferentes em relação da produção, desmonte e britagem, e na qualidade da material frente as aplicações de engenharia civil.

Pinho (2007) realizou análises petrográficas detalhadas de amostras provenientes das paredes de cavas pedreiras das Regiões Metropolitanas: Curitiba, Belo Horizonte, Rio de Janeiro, São Paulo e Porto Alegre. Dentre os materiais descritos,

as rochas provenientes da pedreira Incopel S/A, município de Estância Velha, 45 km de Porto Alegre, foram descritos basaltos faneríticos finos a afaníticos, havendo porções glomeromáficas, pórfiros, amígdalas e vesículas, ocorrem ainda raramente basalto latito (com feldspato alcalino).

A pedreira Omerli Quarry na região de Istanbul, na Turquia foi investigada por Yilmaz & Tugrul (2013), rochas de baixa qualidade e de alta qualidade são britadas juntamente, o que possibilita problemas geotécnicos de aplicações desses materiais. Através de mapeamento geológico de detalhe foram reconhecidas 5 litologias: 2 calcários, 2 arenitos e um diabásio intrusivo. Sendo estes materiais avaliados no uso em concretos, utilizando-se do mesmo traço, os calcários obtiveram melhores resultados de resistência a compressão simples.

Na recente expansão da mina da Maestra em Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, segundo Selmo (2014) foi detectada a presença de brechas vítreas. Sendo assim estudos de campo até ensaios laboratoriais foram desenvolvidos, comprovando que o material do fundo da cava poderia ser empregado em bases e sub-bases, com limitações em camadas de base. Também foi desenvolvido um modelamento geométrico da unidade com cubagem preliminar estimada em 17 milhões de m³. Entretanto são recomendados um maior controle da qualidade do material e um acompanhamento com sondagens complementares.

Quanto a aplicações de materiais provenientes do mesmo maciço rochoso, como agregado em lastros ferroviários, Rangel *et al* (2016) investigaram dois materiais basálticos de uma pedreira de Uberlândia, Minas Gerais. Mesmo sem informações de petrográfica microscópica, os materiais foram distinguidos pela presença de amígdalas e profundidades associadas. Desta forma o basalto amigdaloidal caracterizado apresentava porosidade aparente até três vezes a do basalto denso. Entretanto em termos de resistência e forma, ambos litotipos apresentaram resultados satisfatórios para normas nacionais de lastro.

2.2.3. AGREGADOS ROCHOSOS EM APLICAÇÕES COM LIGANTES

A denominação de agregado para construção civil é utilizada no Brasil para identificar o segmento do setor mineral que produz matéria-prima mineral para emprego na construção civil. São essas matérias: areia, rocha britada e cascalho: utilizadas em concreto, asfaltos, argamassa ou in natura em obras (QUARESMA, 2009).

Frazão & Paraguassú (1998) definem os agregados como materiais rochosos granulares que devem ter dimensões e propriedades adequadas para o uso em obras de engenharia civil. Basicamente podendo ser classificados de acordo com:

- Natureza: caso extraído em forma de fragmentos assim como areia e pedregulhos são naturais, os que passam por algum processo de fragmentação são artificiais. Nota-se que a natureza abordada pelos autores se trata da forma de obtenção.
- Densidade: agregados leves (pedras-pomes, vermiculita, argila expandida e etc.), pesados (magnetita, limonita, barita e outros), normais (areias, pedregulhos e pedras britadas).
- Tamanho dos fragmentos: tem-se: agregados graúdos diâmetro mínimo superior a 4,8 mm, agregados miúdos diâmetro máximo igual ou inferior a 4,8 mm.

De acordo com Farias & Palmeira (2007) os agregados são fragmentos de rochas com tamanho e propriedades adequadas para utilização em quase todas as obras de engenharia. Sendo esses materiais pétreos isolados ou em utilização com ligantes, os materiais mais empregados na Engenharia Civil.

Segundo Petrucci (2007) a qualidade da pedra é definida pela sua aptidão em atender as conjunturas técnicas para uma determinada utilização. Sendo as propriedades fundamentais das pedras se referindo aos requisitos básicos:

- Resistência mecânica: capacidade de suporte das cargas solicitantes sem entrar em colapso;
- Durabilidade: capacidade de manter as propriedades físicas, mecânicas com o decorrer do tempo sob agentes agressivos;
- Trabalhabilidade: capacidade da pedra em ser aperfeiçoada com o mínimo de esforço;
- Estética: aparência da pedra para fins de revestimento (não se aplica a agregados).

Petrince (1990) afirma que as propriedades dos agregados, bem como suas aptidões para uso em concreto ou em obras rodoviárias, dependem diretamente das características petrográficas da rocha britada, da granulometria e da forma da brita. Todas estas propriedades têm estreita ligação com os processos geológicos de formação das rochas, compreendendo estes processos é possível a otimização da produção com agregados de alta qualidade adequada.

2.2.3.1 CONCRETO ASFÁLTICO

Em vias rodoviárias os pavimentos são constituídos sempre por uma camada denominada por base, e em alguns casos podendo ter uma porção abaixo, chamada de sub-base. Entretanto a superfície da rodovia tem uma camada superior, com função de resistir os esforços do tráfego, o revestimento, flexível com ligante asfáltico ou rígida composta por placas de concreto de cimento Portland (FARIAS & PALMEIRA, 2007).

As principais funções de agregados na superfície de asfaltos de acordo com Mc Nally (1998) são:

- Ser resistente aos desgastes dos pneus por abrasão, dos ventos e água superficial.
- Manter a forma e suavidade da pista rodoviária.
- Prevenir a infiltração de água nas camadas inferiores e manter estabilidade mineral.

A característica essencial dos agregados na camada de revestimento asfáltico, segundo Farias & Palmeira (2007) é quanto a granulometria, sendo essa característica inserida em faixas em função do tráfego. Para tráfegos mais pesados são usadas faixas C e B.

Os agregados em meio de misturas asfálticas para pavimentos, segundo Frazão & Paraguassu (1998) devem atender as seguintes exigências:

- Boa tenacidade e resistência ao polimento, de modo a resistir a degradação pelo atrito com os pneus;
- Boa resistência a compressão, suportando o esforço imposto pelo peso dos veículos e distribuição de cargas para a base;
- Inexistência de minerais alteráveis, não sofrendo reações químicas devido à ação intempérica;
- Boa adesividade, inibindo deslocamentos do ligante betuminoso na superfície de contato com o agregado;
- Formato mais equidimensional, reduzindo gastos com o betume.

2.2.3.2 CONCRETO HIDRÁULICO

A utilização dos agregados pétreos em concretos hidráulicos teve início entre o fim do século XIX e início do século XX, por meio do desenvolvimento dos primeiros

estudos do concreto de cimento Portland. Mesmo sabendo da grande quantidade em volume dos agregados no concreto, esse material era visto apenas como um material granular inerente utilizado para baratear o custo final (SBRIGHI NETO, 2011).

Segundo Metha & Monteiro (2008) os agregados muitas vezes apresentam visibilidade de material de enchimento inerente em concretos, fazendo com que geralmente não seja dada a devida importância da qualidade das britas. Entretanto diversas são as funções exercidas pelos agregados no concreto: resistência, durabilidade e estabilidade (estado duro), trabalhabilidade (estado fresco) e nos custos finais, portanto é essencial o estudo desses materiais.

Diversos problemas técnicos decorrentes a escolha errônea de agregados, em particular, nos anos 50, trouxeram a necessidade do melhor entendimento das funções dos agregados no concreto. Desta forma descobriu-se que propriedades do concreto são influenciadas pelas características dos agregados (porosidade, forma, textura, entre outras). Outra fase de avanços foi durante a descoberta das reações álcali-agregado, nas quais obras inteiras foram condenadas, essa reação se origina entre álcalis do cimento com minerais reativos dos agregados produzindo um gel amorfo expansivo (SBRIGHI NETO, 2011).

Segundo Petrucci (2007) as principais funções dos agregados empregados na confecção de concretos são: proporcionar partículas resistentes as solicitações, desgaste e ação intempérica; e redução de mudanças no volume, além no custo do concreto.

As propriedades básicas mais relevantes dos agregados para concreto segundo Bucher (1986) podem ser divididas em:

- Propriedades Mecânicas: resistência aos carregamentos externos através de impactos, esmagamentos, abrasão, fragmentação. Também devem suportar a solicitações internas como: compressão, tração, flexão, cisalhamento e etc.
- Propriedades Físicas: resistência a permeabilidade; deformações térmicas; e resistência ao transporte de energia (radiação e eletromagnética).
- Propriedades Químicas: resistência ao ataque de agentes externos e internos, tais como: sais, soluções e minerais de hidratação dos cimentos *portland*.

Os agregados normalmente usados para produção de concreto têm resistência mecânica muito superior à do próprio concreto, não limitando seus empregos na maioria dos casos. Concretos de módulos de deformação superiores a 30 GPa necessitam de uma seleção exigente, principalmente de agregados graúdos, recomendando-se escolha de agregados de rochas de alta resistência (SBRIGHI NETO, 2011).

2.3. CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS ROCHOSOS PARA LIGANTES

Levando em conta os aspectos referente as obras, a caracterização dos agregados rochosos é realizada através diversos métodos para obtenção das propriedades destes materiais na construção civil. Desta forma a escolha dos materiais deve ser feita levando em conta ensaios e investigações adequadas que permitem o conhecimento das propriedades físicas, físico-mecânicas e petrográficas (FRAZÃO & PARAGUASSÚ, 1998; FRAZÃO, 2002).

De acordo com Petrinice (1990) a caracterização de agregados graúdos envolve a realização de ensaios para determinação de diversas propriedades. Sendo estas fundamentais e possíveis de detalhamento petrográfico para previsão do comportamento das rochas em aplicações.

As propriedades geológicas de acordo com Shestoperov (1983, apud FRAZÃO, 2002) se relacionam diretamente com a natureza das rochas, sendo importantes a composição mineralógica, tipos de estrutura e textura, além de forma das partículas na fragmentação, graus de alterabilidade e de cristalinidade, dentre outros aspectos.

A caracterização de propriedades físicas e físico-mecânicas é realizada em geral por métodos laboratoriais, havendo estreita correlação com as propriedades geológicas (FRAZÃO, 2002; FRAZÃO, 2007). As principais propriedades físicas são: densidade, massa, específica, porosidade, permeabilidade, capacidade de absorção de água, dureza, calor específico, condutibilidade térmica, dilatação térmica, expansibilidade (ou contrabilidade), adesividade, etc. Quanto as propriedades físico-mecânicas destacam-se: resistências à compressão, à tração (direta ou indireta), ao cisalhamento, ao impacto, à deformabilidade (ou elasticidade), à abrasividade, dentre outras.

Conforme Alexander & Mindess (2005) a caracterização de agregados para concreto permite a comparação e a seleção de diferentes materiais. O objetivo

desta etapa é prover propriedades mensuráveis que tem correlação com o desempenho final nos concretos.

Tendo em vista a variabilidade litológica da pedreira de estudos na intrusão de Limeira. Segue uma breve revisão bibliográfica dos principais procedimentos laboratoriais empregados para determinar de propriedades dos materiais. Sendo as propriedades aqui listadas e descritas de extrema importância à caracterização dos agregados nos empregos mais usuais pelo mercado consumidor de rocha britada na região, em meio de ligantes.

2.3.1. PETROGRAFIA

A análise petrográfica é realizada por descrição de sessões delgadas de rochas, utilizando-se de técnicas de microscopia óptica, que refinam as caracterizações prévias obtidas por descrições macroscópicas de rochas. De acordo com Frascá (2007) trata-se de uma importante ferramenta para o melhor entendimento entre a mineralogia e aspectos texturais e eventuais variações nos valores de propriedades tecnológicas de rochas. Portanto este tipo de análise faz parte do conjunto de recursos empregados para caracterização de rochas, visando utilização como agregado em obras de engenharia.

Estas análises utilizam de métodos que possibilitam a identificação da composição mineralógica (minerais principais, acessórios e secundários e sua quantificação), textura (forma e arranjo dos minerais), grau de alteração (minerais são, alterados e o tipo de alteração), bem como o grau e tipo de microfissuração (intercristalina ou intracristalina). Deve-se salientar a investigação da presença de minerais que possam reagir com os fatores intempéricos, climáticos ou substâncias presentes onde a aplicação da rocha será realizada (FRAZÃO, 2002; FRAZÃO 2007).

As composições mineralógicas e textuais de uma rocha não são características unicamente para classificação petrogenética. Estes parâmetros são decisivos para muitas propriedades de engenharia, mesmo que a análise petrográfica seja mais usual para caracterização de agregados para concreto. De modo que este tipo de análise possa ser uma ferramenta para exploração, caracterização, seleção e controle de rochas utilizadas como agregados (ANATASIO et al, 2016).

De acordo com McNally (1998) uma desvantagem dos métodos microscópicos e os ensaios convencionais físico-mecânicos é devido estes métodos

não responderem quantitativamente os problemas. Entretanto para identificação de minerais secundários expansivos a petrografia é essencial, pois estes podem absorver uma quantidade de água ainda que inexpressiva. Provocando em rochas de baixa porosidade (menor que 1%) microfissuramentos, culminando na redução de resistência, durabilidade e aumento deformabilidade dos materiais.

Frazão (2002) e Frazão (2007) categorizam três características de rochas reconhecidas por petrografia de interesse na construção civil. A primeira é quanto ao grau de alteração, que contribui diretamente na durabilidade e características físicas mecânicas das rochas. Em segundo plano a presença de minerais deletérios podem: provocar reações com os álcalis do cimento Portland e quando aplicada para revestimento alterações causadas por reações devido ao meio de exposição. Por último no uso de agregados para pavimentação se tem que a interação da rocha com os ligantes asfálticos tem ligação com as propriedades físico-químicas, dependentes da mineralogia.

Frascá (1998) criou um índice petrográfico para identificação de basaltos desagregáveis (K1), relacionando os minerais essenciais são (S1), os alterados (S2), esmectitas interligadas (S4) e microfissuras preenchidas por argilo minerais (S5). De forma que os últimos estejam ligados com feições influentes na alterabilidade dos basaltos, materiais pétreos que foram amplamente estudados em termos de alteração intempérica no Brasil (Equação 1).

Leyland (2015) avaliou diabásios de oito pedreiras diferentes, provenientes pequenas intrusões da Suite de Karoo na África do Sul. A variação petrológica das rochas do estudo mostrou que rochas com altas quantidades de minerais secundários, como produtos da alteração de piroxênios (esmectitas) e sericitas, apresentam desempenho ruim quando empregadas como agregados em pavimentos.

$$K1 = \frac{S1}{S2 + S4 + S5} \quad (1)$$

Onde: K1 são augistas, plagioclásios e opacos são; S2 é augita e labradorita alteradas; S4 é composta de emectitas interligadas; S5 são microfissuras preenchidas por esmectitas.

2.3.2. GRANULOMETRIA E FORMA DAS PARTÍCULAS

Segundo Petrinice (1990) uma das propriedades que tem grande importância para agregados graúdos é a distribuição granulométrica. A indústria de construção civil tem o devido cuidado para especificar as granulometrias ideais para cada aplicação.

No que se refere a influência da distribuição granulométrica de agregados para emprego em asfaltos, Mc Nally (1998) indica que esta propriedade é muito importante, pois tem implicações nas propriedades geomecânicas dos pavimentos. Três tipos de granulometrias são importantes:

- Bem graduada: é composta de um mix de tamanhos de agregados graúdos, miúdo e finos. É a graduação mais densa, é usada na base e concreto asfáltico;
- Graduação aberta: contem partículas grossas, mas não tem a presença de finos. É caracterizada pela resistência entre os agregados, por este fator nos casos de aplicação como base geralmente são mais utilizadas que a granulometria bem graduada;
- Graduação "pulada": tem tamanho intermediário, geralmente composta de areia grossa e fina (de 1 a 5 mm). É utilizada para redução da compactação, deixando uma proporção de vazios não preenchidos.

É ideal que as partículas sejam equidimensionais, angulosas, e não esféricas. No entanto sempre há a presença de fragmentos alongados, devendo-se obedecer na proporção limitada por especificações. No uso em asfaltos britas lamelares são depreendidas com maior facilidade dos ligantes (MC NALLY, 1998).

A forma dos fragmentos é referente a sua geometria tridimensional. Entretanto como agregados são partículas irregulares, ou seja, de difícil representação, torna-se adequado utilizar índices como: achatamento, alongamento e cubicidade. (FARIAS & PALMEIRA, 2007).

No caso da granulometria, esta propriedade é determinada através de peneiramentos e pesagens das britas, de modo a construir uma curva granulométrica. Para emprego em concretos de acordo com Sbrighi Neto (2011) o módulo de finura também é utilizado, sendo este definido pela soma dos percentuais retidos em massa na série normal de peneiras.

A NBR 7211 (ABNT, 2009) apresenta curvas granulométricas, correspondentes a zonas ótimas e utilizáveis, especificando os limites dos agregados para concretos convencionais (Tabela 2-1). Estas especificações são principalmente devido a trabalhabilidade e custos no concreto (SBRIGHI NETO, 2011).

Tabela 2-1: Limites da composição granulométrica do agregado graúdo (ABNT 7211, 2009).

Peneira com abertura de malha (NBR NM ISO 33110-1)	Porcentagem, em massa, retida e acumulada				
	Zona granulométrica d/D				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	-	-	-	-	0 – 5
63 mm	-	-	-	-	5 – 30
50 mm	-	-	-	0 – 5	75 – 100
37,5 mm	-	-	-	5 – 30	90 – 100
31,5 mm	-	-	0 – 5	75 – 100	95 – 100
25 mm	-	0 – 5	5 – 25b	87 – 100	-
19 mm	-	2 – 15b	65 – 95	95 – 100	-
12,5 mm	0 – 5	40b – 65b	92 – 100	-	-
9,5 mm	2 – 5b	80b – 100	95 – 100	-	-
6,3 mm	40b – 65b	92 – 100	-	-	-
4,75 mm	80b – 100	95 – 100	-	-	-
2,36 mm	95 – 100	-	-	-	-

Legenda: a) Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo; b) Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais.

Britas de rochas com estruturas estratificadas ou bandadas tendem a ser mais lamelares e alongadas. Rochas com estrutura maciça como basaltos densos apresentam em frequência maior fragmentos de forma cúbica (YOSHIDA; FRAZÃO; GIROLDO, 1972).

Segundo Alexander & Mindess (2005) a forma dos agregados tem maior influência na trabalhabilidade, e água requerida numa mistura de concreto, por conta do empacotamento e embricamento de partículas. Partículas arredondadas deslizam facilmente sobre si, enquanto partículas angulosas não.

2.3.3. ÍNDICES FÍSICOS

As propriedades conhecidas como índices físicos são: massas específicas, porosidade e absorção de água, sendo notável grandes correlações entre estas mesmas (FRAZÃO, 2002; FRAZÃO, 2007; PARAGUASSÚ et al, 2017).

De acordo com Vallejo (2004) dentre os índices físicos os mais importantes são o peso específico e porosidade, pois são os mais influentes nas propriedades mecânicas das rochas. Metha & Monteiro (2008) indicam que o peso específico, absorção de água, resistência, dureza, elasticidade e sanidade são características dependentes da porosidade. Quanto ao uso em concretos, Alexander & Mindess (2005) destacam a porosidade e absorção de água dos agregados são influentes na resistência, permeabilidade e durabilidade do material de construção em questão.

Estas propriedades segundo Frazão (2012) são essenciais para uma caracterização de rochas e na identificação dos graus de alteração, de modo a proporcionar devida seleção de materiais para uso como agregado.

O estudo desenvolvido por Goswami (1984) em sete rochas graníticas, com variação na granulação de fina a grossa, revelou que quanto maior a absorção de água, maiores são as perdas nos testes de sanidade a sulfatos e abrasão a Los Angeles. Já Karahman & Toraman (2008) realizaram investigação em onze diferentes rochas, ígneas e sedimentares, obtendo boas correlações entre índices físicos como porosidade e peso específico em comparação ao ensaio de abrasão Los Angeles e índice de britabilidade.

Os procedimentos laboratoriais para determinação destas propriedades são apresentados pela ISRM (1977) e na norma NBR 1585 (2015), a segunda utilizada para rochas ornamentais. Trata-se de um método simples e não destrutivo que utiliza de relações entre massas: seca, saturada e submersa em água.

2.3.4. PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas são essenciais na escolha de agregados satisfatórios para obras de engenharia. São realizadas por meio de ensaios laboratoriais em corpos de prova e amostras de britas, trazendo resultados notórios para a escolha e seleção de rochas.

2.3.4.1. RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO UNIAXIAL, DETERMINAÇÃO DE MÓDULO DE DEFORMABILIDADE E COEFICIENTE DE POISSON

A resistência a compressão uniaxial é avaliada em um ensaio que consiste em analisar a tensão a ruptura de rochas submetida a um esforço, com possibilidade de determinação também de módulo de deformação estático e coeficiente de Poisson. Para esse ensaio são utilizados os procedimentos da ISRM (1979). O exemplo de aparelho usado para determinação da compressão, módulos e coeficiente de Poisson é observado na Figura 2-8.

Figura 2-8: (A) Prensa servo-controlada utilizada em ensaios de rocha intacta, corpo prova (seta branca). (B) Corpo de prova instrumentado para determinação de módulos. (C e D) Sensores de determinação das deformações. Modificado de Paraguassú et al (2014).

Dos diversos parâmetros geotécnicos avaliados por Souza Junior (1992) para amostras de derrames de feições entablamento. Os testes de resistência a compressão simples dessa pesquisa são provenientes de pedreiras de Ribeirão Preto e de cortes de escavação da UHE Nova Ponte (MG). A grande variação nos resultados, de 30 MPa a 213 MPa com valor médio de 80 MPa, é devido a anisotropia geométrica do entablamento, juntas do tipo II geralmente inclinadas são responsáveis pelas rupturas nos casos de resistências baixas, inferiores a 100 MPa.

Marrano (1997) apresenta muitos aspectos tecnológicos de rochas basálticas da UHE Canoas I, localizada no rio Paranapanema. A respeito da dos parâmetros de resistência a compressão uniaxial, foram realizados 17 ensaios em amostras de testemunhos de sondagem. Os valores obtidos variaram muito, de 21 a 110 MPa, isso se deve aos materiais serem provenientes de regiões do maciço rochoso afetado por uma feição estrutural (caixa de falha com cerca de 10 m de espessura), com intenso fraturamento.

Já Karahman & Fener (2007) realizaram estudos com rochas magmáticas, sedimentares e metamórficas correlacionando valores de resistência a compressão uniaxial com valores de abrasão Los Angeles (Figura 2-9). No geral há uma tendência de que valores de RCU mais elevados tenham pares com resultados mais baixos de abrasão Los Angeles. Neste estudo também os litotipos foram avaliados de acordo com as classes de porosidade das rochas. As melhores correlações obtidas foram para porosidades muito baixas entre 0,18 e 0,38 %. (Figura 2-9B). Para porosidades mais altas (> 5 %) o valor do R^2 ajustado foi de 0,79, e no caso de porosidades entre 1 a 5 % o coeficiente de regressão linear 0,75. Isso se deve principalmente as diferentes

classes de rochas, visto que, propriedades índices também tem relação direta com os parâmetros petrográficos.

Figura 2-9 Correlações adaptadas de Karahman & Fenner (2007). (A) Resultados para todos os litotipos de estudo. (B) Resultados para rochas com porosidade entre 1 a 5 %; (C) resultados obtidos para rochas com porosidade compreendida entre 0,18 a 0,38 % (D) resultados para rochas com alta porosidade (> 5 %).

Durante a realização do ensaio é possível utilizar de extensômetros nos corpos de prova para leituras deformações radiais. Desta forma é possível se obter as constantes elásticas, através das curvas tensão deformação. O Módulo de Elasticidade é obtido pela equação 2, enquanto o coeficiente de Poisson pela equação 3.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_a} \quad (2)$$

Onde E é o módulo de Elasticidade (MPa); $\Delta\sigma$ é a variação de tensão (MPa); $\Delta\varepsilon_a$ é a variação da deformação axial (adimensional).

$$\nu = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_a} \quad (3)$$

Onde ν é o coeficiente de Poisson, teoricamente entre 0 e 0,5 (adimensional); ε_r é a deformação radial (adimensional); ε_a é deformação axial (adimensional).

2.3.4.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL

Diversos são os métodos de ensaio para realização dos ensaios que determinam a resistência a tração de rochas. Dentre eles o ensaio de compressão diametral ou *brazilian test*. Os procedimentos para realização do ensaio são descritos pela ISRM (1978).

Este ensaio permite a determinação indireta da resistência a tração (σ_t), através da determinação da tensão de compressão aplicada verticalmente no corpo de prova. Desta forma a tensão de tração horizontal desenvolvida é resultante do esforço vertical (HACK, 2009). A resistência a tração indireta é obtida no momento da ruptura por meio da equação:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi LD} \quad (4)$$

Onde σ_t é a resistência a tração (MPa); P é a força na ruptura (kN); L é a largura do corpo de prova (m); e D o diâmetro do corpo de prova (m).

Apesar de não ser usual a adoção deste método para a caracterização mecânica de rochas como agregados, Alexander & Mindess (2005) comenta que ensaios que caracterizem as propriedades de fraturamento de agregados podem ser convenientes. Tendo em vista que os modelos computacionais de concretos estes dados são relevantes.

Dentro de todos os resultados analisados por Capik & Yilmaz (2017), a resistência a tração de quarenta rochas ígneas, sedimentares e metamórficas em comparação com dados de desgaste Micro-Deval baixas correlações foram obtidas.

2.3.4.3. RESISTÊNCIA A ABRASÃO LOS ANGELES

De acordo com Prowell et. al (2005) esse ensaio foi desenvolvido no Laboratório Municipal da cidade de Los Angeles durante a década de 1920. Este método é realizado em um cilindro giratório, sendo introduzida a amostra no recipiente junto com uma carga abrasiva composta de esferas metálicas. Após o carregamento do recipiente o motor é acionado de modo que o tambor entre em revolução, até atingir o número estipulado pelas normas. Após a realização desses

procedimentos a amostra é peneirada pela peneira mais fina da graduação, e é calculada a perda de massa em porcentagem.

Segundo Rogers (1998) esse ensaio qualifica a resistência dos agregados à quebra, pois é quantificada a perda após a realização do ensaio em porcentagem, não sendo avaliado a forma dos agregados após o desgaste do ensaio. Os estudos laboratoriais de Benediktsson (2015) revelaram boas correlações entre índices de forma e resistência a abrasão Los Angeles para seis diferentes litologias.

As solicitações no procedimento laboratorial são de atrito com as paredes do equipamento, esferas de aço e entre os fragmentos rochosos. Também é promovido impacto pela queda das esferas e fragmentos sobre a massa total da amostra. Normalmente é realizado em amostras no estado fresco, mas também pode ser realizado em condições saturadas, desta forma obtendo valores mais elevados de perda, representando uma resistência menor (FRAZÃO, 2002; FRAZÃO 2007).

Os resultados deste teste são utilizados para aplicações de britas em concreto, lastro, pavimentos e até mesmo enrocamentos. Entretanto Nalsund (2014) ensaio diversas rochas (gnaiesses, gabros, milonitos, calcários, granitos e etc) e encontrou baixas correlações deste método com o uso de agregados para lastro ferroviário, mesmo que o teste categorize bem as propriedades mecânicas de uma rocha.

A NM 51 (ABNT, 2000) é utilizada em território nacional para a determinação do ensaio em questão. A Tabela 1 contém as informações sobre as graduações que podem ser ensaiadas, bem como a quantidade de carga e número de rotações estão organizadas nas Tabelas 2-2 e 2-3.

Tabela 2-2: Tabela com as frações e quantidade de amostras do ensaio abrasão Los Angeles (NM 51, 2000).

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
E	76,2	63,5	2500 ± 50	10000 ± 200
	63,5	50,8	2500 ± 50	
	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 2-3: Informações sobre a carga abrasiva e número de rotações para cada fração (NM 51, 2000)

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

2.3.4.4. DESGASTE MICRO-DEVAL

Com normatização desenvolvida na década de 1960 na França, o ensaio de desgaste a micro-deval (a úmido) é simples e rápido, utilizando-se de um aparato de menor tamanho comparado a outros métodos (LIU *et al.*, 2012).

O micro-deval é um ensaio laboratorial de melhor precisão em comparação aos outros métodos de avaliação mecânica dos agregados. O contato com a água representa com maior precisão as condições reais de campo, se comparado ao ensaio de abrasão Los Angeles em condição seca (ROGERS, 1998).

Assim como realizado no ensaio de abrasão Los Angeles, os agregados são submetidos nesse ensaio ao choque em rotação dentro do tambor em rotação com uma carga abrasiva composta de esferas de aço, a Figura 2-9 mostra o aparato utilizado.

O método ensaio M-51 proposto pelo IPT "Resistência ao Desgaste Deval" segundo Ruiz (1962) utilizava 5 Kgs de um britas com dimensão entre 1" e 1,5",

submetidas a rotação em um cilindro. A velocidade de rotação usada era de 30 a 33 por minutos, totalizando 10000 revoluções do cilindro, não há emprego de água no ensaio nem esferas. Os valores finais são quantificados em porcentagem em relação aos pesos iniciais e finais, após o material ser lavado em água corrente na peneira de 2,36 mm e secado em estufa.

Em nível de pesquisa, no Brasil existem dois equipamentos em operação, sendo o mais conhecido o do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Norte Fluminense (UNF), Figura 2-10. Nesse aparato foram realizadas pesquisas com normatização europeia (EN 1097 – 1), avaliando a durabilidade de rochas por Costa (2015) que estudou rochas amostradas em maciços de Usinas Hidrelétricas via desgaste Micro-Deval. Recentemente, Remédio (2017) determinou em nível experimental a perda por Micro-Deval para nove litologias em comparação a outros ensaios mecânicos de aplicação para lastro Ferroviário. O método de ensaio europeu prevê a utilização de 500 gramas de amostra com graduação entre 14 mm (máxima) e 10mm (mínimo), nos anexos da norma são comentados ensaios realizados para lastro, onde o aparelho de testes tem um cilindro maior e diferentes faixas granulométricas são analisadas, tendo em vista a granulométrica utilizada nesta aplicação.

Pesquisas acadêmicas envolvendo aplicações de desgaste Micro-Deval também têm sido realizadas no Departamento de Engenharia de Transportes (DET) da Universidade Federal do Ceará, que possui um equipamento em funcionamento. Diógenes (2018), por exemplo, desenvolveu um estudo avaliando a influência de diferentes processos de britagem de rochas em relação a forma e textura do agregado, sendo que um dos testes empregados foi o Micro-Deval, com base na norma ASTM D6928 (ASTM, 2017), fazendo-se uso de algumas adaptações metodológicas para analisar o estado final de degradação de agregados.

A normatização americana em vigor tem diretrizes e limites para agregados graúdos e miúdos, ver alíquotas das amostras exigidas na Tabela 2-5. Sendo que essas normas impõem limites para diversos usos de britas em materiais com ligantes principalmente (Tabela 2-4).

Figura -2-10: Equipamento de desgaste Micro-Deval da UENF. Modificado de Da Costa (2016).

Diferentes resultados foram notados para as normas americanas e europeias em ensaios de desgaste úmido (Micro-Deval) de agregados por Gökalp & Emre (2016). Segundo os autores nos métodos de ensaios produzem resultados diferentes, principalmente devido a graduação utilizada, mas também se diferentes materiais forem ensaiados. Em termos de resultados a fração granulométrica sugerida pela EN 1097 – 1 é a que mais se assemelha às perdas nos ensaios de agregados menores de 19 mm pela normalização americana.

Török (2015) investigou por ensaios de Micro-Deval e abrasão Los Angeles seguindo normas europeias, basaltos e andesitos da Hungria. Foram usadas frações de 10 a 14 mm para ambos ensaios, a relação existente entre os ensaios de MD e LA para os andesitos provenientes de diversas pedreiras uma boa correlação foi encontrada. Entretanto para andesitos de Komló de alta qualidade os resultados comparados não obtiveram mesma simultaneidade (Figura 2-11A). Já nos basaltos a correlação foi considerada como moderada (Figura 2-11B).

Figura 2-11: A) Correlação entre LA e MD para os andesitos de diversas pedreiras (em azul) e de alta qualidade (Komló) (em vermelho). B) Correlação entre os ensaios de LA e MD para o basalto de Uzsá. Modificado de Török (2015)

Tabela 2-4: Limites aceitáveis de perda no ensaio de Micro-Deval pelas normas americanas.

Aplicação	Agregados Graúdos: Perda no Micro-Deval (%) (ASTM D6928– 17)
Sub-base	30 ¹
Base	25 ¹
Base graduada	17 ¹
Concreto Estrutural	17 ¹ , 21 ²
Pavimento de Concreto	13 ¹
Concreto asfáltico base	21 ¹
Concreto asfáltico superficial	17 ¹ , 18 ³
Concreto asfáltico superficial "premium"	-
Concreto asfáltico (com todos níveis de tráfego)	-
¹ ROGERS (1998); ² LANG <i>et al.</i> (2007); ³ KANDHAL & PARKER (1997); ⁴ ROGERS <i>et al.</i> (2003); ⁵ WHITE <i>et al.</i> (2006); ⁶ Interlocking Concrete Pavement Institute (2007)	

Yilmaz (2016) desenvolveu um estudo detalhado das propriedades de agregados basálticos da Turquia comparando com britas de calcário, envolvendo diversos ensaios mecânicos principalmente, seguindo as recomendações de normas EN. Os resultados para as rochas ígneas indicaram melhor abrasividade, durabilidade em contrapartida a absorção de água foi parcialmente menor para o calcário. A fração granulométrica contém matérias passantes na peneira de 19mm e retidos (94%) na peneira de 0,425 mm. A perda pelo equipamento Micro-Deval foi de 8% para o basalto para o calcário chegou a 15%.

Tabela 2-5: Frações granulométricas para ensaio de desgaste a Micro-Deval para agregados graúdos.

Frações Granulométricas Agregado Graúdo (ASTM D6928– 17)		
Passante (mm)	Retido (mm)	Massa (g)
Amostra recomendada		
19,00	16,00	375
16,00	12,50	375
12,50	9,5	750
Agregados menores que 12,5 mm		
12,50	9,50	750
9,50	6,30	375
6,30	4,75	375
Agregados menores que 9,5 mm		
9,50	6,30	750
6,30	4,75	750

2.3.4.5. RESISTÊNCIA AO ESMAGAMENTO DE AGREGADOS

A amostra de agregados utilizada nesse ensaio é levada a um cilindro de aço e previamente compactada, o esforço atuante de compressão é feito por um êmbolo até alcançar uma determinada carga, com uma taxa de carregamento

baixa pré-definida. Após a realização desse procedimento é realizado a pesagem do material e obtida a perda em porcentagem no ensaio (FRAZÃO, 2002; FRAZÃO 2007).

A normatização nacional vigente desse ensaio é regida pela NBR 9938 (ABNT, 2013), a fração granulométrica utilizada tem diâmetro de 12,7 a 9,5mm, para a realização dos procedimentos, o cilindro metálico pode ser acoplado na prensa servo controlada utilizada no ensaio de resistência à compressão uniaxial, Figura 2-12). São utilizados 10 Kgs de amostra na faixa granulométrica especificada. O carregamento deve atingir uma carga de 40 toneladas. O resultado é expresso em porcentagem de perda de massa de material passante na peneira com abertura de malha de 2,4mm, após o carregamento final.

Figura 2-12: A) Especificações do dispositivo. B) Representação do carregamento realizado para determinação da resistência dos agregados. Modificado de Frazão e Paraguassú (1998).

Frazão (2002) comenta que certos tipos de agregados de rochas que se fragmentam com mais facilidade ao longo da faixa inicial do cilindro de aço, o que provoca maior compacidade no topo da amostra, desta forma o esforço do ensaio é dissipado aumentando a fragmentação. Isso resulta que agregados com esta peculiaridade frente ao teste de esmagamento, devem apresentar uma porcentagem de material desagregado. Existem fórmulas para correções dessa variante, nas quais se determinam a carga capaz de produzir 10% de material desagregado (método dos 10% de finos).

No Reino Unido e África do Sul somente é utilizado do método dos 10% dos finos seguindo as devidas precauções e normas, devido os mesmos motivos já citados. (ALEXANDER & MINDESS, 2005).

Dos diversos estudos tecnológicos realizados por Gomes (2001), a resistência ao esmagamento entre as nove litologias analisadas o basalto vesículo-amigdaloidal apresentou valor médio de 20%, frente as demais rochas ensaiadas de valores médios inferiores a 16%. Portanto comparativamente esta rocha apresenta um resultado inferior e, portanto, tem um comportamento mecânico inferior.

2.3.4.6. RESISTÊNCIA AO IMPACTO TRETON

O ensaio de resistência ao impacto Treton é regido por normas nacionais de agregados para lastro e pelo DNER, respectivamente a NBR 5564 (ABNT, 2014) e DNER-ME 399 (DNER, 1999), ambos procedimentos seguindo as mesmas recomendações. Os fragmentos de agregados a serem ensaiados devem ser cúbicos e de granulometria entre 19 mm e 16 mm e são colocados em um cilíndrico metálico oco, onde é imposta a solicitação de impacto por um soquete de 16 Kgs com altura de queda de 39,37 cm (Figura 2-13). Após a execução de 10 quedas do soquete a amostra utiliza-se da peneira de abertura 1,7 mm e o material retido é pesado. O resultado do ensaio é expresso em porcentagem, sendo a diferença entre a massa inicial pela final dividida pela massa inicial.

Figura 2-13: Aparelho Treton (DNER, 1999).

Este ensaio de resistência ao impacto para agregados empregados em concretos hidráulicos é importante em situações onde superfícies de concreto expõem os agregados a solicitações de impacto (ALEXANDER & MINDESS, 2005).

Senior & Rogers (1991) avaliaram agregados da província de Ontário no Canadá, de acordo com a exigência do órgão de transporte estadual responsável. A correlação encontrada para os ensaios de resistência ao impacto e abrasão Los Angeles, Figura 2-14, para mesmos agregados. Segundo os autores comprova uma vantagem desse ensaio, pois o equipamento é portátil, possibilitando uso em campo, e ainda podem ser testadas amostras saturadas.

Dentre as oito rochas basálticas avaliadas por Ruiz (1962) duas obtiveram índices maiores de 20 % de perda de massa neste ensaio, sendo estes materiais constituídos de uma rocha basáltica amigdaloidal com arenito e outra um basalto acidificado possivelmente pelas rochas encaixantes. Valores acima de 20 % são considerados relativamente altos para este ensaio.

Figura 2-14: Correlação entre ensaios de abrasão a Los Angeles e resistência treton para agregados graúdos de Ontário. Modificado de Senior & Rogers (1991)

2.3.5. REAÇÕES NA PRESENÇA DE LIGANTES

Como já explicitado estes métodos de caracterização de agregados têm como foco aplicações ao meio de ligantes. Desta forma as técnicas, bem como conceitos foram desenvolvidos e aprimorados ao longo do tempo, compondo ensaios com resultados avaliativos de rochas para referida finalidade.

2.3.5.1. REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

A reação álcali-agregado é uma reação lenta que ocorre entre os álcalis ativos do cimento e alguns espécimes minerais presente em agregados, que em condições especiais provocam a deterioração do concreto, por meio de fissuras, deslocamentos e uma exsudação de um gel que nem sempre é presente (KIHARA, 1986).

Segundo Metha & Monteiro (2008) a reação álcali-agregado é uma das reações com a formação produtos expansivos, dentre as outras a formação de etringita tardia, pode ser causada também por minerais do agregado utilizado, a contaminação por gipsita pode provocar esse outro tipo de reação expansiva

Segundo Kihara (1986) são três os tipos de manifestações provocadas pela reação álcali-agregado:

1. Reação álcali-sílica (RAS): ocorre entre a sílica amorfa ou certos tipos de vidros naturais (vulcânicos) e artificiais e os íons hidroxilas provenientes da dissolução dos hidróxidos alcalinos.
2. Reação álcali-silicato (RAS): semelhante à anterior é mais lenta, envolve outros silicatos, tais como: feldspatos, quartzo fundamentalmente deformado e minerais expansivos, presentes em folhelhos ou outras rochas sedimentares e magmáticas.
3. Reação álcali-carbonato (RAC): ocorre entre certos calcários dolomíticos e as soluções alcalinas nos poros do concreto.

A recente norma atualizada NBR 15577-1 (ABNT, 2018) propõe a um roteiro para identificação e mitigação de RAA em concretos. Há especificação para coleta, amostragens e periodicidade de testes laboratoriais, sendo os primeiros de natureza mineralógica. Também são determinados de ensaios dos materiais pétreos em argamassas e concretos para verificação de potencial a reatividade de rochas. Cabe ressaltar que estes procedimentos foram recentemente atualizados, porém ainda empregam certos métodos já consagrados com maior detalhamento de informações.

Quanto a amostragem de materiais a NBR 1577-2 (ABNT, 2018) exige que seja realizada por profissional que tenha conhecimento ou formação técnica para identificação geológica de rochas, aspectos texturais, estruturais e mineralógicos dos litotipos. Neste caso quando avaliada a jazida, a caracterização deve ser feita por

amostras diferenciadas, que tem irregularidades na distribuição e composição mineralógica diferenciada. Também pode ocorrer em amostras indiferenciadas, estas que possuem distribuição regular e geram agregados homogêneos e indiferenciados.

A descrição petrográfica para detecção do potencial reativo nas rochas é feita com os as observações da NBR 15577 (ABNT, 2018) parte 03. Há indicações para descrições de minerais e texturas petrográficas com potencial a reações álcalis. O detalhamento quanto ao procedimento e uma classificação com limites em porcentagem para minerais reativos nos agregados, está organizado na Tabela 2-6. Também são indicados métodos de caracterização complementares como microscopia eletrônica de varredura, difração de raio-x de acordo com a necessidade.

Tabela 2-6: Limites aceitáveis para minerais reativos (ABNT NBR 15577, 2018)

Mineral	Limites aceitáveis máximos (%)
Quartzo deformado ou microgranular (menor que 0,15 mm)	5
Calcedônia	3
Tridimita ou cristobalita	1
Vidro Vulcânico	3
Opala	0,5

O método utilizado com barras de argamassa, NBR 15577-4 (ABNT, 2018), ou método acelerado, realiza-se com a imersão do molde de argamassa em solução de NaOH 1N numa temperatura de 80°C, para avaliar a expansão dos moldes. A classificação do grau de reatividade nos resultados dos ensaios utilizando do método acelerado é apresentada na Tabela 2-7 e o grau de risco de ocorrência de RAA na Tabela 2-8.

Tabela 2-7: Classificação do grau de reatividade do agregado adaptado da NBR 15577-1 (ABNT, 2018).

Classificação da reatividade potencial do agregado	Expansão das barras de argamassa aos 30 dias %
Potencialmente inócuo grau R0	Menor que 0,19
Potencialmente reativo grau R1	Entre 0,19 e 0,40
Potencialmente reativo grau R2	Entre 0,41 e 0,60
Potencialmente reativo grau R3	Maior que 0,60

^a Valores com base na experiência brasileira

Tabela 2-8: Grau de risco de ocorrência de RAA adaptado da NBR 15577-1 (ABNT, 2018).

Dimensões e condições de exposição dos elementos estruturais de concreto	Classe de reatividade do agregado			
	R0	R1	R2	R3
Não maciço em ambiente seco ^a	DES	DES	MÍN	MOD
Maciço ^b em ambiente seco	DES	MÍN	MOD	ALT
Todas as estruturas geralmente externas, expostas à umidade do ar, enterradas e imersas	DES	MOD	ALT	M ALT
Todas as estruturas em contato com álcalis ^c em condições de serviço	DES	ALT	M ALT	M ALT

^a Ambiente seco com umidade relativa do ar menor que 60% (interiores de edificações)

^b Elemento maciço, com dimensão de seção transversal maior ou igual a 1 metro

^c Estruturas expostas a álcalis em serviço, em contato com água do mar, solos contaminados, lençõs freáticos contendo sais alcalinos dentre outros.

Legenda: DES – desprezível, MÍN – mínimo, MOD – moderado, ALT – alto, M ALT – muito alto.

Outras avaliações se utilizam de prismas de concretos, também diagnosticando expansão nesses materiais. Sendo realizadas pelos métodos de prismas de concreto durante um ano norma: NBR 15571-6 (ABNT, 2018) e o mais novo ensaio de prismas de concreto pelo método acelerado norma: NBR 15577-7 (ABNT, 2018). Ambas técnicas são utilizadas em complementação ao método de barra de argamassas.

Quanto a reatividade em rochas básicas, segundo Quitete et al. (2013) algumas pedreiras consideram os produtos beneficiados como basaltos, porém devidamente caracterizadas essas rochas são diabásios. Essa diferença quanto a reação álcali-agregado é importante, pois estas litologias tendem a ter menos conteúdos de sílica amorfa na forma de vidro. Estudos realizados pelos autores em seis amostras, provenientes de cinco pedreiras seguindo as normas brasileiras NBR 15577-3 e 4 (2008), acusaram reatividade potencial em três pedreiras.

Korkanç & Tugrul (2005) desenvolveram um estudo experimental em rochas basálticas da Turquia, avaliando a potencialidade a reações do tipo RAS. Foram desenvolvidos estudos petrográficos e por método acelerado em barras (ASTM C-1260). A petrografia microscópica indicou que os basaltos são: basaltos, olivina basaltos e andesitos. A reatividade é reflexo de sílica amorfa (vidro vulcânico), minerais de alteração e conteúdo de sílica maior de 50%. Por análises de SEM-EDS nas barras ensaiadas foi possível identificar a ocorrência do gel nas zonas de transição agregado e pasta (Figura 2-14).

Figura 2-15: Fotomicrografia (SEM-EDS) expansão e fissuras amostra MV6 (KORKANÇ & TUGRUL, 2005)

Tiecher *et al* (2007) investigaram rochas do Rio Grande do Sul empregadas como agregado com diferentes tipos de cimento, dessas rochas 14 basaltos pesquisados foram tidos como reativos, devido presença de vidro vulcânico. Conferiu-se tal comportamento pelo método da ASTM C-1260, utilizando-se de cimento CP V-RS.

2.3.5.2. ADESIVIDADE AO LIGANTE ASFÁLTICO

O princípio decisivo para o surgimento da adesão entre os materiais de pavimentação é sua "atração", resultante das cargas eletrostáticas superficiais. A tensão superficial entre os materiais é resultante do das cargas elétricas entre o asfalto e o agregado (FURLAN, 2006).

Os fatores que influenciam a adesividade de misturas betumínicas são de caráter físico-químico. No entanto, é o tipo de rocha que provoca variações no grau de adesividade, pois a composição mineralógica é que determina as propriedades de carga dos agregados quando coberto por betume (FRAZÃO, 2002; FRAZÃO, 2007).

A perda de adesividade pode acontecer por diversas variáveis, dentre elas: tipo e emprego da mistura, características do asfalto, propriedades dos agregados, tráfego, uso de aditivos, método construtivo e fatores ambientais climáticos. Entretanto Roberts *et al.* (1991) reconhecem que os agregados são principais agentes nesse efeito. Quanto as propriedades das rochas mais importantes nesse caso são as de composição química e mineralógica do agregado.

Tendo em vista a relevância da mineralogia e composição química das rochas, o teor de sílica contribui diretamente nos aspectos de aderência do agregado mineral e cimento asfáltico. Geralmente agregados de baixos teores em sílica são mais adequados a desenvolverem boa adesividade com o asfalto. Entretanto rochas com maiores quantidades de sílica não desenvolvem boas ligações adesivas com o betume, "preferindo" a água (FURLAN, 2006).

Segundo Frazão (2002, 2007) as rochas com altos teores de sílica (>65%) como granitos, quando britados ou fraturados, há a quebra de tetraedros de sílica criando cargas elétricas negativas nas superfícies dos agregados. Já em rochas básicas as quebras geram cargas de sinais positivos. E os ligantes asfálticos em geral têm polaridade negativas e por esta causa quando combinados com agregados de rochas ácidas não há boa adesão.

Os materiais pulverulentos provenientes dos processos de britagem exercem influência na adesão, pois dificultam que o betume englobe os fragmentos de rocha, sendo que os pós gerados de áreas alteradas de rocha poderão ter problemas físico-químicos dependendo da quantidade de sílica (FRAZÃO, 2002; FRAZÃO, 2007).

Os procedimentos de ensaio são especificados pelas normas NBR 12583 (ABNT, 2017) para agregados graúdos e NBR 12584 (ABNT, 2017) para agregados miúdos. Os métodos de avaliação para ambos os casos avaliam o deslocamento dos agregados em imersão a betumes específicos de uso na construção civil brasileira.

Piccolo & Adissy (1970) avaliaram a adesividade de diversas rochas, dentre elas um basalto e dois diabásios do interior paulista. Dois métodos investigativos foram executados, o primeiro DPT M 78-63 e o segundo DPT M 79-63 ambos do DNER. Segundo os autores o basalto apresentou-se não satisfatório nos dois ensaios e apresentava teores médios de sílica.

O reconhecimento da importância propriedade nos agregados pode ser exemplificado com os estudos de Slobdoan, Imre e Dragan (1984), onde foram avaliados andesitos e dacitos em diferentes estados de alteração, de diferentes jazidas provenientes da Iugoslávia. Ensaio foram desenvolvidos em amostras com diferentes graus de hidrotermalismo, processos como sericitização, carbonatação, alunização, piritização dentre outros, foram descritos para diversas amostras

ensaiadas. A aderência dos dacitos em comparação aos andesitos foi melhor, devido possuírem menos quartzo e mais óxidos alcalinos e metais pesados.

2.3.6. ALTERAÇÃO E ALTERABILIDADE

Os maciços rochosos naturalmente são atacados por processos intempéricos, desta forma podem apresentar peculiaridades quanto aos níveis de alterações, levando em conta a presença ou não de descontinuidades, bem como a cota topográfica e exposição a superfície. Portanto torna-se importante o estudo dos processos superficiais e resultados destes nas rochas. De modo a quantificar o nível de alteração inicial e a taxa de alteração ao longo do tempo. Visto que, em diversas aplicações de rochas como agregado na construção civil, a exposição aos processos superficiais de alteração pode ser mínima ou até mesmo constante ao longo de toda vida útil da obra.

Os processos fundamentais de intemperismo envolvem a ação da atmosfera, biosfera e hidrosfera, esses sistemas da Terra são agentes físico-químicos que exercem influência na litosfera (CARROL, 1970). As reações químicas produzidas por essa interação podem ser observadas na Figura 2-15.

Figura 2-16: Interação entre os sistemas terra. Modificado de Carrol (1970).

Segundo Frazão (2002) os mecanismos de alteração nas rochas se manifestam por desagregação e decomposição, ambas influenciadas pelo intemperismo. A desagregação é física, leva a separação dos minerais provocando perda da coesão da matriz rochosa, sem modificações nos constituintes minerais. Já a decomposição é um mecanismo físico-químico, dependente principalmente das condições ambientais climáticas.

Os constituintes minerais das rochas têm diferentes tendências de sofrerem alteração, dependendo de sua composição química e cristalográfica. Nessa perspectiva, os estudos de estabilidade química de minerais realizados por Goldich (1938) permitiram o estabelecimento uma relação com a série de cristalização de

magmas de Bowen (Figura 2-16). Seguindo a ordem de cristalização, as primeiras fases são mais susceptíveis ao intemperismo.

A respeito dos diferentes tipos de rocha, comparando rochas graníticas e basálticas em geral, as pertencentes ao segundo grupo se alteram com mais facilidade em circunstâncias de exposição a climas quentes e úmidos. Sendo isto efeito dos basaltos apresentarem composição mineral principalmente por plagioclásios e piroxênios, menos estáveis se comparados a mineralogia de granitos (quartzo, k-feldspatos e biotitas), se guardando de condições iguais ambientais (FRAZÃO, 1983).

Melfi (1968) estudou a ação do intemperismo em maciços de granitos e diabásios em Campinas e proximidades. A respeito das rochas básicas investigadas, tem-se que a ocorrência é em um *sill* intrusivo em sedimentos da Bacia do Paraná, possuem composição: plagioclásio e piroxênios, havendo acessórios como óxidos, e apatita. As análises químicas nos materiais eluvionares juntamente com a petrografia microscópica comprovaram a série descontínua de Goldich (1938).

Referente aos fatores influentes nos processos de alteração das rochas, podem ser divididos em intrínsecos e extrínsecos, os primeiros são referentes as características naturais dos materiais pétreos como: composição mineralógica, incluindo claro as características químicas; grau de microfissuramento, influenciando nos índices físicos e permeabilidade. Já os fatores extrínsecos têm ligação aos agentes de intemperismo do meio que a rocha tem ocorrência ou é aplicada (Aires Barros, 1969).

Figura 2-17: Série de bowen em relação a estabilidade mineral Goldich (1938). Adaptado de Carrol (1970).

Propriedades das rochas de engenharia se tornam variáveis de acordo com a alteração que estas sofrem por intemperismo, de modo geral, é natural que ocorram quedas nos valores de resistência. No entanto, é possível que ocorram acréscimos de resistência, por exemplo quando há laterização, fazendo com que minerais máficos liberem óxidos e hidróxidos de ferro, gerando cimento entre os minerais o que aumenta resistências mecânica das rochas (FARJALLAT, 1971). Os efeitos da alteração nos materiais rochosos segundo Farjallat *et. al* (1972) podem causar quatro efeitos nas rochas, diminuição de resistência havendo produção de finos ou não, variação nas características de deformação e deformabilidade, variações de índices físicos e diminuição de adesividade em ligantes betuminosos ou reações com cimento Portland.

Desta forma torna-se necessário o reconhecimento de minerais com baixa estabilidade, para avaliação de possíveis alterações ao longo do uso de agregados na construção civil, principalmente nos usos onde não há ligantes. Com base nestes conhecimentos McNally (1998) propõe que os maciços a serem explorados, devem ser inspecionados inicialmente em escalas de menor detalhe e posteriormente de maior detalhe. O estado de alteração, ou seja, o perfil de alteração em um maciço em relação a qualidade dos agregados deve ser levando em conta, como mostra a Figura 2-17.

Figura 2-18. Perfil proposto para exploração de maciços rochosos com base nas alterações intempéricas, adaptado de Mc Nally (1998).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Como já exposto, a vertente principal da presente é mais bem conhecer as relações entre propriedades físicas, mecânicas, químico-mineralógicas e texturais de diferentes rochas que constituem o maciço da intrusão de Limeira, em um contexto geotécnico do desempenho dos materiais de construção em obras de engenharia, sendo realizada por meio de trabalhos de campo envolvendo um reconhecimento geológico expedito da cava da pedreira e coleta sistemática de amostras representativas para ensaios de laboratório.

As partes teóricas e laboratoriais foram desenvolvidas no Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos. Contou-se ainda com a infraestrutura disponível nos laboratórios dos Departamentos de Engenharia de Transporte e de Estruturas, além 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 indústria produtora de brita localizada em Limeira que permitiu visitas à pedreira e facilidades logísticas para disponibilidade do material pétreo necessários à realização desta pesquisa.

3.1. COMPILAÇÃO DE DADOS E INFORMAÇÕES GEOLÓGICAS

Envolveu a consulta de publicações, de dissertações e de outros trabalhos de cunho geológico, além de relatórios técnicos incluindo resultados prévios de ensaios tecnológicos de interesse que, conjuntamente, subsidiaram o melhor conhecimento do arcabouço geológico de um maciço rochoso composto por magmatitos da Intrusão de Limeira exposto na cava de uma pedreira situada nas proximidades do núcleo urbano da cidade homônima, às margens da rodovia Anhanguera (SP-330).

De modo geral, tais informações serviram de base para a definição das rochas e de cada domínio geológico, visando o estabelecimento de estudos comparativos entre as principais unidades litológicas por meio da seleção de locais e coletas de amostras em exposições representativas das bancadas. Quanto à geologia local, as rochas encaixantes são arenitos e siltitos do Subgrupo Itararé, sendo observado notável variação textural gradando desde basaltos tipicamente afaníticos na borda

e/ou contato com os sedimentos paleozóicos até termos faneríticos de granulação grossa e composição monzodiorítica nos níveis mais internos da intrusão.

Informações verbais de encarregados e técnicos da empresa relacionam alguns problemas operacionais e/ou tecnológicos que são decorrentes desta variedade geológica e respectiva produção de britas por meio da cominuição de rochas com características texturais e mineralógicas distintas. Dois aspectos são destacados: a utilização de agregado em escala industrial em usina de asfalto, ajustada para um determinado tipo de brita que não necessariamente representa o material desmontado na pedreira e provável presença de minerais deletérios nas rochas de granulação mais fina, com problemas por vezes detectados de reatividade álcali-agregado na elaboração de concretos hidráulicos. A Figura 3-1 apresenta o fluxograma das etapas da pesquisa.

3.2. ATIVIDADES DE CAMPO E AMOSTRAGEM

Com o objetivo de um reconhecimento geológico expedito para melhor entender a distribuição espacial das principais unidades geológicas e proceder a coleta representativa de amostras referência para os ensaios laboratoriais, foram realizadas ao todo 3 etapas de campo, com duração de 2 a 3 dias cada.

De forma simplificada, os dados obtidos em campo convergem ao previamente explanado no item 2.1.2, sendo verificada uma notável variação composicional que se expressa lateral e verticalmente em três tipos principais de litologias que afloram na cava da pedreira: basaltos maciços, diabásios finos (e monzodioritos de granulação variando de fina a grossa).

De igual importância aos levantamentos geológicos efetuados em campo, informações verbais dos técnicos e encarregados sinalizam uma tendência cada vez mais frequente e comum por parte dos principais clientes e consumidores (notadamente concessionárias de rodovias) do agregado produzido na pedreira em cobrar maior qualidade e garantia de grandes volumes de brita com homogeneidade mais significativa. Trata-se de informação relevante que, em função das atividades de desmonte e da planta de britagem em geral ainda não beneficiarem as diferentes litologias em separado, reforça a necessidade de se proceder uma amostragem geológica de modo a bem representar em campo a distribuição destes diferentes tipos de materiais pétreos.

Com base nestas premissas, procedeu-se então uma campanha de reconhecimento de campo e coleta de amostras cuidadosamente delineada para

bem representar a distribuição das litologias ao longo de todas as exposições rochosas das bancadas na pedreira estudada na cidade de Limeira, Figura 3-3, levando-se em consideração tanto à acessibilidade a cada local de coleta sistemática bem como as condições efetivas de transporte (manual) até as praças principais de deslocamento interno na cava da pedreira.

Conforme ilustrado esquematicamente nas Figuras 3-2, para cada unidade geológica foram priorizados coletar dois tipos de amostras, de modo a garantir a quantidade de material necessária à realização dos ensaios tecnológicos de laboratório: a) Dois a três blocos de aproximadamente 30 cm de aresta, para extração de corpos de prova para ensaios em rocha intacta; b) 300 a 400 kg de blocos/fragmentos irregulares de rocha, para posterior obtenção da "brita geológica" em laboratório, compondo corpos de prova para ensaios físico-mecânicos, de alteração laboratorial e na presença de ligantes. Devidamente acondicionadas em sacos plásticos adequados, as amostras foram então transportadas para o Departamento de Geotecnia da EESC/USP, local onde elas ficaram dispostas de forma organizada (Figura 3.2D).

Figura 3-1: (A) Bancada expõe basalto maciço próximo ao contato com as encaixantes. Coleta de blocos e fragmentos irregulares; (B) Detalhe de bloco rochoso amostrado para extração de CPs cilíndricos para ensaios de rocha intacta; (C e D) Acondicionamento de fragmentos irregulares amostrados em campo para posterior britagem em laboratório.

Figura 3-2: Fluxograma de estudos desenvolvidos na pesquisa, desde atividades de revisão bibliográfica, e de campo, ensaios laboratoriais e avaliação integrada das informações geradas.

Figura 3-3: Mapa de localização dos pontos de reconhecimento geológico e amostragem na pedreira estudada destacada no mapa em amarelo.

3.3. PREPARAÇÃO DA BRITA LABORATORIAL

Visto que no ciclo operacional da pedreira estudada o desmonte e a produção de brita são realizados de forma contínua e homogênea, não houve as condições adequadas para se amostrar os diferentes tipos de rochas diretamente nas pilhas pulmão de agregado das principais granulometrias produzidas em escala industrial, britas 4,3,2 e 1.

Assim sendo, as "britas geológicas" foram produzidas artificialmente em laboratório. Em alguns casos tomou-se o cuidado de se reduzir parcialmente os fragmentos irregulares de rocha (Figura 3-4) para otimizar a alimentação no britador de laboratório.

Figura 3-4: Aspecto dos fragmentos e blocos irregulares do monzodiorito; inspeção do material destinado à britagem em laboratório.

Quanto aos processos de cominuição dos fragmentos das quatro rochas amostradas, para compor as amostras de britas necessárias para os ensaios físicos, mecânicos, químicos e de alterabilidade previstos para agregados graúdos e miúdos, utilizou-se na presente pesquisa um mini britador de mandíbulas marca Briterpa com abertura 100 x 200 mm de abertura, estando as condições de britagem ajustadas em 25mm. Ou seja, a faixa granulométrica do agregado produzido em laboratório abrange o intervalo de 25mm ao pó de pedra, adequando-se a partir disto todas as faixas granulométricas de agregados graúdo e miúdo previstas nos ensaios tecnológicos realizados na pesquisa (Figuras 3-5).

Após a britagem, todo o material foi peneirado mecanicamente por meio de um agitador de peneiras marca Produtest, passando por um grupo de peneiras metálicas com dimensões 500 x 500 mm e as aberturas 19,1 mm, 15,9 mm, 12,7 mm, 9,5 mm, 8 mm, 6,35 mm e 4,75 mm para agregado graúdo. Por questões operacionais, foi realizado inicialmente o peneiramento do agregado graúdo, em etapas de

aproximadamente 15 kg de amostras e 15 minutos de agitação, seguindo-se então o acondicionamento de todo o material passante na peneira 4,75mm (agregado miúdo e finos).

Figura 3-5: (A) Vista geral do mini britador utilizado na pesquisa; (B) Detalhe das mandíbulas; abertura ajustada para produzir britas com diâmetro máximo de 25 mm; (C) equipamento em funcionamento e (D) Material britado armazenado previamente em caixas plásticas.

Depois de peneiradas, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos com a identificação da respectiva faixa granulométrica e então pesadas em balança com capacidade de 150 kg e precisão de 50 g disponível no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC/USP. Alguns dos procedimentos e/ou produtos obtidos encontram-se ilustrados na Figura 3-6.

Figura 3-6 (A) Vista geral de agitador mecânico para peneiramento e separação de diferentes faixas granulométricas de agregado graúdo; (B) Amostras de agregado já classificadas entre as faixas 19,1mm até o passante na peneira 4,75mm e (C) Balança utilizada na para pesagem de cada fração granulométrica de agregados graúdo “britados” em laboratório.

3.4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

Os ensaios tecnológicos foram escolhidos de acordo com as aplicações de interesse, de modo que as normas mais condizentes de agregado para uso em concreto e asfaltos fossem consultadas, especialmente NBR 7211 (ABNT, 2009) e NBR15577-1 (ABNT, 2018) referentes ao uso em concretos, já no caso de aplicações como concreto asfáltico a Norma DNIT 031/2004 – ES (DNIT, 2004). Outros procedimentos recomendados por Alexander & Mindness (2005) e Frazão (2002; 2007) também foram adotados.

A separação das alíquotas dos testes desenvolvidos foi feita por meio de quarteamento das amostras nas frações requeridas em cada experimento, conforme ilustrado na Figura 3-7.

Figura 3-7: (A) Amostra de agregado graúdo; (B) Homogeneização das amostras antes de seu quarteamento; (C) Alíquotas obtidas para ensaios de resistência a Abrasão Los Angeles e desgaste Micro Deval (brita 1 e pedrisco).

É importante salientar que todos os ensaios citados foram realizados nas quatro variedades principais de rochas expostas na pedreira em estudo), de modo a se estabelecer parâmetros e estudos comparativos para uma apropriada caracterização tecnológica dos agregados notadamente para aplicação em concretos hidráulicos e asfálticos (pavimentação), que constituem as principais demandas do material britado produzido e comercializado nesta jazida.

3.4.1. ANÁLISE PETROGRÁFICA

Este procedimento foi executado via descrição macroscópica a olho nu e também se utilizando de petrografia microscópica através de luz transmitida. As diretrizes das normas NBR 15845 – Anexo A (ABNT, 2010a) e da DNER-IE 006 (DNER, 1994) foram empregadas para reconhecimento das características mineralógicas e textuais das diferentes rochas. Ao todo foram realizadas cinco análises petrográficas, sendo quatro referentes aos litotipos estudados, e uma referente a veios de materiais possivelmente deletérios que cortam um dos materiais rochosos.

A identificação de minerais potencialmente reativos teve como embasamento a NBR 15577-3 (ABNT, 2018), que apresenta uma ficha de descrição para auxílio, onde os itens principais são:

- Características macroscópicas (cor e estrutura);
- Composição mineralógica (em especial minerais deletérios em estimativa de % para cada fase);
- Textura;
- Estado de alteração;
- Feições indicativas de deformação;
- Granulação;
- Microfissuramento.

Por meio da identificação destas características que poderiam apresentar potencialidade a reações em concretos foram preenchidas fichas, que se encontram no ANEXO A.

3.4.2. ÍNDICES FÍSICOS

Foram empregadas dez CPs provenientes de fragmentos irregulares amostrados em campo. Os procedimentos do método ISRM (1977a) utilizando etapas de saturação, de secagem em estufa e de pesagem de massas (seca, saturada e submersa), sendo então determinadas as seguintes propriedades: massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água.

3.4.3. ENSAIOS MECÂNICOS

Para a devida caracterização mecânica das diferentes rochas, foram utilizados ensaios usuais em Mecânica das Rochas (resistências à compressão uniaxial, à tração indireta, pelo método Brazilian Test, e determinação das constantes

elásticas) e alguns métodos consagrados para agregados seguindo normas internacionais e nacionais. A Tabela 3-1 organiza os métodos de ensaios utilizados e suas respectivas normas técnicas.

Tabela 3-1: Roteiro dos ensaios geomecânicos e normas técnicas correspondentes

Ensaio	Norma Técnica
Resistência à Compressão Uniaxial	ISRM (1979)
Determinação das Constantes Elásticas	ISRM (1979)
Resistência à Tração Indireta	ISRM (1978)
Agregado Graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”	NBR NM 51 (ABNT, 2001)
Agregados - Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos	NBR 9938 (ABNT, 2013)
Agregados - determinação da perda ao choque no aparelho Treton	DNER-ME 399 (DNER, 1999)
Standard Test Method for Resistance of Coarse Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro-Deval Apparatus	D6928 – 17 (ASTM, 2017)

A maioria dos ensaios foi realizada nos Laboratórios de Mecânica das Rochas e de Geologia de Engenharia do Departamento de Geotecnia da EESC/USP, excluindo os ensaios de abrasão Los Angeles e desgaste Micro-Deval. Sendo o primeiro ensaio realizado no Laboratório de Estradas do Departamento de Engenharia de Transportes da EESC/USP. Já o de desgaste Micro-Deval foi por mim realizado no Laboratório de Engenharia Civil da UENF (Campos do Goytacazes, RJ).

A respeito do último ensaio, normalizado e difundido em países norte-americanos (Estados Unidos e Canadá), foi realizado com finalidade comparativa aos demais métodos laboratoriais consagrados no Brasil. Diversas referências na literatura apresentam correlações do Micro-Deval com outros ensaios, bem como a sua melhor representatividade das condições naturais de campo. Desta forma, julgou-se oportuna a realização de estudos incluindo o desgaste abrasivo Micro-Deval com as rochas selecionadas na presente pesquisa.

3.4.3.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL

As amostras cilíndricas necessárias para a realização destes ensaios foram obtidas pela extração em blocos representativos coletados em campo, utilizando-se perfuratriz com broca diamantada (diâmetro externo de 63,5mm e interno de 56,2 mm). Para o dimensionamento adequado dos CPs frente aos ensaios propostos seguiu-se as especificações preconizadas pela ISRM (1979), atendendo relações altura/diâmetro entre 2,5 a 3,0. Já no corte das extremidades deste CPs cilíndricos, utilizou-se o corte com serra diamantada, seguido do emprego de retífica plana para garantir o paralelismo do topo e base das amostras.

Foram preparados oito CPs para cada litologia, sendo cinco destes empregados em rupturas simples e três controladas e com extensômetros para leitura de deformações dos CPs. As taxas de carregamento empregadas para o DIA, MON_M e MON_{MG} foram de 60 kN/s respeitando o tempo de ensaio exigido por norma, já no caso do basalto foi necessária aplicação de um valor mais alto, 80 kN/s. Alguns testes foram realizados previamente para a estipulação desta taxa

Todos os ensaios foram realizados na prensa servo-controlada MTS 815 disponível no Laboratório de Mecânica das rochas do Depto. de Geotecnia da EESC-USP. Os extensômetros circunferenciais e axiais utilizados são os originais do equipamento. Estes procedimentos são ilustrados esquematicamente na Figura 3-8.

Figura 3-8: A) Obtenção das amostras cilíndricas utilizando-se perfuratriz com broca diamantada; (B) Retificação de topo e base dos CPs; (C) Corpo de prova instrumentado para determinação das constantes elásticas em prensa servo-controlada.

3.4.3.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL

A preparação dos CPs para os ensaios de compressão diametral foi efetuada concomitantemente aos CPs dos ensaios de RCU e da determinação das constantes elásticas. Foram utilizados 5 CPs para determinação desta propriedade em cada rocha estudada.

Os métodos da ISRM (1978) foram empregados para preparação dos CPs e realização dos ensaios, sendo a taxa de carregamento empregada de 0.2 kN/s, utilizando -se a mesma prensa citada no item anterior (Figuras 3-9).

Figura 3-9: (A) Corpos de prova e aparato de ensaio; (B) Disposição do conjunto antes de ser posicionado na prensa para determinação da resistência à compressão diametral.

3.4.3.3. RESISTÊNCIA A ABRASÃO LOS ANGELES

Baseando-se nas premissas que foram escolhidas as faixas granulométricas representantes de aplicação em concretos hidráulicos e asfálticos, adotaram-se as frações B e C do ensaio de Abrasão Los Angeles da norma NM 51 (ABNT, 2001). Representando respectivamente a brita 02 e brita 01 da NBR 7225 (ABNT, 1993) e comercialmente vendidas como brita 01 e pedrisco. Alguns dos procedimentos do ensaio estão relacionados na Figura 3-10.

Figura 3-10: (A) Equipamento de Abrasão Los Angeles do Laboratório de Estradas do Departamento de Engenharia de Transportes (EESC-USP); (B) Pesagem de alíquota para ensaio; (C) Bandeja com amostra e esferas depois de realizado o ensaio.

O índice final de resistência segundo a NM 51 (ABNT, 2001) é calculado a partir da diferença entre a massa retirada na peneira com abertura de 1.68 mm e da massa inicial. A Tabela 3-2 apresenta os procedimentos de ensaio bem como as especificações do equipamento utilizado.

Tabela 3-2: Procedimentos dos ensaios de abrasão Los Angeles e especificações do equipamento utilizado

Procedimentos de ensaio	
Granulometrias do agregado	B: 19,1 – 9,52 mm C: 9,52 – 4,76 mm
Frações de ensaio	B: <19,5 mm e >12,7 mm: 2.500 ± 10g; <12,5 mm e >9,5 mm: 2.500 ± 10g C: <9,52 mm e >6,35 mm: 2.500 ± 10g; <6,35 mm e >4,76 mm: 2.500 ± 10g
Porção de teste	B: 5.000 ± 10g C: 5.000 ± 10g
Número de esferas	B: 11 C: 8
Massa total das esferas	B: 4.584 ± 25g C: 3330 ± 25g
Água	Não
Velocidade do tambor	32 ± 1rpm
Rotações (tempo)	500 (15 minutos)
Retido na peneira para o cálculo	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

3.4.3.4. DESGASTE MICRO-DEVAL

De acordo com Benediktsson (2015) o ensaio Micro-Deval avalia o desgaste superficial das partículas de agregados. Apesar de alguma similaridade com o ensaio de Abrasão Los Angeles, há grandes diferenças nas esferas metálicas utilizadas, presença de água, bem como no tamanho e na frequência de rotação dos cilindros. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil da UENF (Campos de Goycatazes, RJ), conforme ilustrado na Figura 3-11.

Figura 3-11: (A) Tambor e conjunto de esferas metálicas utilizadas no ensaio Micro-Deval; (B) Vista parcial do equipamento de ensaio disponível no Lab. de Engenharia Civil da UENF (Campos, RJ): detalhe mostrando tambor metálico (esquerda) acoplado ao motor de funcionamento (direita).

Os ensaios Micro-Deval foram realizados com base nas diretrizes da norma D6928 (ASTM, 2017). Previamente aos ensaios, cada amostra permaneceu saturada em água durante 120 minutos. Destaca-se que cada ensaio requereu uma quantidade de 1.500 g de agregado em graduações específicas, onde optou-se pelas frações menores de 19.00 mm e 9.5 mm, respectivamente representadas pelos símbolos MDE_A e MDE_B (Graduação A e B), faixas que correspondem as do ensaio de Abrasão Los Angeles (Tabela 3-3).

Tabela 3-3 Procedimentos dos ensaios de Micro-Deval, D6928 (ASTM, 2017).

Procedimentos de ensaio	
Granulometrias do agregado	A: 19,1 – 9,52 mm B: 9,52 – 4,76 mm
Graduações	A: <19,5 mm e >12,7 mm: $2.500 \pm 10g$; <12,5 mm e >9,5 mm: $2.500 \pm 10g$ B: <9,52 mm e >6,35 mm: $2.500 \pm 10g$; <6,35 mm e >4,76 mm: $2.500 \pm 10g$
Porção de teste	A: $1.500 \pm 10g$ B: $1.500 \pm 10g$
Massa total das esferas	$5000 \pm 25g$
Água	Sim
Velocidade do tambor	$100 \pm 1rpm$
Rotações (tempo)	A: 12.000 (2 horas) B: 9.500 (95 minutos)
Retido na peneira para o cálculo	1,19 mm

Conforme a norma D6928 (ASTM, 2017), depois de concluídos os ensaios a retirada das esferas pode ser feita por dois métodos: via seco ou com água. Optou-se pela segunda opção, tendo sido utilizado um imã para retirar as esferas (Figura 3-12). O material resultante do desgaste foi então cuidadosamente colocado sobre uma peneira de 4,75 mm sobreposta a uma de 1,19 mm, sendo lavado com água corrente e o material passante na peneira 1,19 mm descartado. As britas retidas nas peneiras 4,75 mm e 1,19 mm são agrupadas e levadas para secagem em estufa a uma temperatura de $110^\circ \pm 5^\circ C$ até a obtenção de massas constantes.

O índice final do ensaio Micro-Deval (MD) é expresso pela diferença entre as massas inicial (M_{iMDE}) e final (M_{fMDE}) da amostra em gramas, expresso em porcentagem.

Figura 3-12(A) Vista parcial mostrando o aspecto de uma amostra (Graduação A) submetida ao ensaio Micro-Deval; observar a utilização de imã para retirada das esferas metálicas; (B) Detalhe de uma bandeja mostrando a amostra ensaiada depois de lavada em água corrente.

3.4.3.5. RESISTÊNCIA AO ESMAGAMENTO

Os ensaios foram executados de acordo com as diretrizes da norma NBR 9938 (ABNT, 2013). Alíquotas de brita com granulometria entre 12,7 e 9,5mm, com uma massa pré-compactada (M_i) num cilindro de aço rígido, foram submetidas à compressão por meio de um êmbolo acionado por prensa servocontrolada 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 2,4 mm (Figura 3-13). Os resultados são fornecidos em porcentagem de material desagregado, ou melhor, em função do material passante na peneira de 2,4 mm.

Figura 3-13: (A) Cilindro de aço com amostra sendo submetido à compressão em prensa servo-controlada; (B) Aspecto da amostra após o ensaio de esmagamento; (C) Determinação da massa final de ensaio por meio de peneiramento em uma malha de abertura 2,4mm (em cima - retido e embaixo - passante).

3.4.3.6. RESISTÊNCIA AO IMPACTO TRETON

O ensaio de resistência ao choque de aparelho treton é regido pelas normas DNER-ME 399 (DNER, 1999) ou NBR 5564 (ABNT, 2014). Os corpos de prova para realização deste procedimento são preparados por meio de golpes manuais de martelo petrográfico na amostra de rocha, de modo a se obter fragmentos mais cúbicos o possível. Remédio (2017) comenta que este tipo de preparação “artesanal” pode produzir pequenas diferenças nos fragmentos de modo que o impacto do soquete possa ser absorvido por britas com pequenas protuberâncias.

O método de ensaio DNER-ME 399 (DNER, 1999) prevê a utilização de 60 fragmentos, fracionados em 3 conjuntos de 20 fragmentos cada, devendo ter granulometria entre 19 e 16 mm. Cada conjunto é posicionado em um cilindro metálico oco e submetido ao impacto (10 quedas) de um soquete padronizado (Figura 3-14). O material ensaiado é então passado na peneira 1.7 mm. O índice de resistência ao impacto treton é calculado pela diferença da massa inicial e massa final, obtendo-se um índice final pela média de três determinações.

Figura 3-14: (A) Equipamento Treton do Laboratório de Geologia de Engenharia do Departamento de Geotecnia da EESC-USP); (B) CPs previamente preparados para realização do ensaio; (C) CPs posteriores ao impacto do soquete (10 vezes).

3.4.4. ENSAIOS NA PRESENÇA DE LIGANTES

A aplicação de agregados em meio de ligantes é muito usual e muito dependente das propriedades geológicas dos materiais pétreos em questão. Outras variáveis importantes neste quesito são o tipo de ligante e o ambiente de exposição. Para a garantir a qualidade da obra de engenharia que se utiliza destes materiais granulares são necessários ensaios laboratoriais que avaliam seu desempenho em determinado contexto.

3.4.4.1. REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO

Para a realização dos ensaios de reação álcali-agregado foram utilizados os materiais passantes na peneira 4,75 mm, do peneiramento dos agregados gerados pela britagem de laboratório. De acordo com a NBR 15577-1 (ABNT, 2018) prevê-se a realização de análise petrográfica para posterior execução do ensaio “Determinação da Expansão em Barras de Argamassa pelo Método Acelerado”.

Os materiais requeridos foram quarteados entre o total de agregado miúdos, separando-se em torno de 2 Kgs por litotipo. Esta quantidade foi necessária para se obter a distribuição granulométrica prevista na norma NBR 15577-4 (ABNT, 2018), cerca de 1 Kg de agregados passantes na peneira de abertura 4,75 mm. A preparação das barras de argamassa e execução dos ensaios foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UEMG, campus de Passos, MG. Após escolha do cimento CP-V-ARI (Votorantim Cimentos) com equivalente alcalino $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ($0,658 \text{ K}_2\text{O} \% + \text{Na}_2\text{O} \%$) de 0,80% (conforme informado pelo fabricante), foi feita a dosagem e a mistura da argamassa (Figura 3-15(A e B)). Posteriormente as barras de argamassa foram moldadas e deixadas por 24 horas em câmara úmida (Figura 3-15 (C e D)).

Figura 3-15: (A) Argamassadeira em utilização; (B) argamassa em preparação. (C) gabarito de barras de argamassas; (D) moldagem das barras de argamassa. Procedimentos realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UEMG (Passos, MG).

As barras de argamassa foram mantidas em solução alcalina de NaOH à temperatura de 80°C e medidas as expansões até a idade de 30 dias, conforme ilustrado na Figura 3-16.

De acordo com as prerrogativas da norma NBR 15577-1 (ABNT, 2018), as classificações quanto ao limite de expansibilidade são as seguintes expansões inferiores a 0,19% aos 30 dias, para agregados inócuos em qualquer concreto. Devendo-se observar principalmente o grau de reatividade e apresentados no item 2.1.8.1. (Tabelas 2-7 e 2-8).

Figura 3-16: (A) Barras de argamassas produzidas (25mm x 25mm x 285mm); (B) Barras colocadas em recipiente de aço inox e solução com NaOH; (C) Estufa ventilada para manter as amostras a temperatura de 80° C durante o período de medições; (D) Aparato de medição utilizado para verificação da expansibilidade, com sensibilidade de 0,001mm (norma NBR 15577-4; ABNT, 2008). Laboratório de Materiais de Construção Civil da UEMG (Passos, MG).

3.4.5. ADESIVIDADE DE AGREGADO GRAÚDO

A realização do ensaio de adesividade ao ligante asfáltico foi feita no Laboratório de Estradas do Departamento de Engenharia de Transportes da EESC-USP. Seguindo-se os procedimentos da norma NBR 12583 (ABNT, 2017), foram utilizados em torno de 500 gramas de agregado passante na peneira 19 mm e retido na de 12,5 mm provenientes da britagem laboratorial, de cada litotipo estudado.

O ligante utilizado nesta avaliação foi CAP 50-70 (cimento asfáltico de petróleo, aquecido até 120° C. Conforme descrito pela norma empregada 17,5 gramas do CAP foram misturados com a amostra de agregados, ver Figura 3-17. Após essa etapa procedeu-se em colocar o material sobre uma placa de vidro de superfície lisa, para o resfriamento do ligante. Em seguida, a amostra foi colocada em béquer de vidro e totalmente recoberta com água destilada, disposto então em estufa a 40° C e mantido em repouso durante 72 horas. A avaliação da propriedade é visual, sendo observados descolamentos entre o ligante asfáltico e os agregados. Caso haja qualquer descolamento o resultado é tido como não satisfatório.

Figura 3-17: (A) Disposição do CAP sobre os agregados; (B) Mistura entre os agregados e CAP; (C) Béquer contendo agregados devidamente envoltos pelo ligante asfáltico.

3.4.6. ENSAIO DE ALTERAÇÃO LABORATORIAL: SANIDADE A SOLUÇÃO DE SULFATO

O ensaio empregado para determinação de alteração acelerada em laboratório das rochas, foi o de durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato, DNER-ME 089/94 (DNER, 1994). O emprego deste método deve-se principalmente pelo seu amplo uso na caracterização de agregados, principalmente em aplicações de pavimentação. Neste ensaio os agregados são testados em ciclos em saturação de sulfato de sódio ou magnésio e secagem em estufa. As faixas granulométricas

utilizadas são definidas pela norma, de modo que se houver no mínimo 5% de massa em alguma das frações, esta deverá ser ensaiada.

Para as frações menores de 9,5 mm devem ser ensaiados 110 gramas das granulometrias na Tabela 3-4. Já no caso de agregados retidos na peneira 4,8 mm deve-se seguir as diretrizes da Tabela 3-5 para a separação das frações de ensaio.

Segundo a DNER-ME 089/94 (DNER, 1994) todas as frações que possuem 5% do total de massa dos agregados devem ser ensaiadas. Desta forma, seria necessário ensaiar as graduações da Tabela 3-4. Visto que o foco da presente pesquisa são os materiais constituídos de agregado graúdo, retidos na peneira 4,8 mm, optou-se por realizar as graduações C e D da Tabela 3-5, que correspondem a boa parte dos ensaios (abrasão Los Angeles e desgaste Micro-Deval) e ao comercialmente disponibilizado pela pedreira como pedra 1 e pedrisco.

Após a separação das alíquotas, procedeu-se com a etapa de preparação da solução de sulfato, sendo empregado o sulfato de sódio. Esta solução foi preparada de modo a se atingir os valores de densidade e de concentração requeridos por norma. Utilizou-se da condicionadora térmica do Laboratório de Química Ambiental do IQSC-USP, onde a solução foi mantida por 24 horas a 20°C, previamente aos ensaios de ciclagem. Foram realizados 5 ciclos de saturação e secagem para se obter as perdas de massa no ensaio.

Tabela 3-4: Material passante na peneira 9,5 mm para ser ensaiado conforme norma DNER-ME 089/94 (DNER, 1994).

Passante	Retido
9.5 mm	4.8 mm
4.8 mm	2.4 mm
2.4 mm	1.2 mm
1.2 mm	0.6 mm
0.6 mm	0.3 mm

Tabela 3-5: Material retido na peneira 4,8 mm para ensaiado conforme a norma DNER-ME 089/94 (DNER, 1994).

Fração de ensaio	Granulometria	Porcentagem de massa
a) 63,5 a 38mm (3000 gramas)	Entre 63,5 mm e 50 mm	50%
	Entre 50 e 38 mm	50%
b) 38 a 19mm (1500 gramas)	Entre 38 e 25 mm	67%
	Entre 25 e 19 mm	33%
c) 19 a 9.5 mm (1000 gramas)	Entre 19 e 12,7 mm	67%
	Entre 12,7 e 9,5 mm	33%
d) 9.5 a 4.8 mm (300 gramas)	Entre 9,5 e 4,8 mm	100%

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. RECONHECIMENTO GEOLÓGICO

O reconhecimento da geologia local foi realizado por meio de atividades de campo, durante as fases iniciais da pesquisa. Foram observadas informações básicas dos litotipos aflorantes nas bancadas da pedreira, pertencente ao maciço rochoso de estudos "Intrusão de Limeira". Destacando variações petrográficas e estruturais que permitiram relacionar as variedades já descritas por alguns autores, bem como apontar locais adequados e representativos para amostragens de material para ensaios laboratoriais. Com base nestas premissas, foi elaborado um mapa de localização dentro da cava contendo os pontos de amostragem e de reconhecimento geológico, apresentado na Figura 4-1.

A cava da pedreira levantada em campo atualmente expõe uma seção vertical na região norte com cerca de 90 metros de profundidade, havendo ainda no topo o decapeamento dos solos residuais para avanço de lavra neste setor. O acesso com maior facilidade a rocha da intrusão é realizado nas paredes com direção norte-sul, sendo observada diversificada variação composicional neste trecho. Operações de decape a norte e nordeste estão sendo realizadas para expansão da pedreira, desta forma algumas exposições de rocha nestas áreas são novas e puderam contribuir para melhor compreensão da distribuição dos materiais de estudo.

Figura 4-1. Mapa de Localização dentro da cava da pedreira visitada, contendo dos pontos de interesse. Imagem Google Earth 2018.

Na região sul da pedreira estão localizadas as vias de acesso às bancadas da cava, sendo observados contatos entre rochas intrusivas com arenitos do Sub-Grupo Itararé, nos pontos de reconhecimento “E” e “F” (Figura 4-2). O basalto (BAS) que ocorre nestes contatos com coloração preta a cinza, muito escura, sendo maciço, e de textura afanítica a fanerítica muito fina. Ainda há alguns xenólitos da encaixante ao longo do paredão.

Próximo ao contato não foram observadas, ao todo, amígdalas nos basaltos. Entretanto próximo ao contato com o arenito do paredão oeste norte-sul, pontos “E” e “F”, um pequeno trecho do paredão é constituído de basalto amigdaloidal, sendo uma quantidade não representativa para o presente trabalho, que requer um volume razoável e claro uma distribuição de campo que componha amostra significativa.

Figura 4-2: (A) Contato sub-horizontal entre as rochas da encaixante e as da intrusão, observado no ponto “E”, apresenta de lente de arenito “cozido” em destaque na foto tracejado em cor preta. (B) Paredão escavado ao lado da estrada de acesso, onde há a maior porção de arenitos em contato irregular com os basaltos da intrusão, detalhe para o tracejado na fotografia em cor preta.

Diferentemente dos outros contatos, pontos “E” e “F”, nos quais o arenito não é afetado pelo magmatismo, o basalto que ocorre no ponto “A” tem contato abrupto com as rochas encaixantes do Sub-Grupo Itararé. Poucos metros, cerca de 2 metros, deste contato foi realizada a amostragem do basalto (BAS), um dos

materiais de estudo da pesquisa, que é uma rocha afanítica a fanerítica muito fina, de cor cinza escura (Figura 4-3(B)). Devido a textura e granulação destas rochas, assim como verificado pontos “E” e “F”, estas são classificadas como basalto, representando a borda de um corpo intrusivo com condições de resfriamento rápidas. Há a presença de venulações centimétricas de carbonatos neste litotipo amostrado no ponto “A”, preenchendo pequenas fraturas (Figura 4-4).

Figura 4-3: (A): Fotografia de campo: Falhamento no contato entre o corpo intrusivo e as rochas do Sub-Grupo Itararé. (B): Fotografia de campo: Detalhe para o basalto cisalhado em contato com o arenito.

Figura 4-4: (A) Aspecto da superfície de uma fratura com carbonatos em fragmento de basalto (BAS); (B) Efervescência da superfície (carbonatos e ácido clorídrico).

Os diabásios (DIA) estão distantes das bordas cerca de 2 a 3 metros, do ponto “F”. Estas rochas apresentam coloração cinza a cinza escuro, com textura fanerítica e granulação fina, entretanto há aumento gradativo da granulação de acordo com o afastamento da borda (zona de contato), apresentam de cristais com 1,5 mm de diâmetro. A amostragem destes materiais foi realizada em uma frente de

decapeamento no ponto “D”, Figuras 4.4. e 4.5., trata-se de uma nova bancada da cava. Apesar da proximidade ao perfil intemperismo, o grau de alteração das amostras é imperceptível, e pouco penetrativo, representando condições típicas da intrusão: uma rocha de granulação fina e coloração cinza.

Figura 4-5. (A) Vista parcial da base da bancada do ponto “D”. (B) Aspecto macroscópico do material pétreo aflorante, diabásio exposto.

Figura 4-6. Vista panorâmica da porção sul da cava, a partir do ponto de amostragem do diabásio (DIA).

Contatos entre o diabásio e o monzodiorito não foram observados em campo, a exemplo de Faria (2008) que reconheceu contatos abruptos entre estes litotipos com concentração de minerais máficos especialmente na pedreira vizinha à do presente estudo. Os monzodioritos afloram nos pontos “B”, “C”, e “G”. No ponto “B”, veios de riolito, de espessura milimétrica a centimétrica cortam com certa frequência (Figura 4-6). A amostragem realizada neste ponto teve como intuito a avaliação do

litotipo em questão com presença de veios e mais afetada por processos hidrotermais. A granulação deste material também é ligeiramente mais grossa (MON_{MG}), se comparada ao material aflorante no ponto "C" (MON_M) (Figura 4-7). Entretanto ambos são os materiais da porção central da intrusão.

Figura 4-7: (A) Talude da bancada no ponto "B". (B) Detalhe do monzodiorito (MON_{MG}) amostrado com veios de riolito, ponto "B".

Figura 4-8: (A) Talude da bancada no ponto A. (B) Detalhe do monzodiorito (MON_M) no ponto C, material amostrado para estudos.

Com estas informações foi possível reelaborar o perfil proposto por Lino (2015) para a intrusão de Limeira (Figura 4-9). O núcleo do corpo geológico não identificado em campo na pedreira "B", composto de quartzo-monzodiorito, deve estar próximo ao talude a noroeste. Entretanto notavelmente a borda de resfriamento, composta de basaltos foi identificada e apresenta espessura de até 3 metros

aproximadamente, bem como a borda de transição de diabásios e corpo central composto de monzodioritos.

Figura 4-9: Perfil da intrusão de Limeira adaptado de (Martins, 2015). À leste a pedreira, cava onde foi realizada a amostragem e estudos tecnológicos, destacada com a seta em amarelo.

4.2. PETROGRAFIA MACROSCÓPICA E MICROSCÓPICA

Os estudos petrográficos utilizando de microscopia ótica de luz transmitida são essenciais para identificação da mineralogia, textura, granulação, estado microfissural, dentre outras informações geológicas. Portanto nos próximos itens serão abordados os resultados deste importante método na caracterização tecnológica de materiais pétreos visando a utilização como agregados em obras de engenharia.

4.2.1. BASALTO

O basalto apresenta estrutura maciça, textura afanítica com alguns cristais de granulação muito fina ($< 1 \text{ mm}$), possuem coloração preta a tons de verde escuro (Figura 4-10).

Microscopicamente o basalto é de caráter hipocristalino, composto por fenocristais de plagioclásio (10%) e clinopiroxênio (augita) (10%), imersos em uma matriz vítrea com minerais de baixa cristalinidade (80%), onde pode ser observado uma alteração hidrotermal nos fenocristais (Figura 4-11). Em detalhe na Figura (4-12), a matriz é formada por vidro vulcânico (35%), opacos (10%) e minerais de alteração: saussurita, carbonato e clorita/esmectita (35%), onde fica nítido os processos de alteração hidrotermal tardi a pós magmáticos nessa rocha. O plagioclásio e o clinopiroxênio são alterados por processos de saussuritização e cloritização formando saussurita, clorita/esmectita e carbonatos, os últimos se encontram preenchendo

micro-fraturas formando venulações. Enquanto o vidro se encontra em processo de desvitrificação, sendo substituído por agregados minerais de coloração marrom. Os opacos não sofrem processos de alteração.

Figura 4-10: (A) Corpo de prova para ensaio de compressão diametral (diâmetro 56 mm). (B) Superfície após ao ensaio em detalhe.

Microscopicamente o basalto é de caráter hipocristalino, composto por fenocristais de plagioclásio (10%) e clinopiroxênio (augita) (10%), imersos em uma matriz vítrea com minerais de baixa cristalinidade (80%), onde pode ser observado uma alteração hidrotermal nos fenocristais (Figura 4-11). Em detalhe na Figura (4-12), a matriz é formada por vidro vulcânico (35%), opacos (10%) e minerais de alteração: saussorita, carbonato e clorita/esmectita (35%), onde fica nítido os processos de alteração hidrotermal tardi a pós magmáticos nessa rocha. O plagioclásio e o clinopiroxênio são alterados por processos de saussuritização e cloritização formando saussurita, clorita/esmectita e carbonatos, os últimos se encontram preenchendo micro-fraturas formando venulações. Enquanto o vidro se encontra em processo de desvitrificação, sendo substituído por agregados minerais de coloração marrom. Os opacos não sofrem processos de alteração.

Os cristais de plagioclásio ocorrem com hábito ripiforme a tabular, raramente geminados, com textura de resfriamento rápido tipo 'rabo de andorinha', aspecto esquelético. Já os cristais de clinopiroxênio tem hábito granular justamente com plagioclásios compõem texturas hialofítica, por vezes subofítica e ofítica. Os minerais opacos, provável magnetita, ocorrem com hábito acicular. As fissuras cortam todos os minerais, caracterizadas como transminerais, ocorrendo preenchidas por minerais como o quartzo, carbonato e a clorita/esmectita, minerais de origem hidrotermal. A matriz e a borda das fissuras também se encontram substituídas para produtos

secundários, caracterizando desta forma um hidrotermalismo fissural e pervasivo para este tipo de rocha (Figura-4-11).

Figura 4-11: Fotomicrografias do BAS com nícois em paralelo (A) e cruzado (B): apresentando os processos hidrotermais e devitrificação. Legenda: Cpx- clinopiroxênio, Op- opaco, Chl/Smc – clorita/ esmectita, Gl- vidro vulcânico, Srt- Sericita.

Figura 4-12: Fotomicrografias do BAS com nícois em paralelo (A) e cruzado (B): exibindo em detalhe as fissuras, processos de alteração e matriz. Legenda: Cpx- clinopiroxênio, Op- opaco, Chl/Smc – clorita/ esmectita, Qz- quartzo.

4.2.2. DIABÁSIO

O diabásio ocorre como um material de transição entre o basalto e o núcleo monzodiorítico. Exibindo coloração cinza escura, estrutura maciça e textura fanerítica, com granulação fina, entre 0,5 e 1 mm (Figura 4-13).

Microscopicamente o diabásio é de caráter holocristalino, sendo composto essencialmente por plagioclásio (45%), clinopiroxênio (augita) (30%) opacos (15%) e agregados de clorita/esmectita (9%) e apatita (1%) (Figura 4-14). Os cristais euédricos a subeuédricos de plagioclásio, dominantes na matriz da rocha, possuem hábito tabular e zoneamento composicional, além de apresentarem outros minerais entre

seus interstícios, configurando a textura intergranular. Diferentemente do basalto, no diabásio os cristais de plagioclásio possuem geminação polissintética o que permitiu definir sua classificação como labradorita. O clinopiroxênio tem hábito prismático a granular, euédrico a subeuédrico, e quando associados aos plagioclásios apresentam a textura ofítica a subofítica. Os minerais opacos ocorrem com hábito granular euédrico a subeuédrico frequentemente associados aos clinopiroxênios.

Figura 4-13: (A) Corpo de prova para ensaio de compressão diametral (diâmetro 56 mm). (B) Superfície após ao ensaio em detalhe.

Os plagioclásios e clinopiroxênios são encontrados fissurados, variando de fissuras do tipo intra a transminerais. Nesses locais quando associados aos opacos apresentam bordas de alteração formando material alaranjando com aglomerações de clorita/esmectita. Diferentemente do basalto, a alteração hidrotermal no diabásio é menos intensa, porém ainda marcada pela substituição parcial do clinopiroxênio por agregados de clorita/esmectita, e saussuritização e exsoluções de albita nos plagioclásios.

Figura 4-14: Fotomicrografias do diabásio em nicóis cruzados: (A) das bordas de corrosão e aglomerados de clorita/esmectita; (B) Matriz mineralógica do diabásio afetada por processos hidrotermais. Legenda: Cpx- clinopiroxênio, Op- Opaco, Chl/Smc – clorita/esmectítica.

4.2.3. MONZODIORITO

O monzodiorito ocorre como litologia principal, na porção central da intrusão de Limeira, são rochas de coloração cinza escuro a branco, com estrutura maciça e textura fanerítica e com granulação fina a grossa. No caso do material amostrado no ponto C, a granulação é fina a média, cerca de 0,5 a 5 mm, conforme a Figura 4-15 (A e B). Entretanto a rocha do ponto "B", tem granulação relativamente maior, fina a grossa com alguns cristais chegando até 6 mm (Figura 4-15 (C e D)). Assim sendo o litotipo amostrado no ponto "C" foi denominado como monzodiorito de granulação média, já o material proveniente do ponto B como monzodiorito de granulação média a grossa.

Diferentemente do diabásio, os cristais de plagioclásio apresentam tanto a textura intergranular como de fluxo magmático (Figura 4-15). E os clinopiroxênios (augita e pigeonita) com plagioclásios formam textura ofítica a subofítica frequentemente associados aos minerais opacos que ocorrem com hábito granular euédrico a subeuédrico. Os piroxênios apresentam um aumento da granulação associado a um fissuramento intramineral a transmineral (Figura 4-16:A). Nas sessões onde os plagioclásios se encontram em processos de saussuritização e albitização ocorrem localmente, piroxênios sofrendo um processo de cloritização formando agregados de clorita/esmectita em suas bordas e microfissuras (Figura 4-16(B)).

Figura 4-15: (A) Corpo de prova de ensaio de compressão diametral (56 mm de diâmetro), do monzodiorito do ponto "C" (granulação fina a média). (B) Detalhe macroscópico MON_M. (C) Corpo de prova de ensaio de compressão diametral (56 mm de diâmetro), do monzodiorito do ponto "B" (granulação fina a grossa). (D) Detalhe macroscópico do MON_{MG}.

Figura 4-16: Fotomicrografias com nicóis cruzados: (A) textura intergranular com fissuras trans e intraminerais (MON_{MG}); (B) textura de fluxo magmático nos plagioclásios e processos de alteração, bem como, agregados de clorita e esmectita (MON_M). Legenda: Cpx-clinopiroxênio, Op- Opaco, Chl/Smc – clorita/esmectita.

Os veios cortantes do MON_{MG} têm composição riolítica, são constituídos por rochas holocristalinas, de textura muito fina a fina (cristais de até 0,5 mm), Figura 4-17, sua matriz mineralógica é quartzo-feldspática (plagioclásio) (Figura 4-18A). A alteração hidrotermal no monzodiorito (MON_{MG}) é menos intensa e não pervasiva. Entretanto, nas porções ligadas aos veios aplíticos, normalmente compostos por quartzo, plagioclásios albitizados e piroxênios completamente cloritizados, formando clorita e hornblenda (Figura 4-18B), ou seja, apresenta hidrotermalismo intenso.

Figura 4-17 Corpos de prova descartados de ensaio de compressão diametral (MON_{MG}), com diâmetro de 56 mm e altura de 30 mm). (A) Veio milimétrico aplítico interceptando o CP ao meio; (B) Face de CP composta por riolito.

Figura 4-18: Fotomicrografia com nicos em paralelo: (A) apresentando o aspecto do veio de composição quartzo-feldspática muito fina. B) Exibindo aglomerados de clorita/esmectita e processos de alteração no contato entre o MON_{MG} e veio de riolito. Legenda: Ab- albita, Cpx- clinopiroxênio, Op- Opaco, Chl/Smc – clorita/esmectítica, Qz- quartzo, Hbl - hornblenda.

4.2.4. SÍNTESE DAS ANÁLISES PETROGRÁFICAS NO CONTEXTO DA DIFERENCIAÇÃO MAGMÁTICA

As rochas estudadas têm origem magmática intrusiva, geradas no mesmo evento e, portanto, compondo o mesmo corpo geológico. Porém o basalto (BAS) tem nomenclatura típica de um litotipo genético de extrusões ígneas, isto se deve em consequência da textura afanítica. Diferentemente dos outros materiais pétreos que apresentam minerais de granulação fina, podendo apresentar cristais de até 6 mm (MON_{MG}). De modo geral há um aumento gradativo do tamanho dos cristais até as regiões mais próximas ao núcleo da intrusão.

Estas variações são resultantes da diferenciação magmática, que de acordo com Faria (2008) e Lino (2015) ocorreu principalmente por cristalização fracionada. Uma das evidências deste processo magmático é notada na classificação de acordo do conteúdo de sílica, Machado (2005) tem resultados relativamente altos de SiO_2 variando de 53,56% a 55,31% comparada a outras intrusões do estado de São Paulo. Porém os estudos mais recentes como os de Faria (2008), Seixas (2014) e Lino (2015) constataram rochas ácidas, tratando-se de riolitos. Dados de fluorescência de raio-x (FRX) foram compilados e estão dispostos na Figura 4-19, diagrama de número de Mg versus sílica. É possível observar que os valores mais baixos de #Mg ocorrem em rochas da última fase de cristalização, principalmente nas rochas do núcleo (quartzo monzodioritos).

Quanto as fases tardi-magmáticas (hidrotermais), Faria (2008) conclui que os processos de expulsão de líquidos diferenciados logo nas faces em solidificação podem ter originando os veios aplíticos. Alterações e substituições minerais são causadas por estes processos também de acordo com Lino (2015), como os agregados de clorita que ocorrem em todas as rochas da intrusão. Esses agregados têm associação às substituições parciais ou totais dos cristais de clinopiroxênio, já nos basaltos ocorre substituição da matriz vítrea, causando desvitrificação. No caso do plagioclásio ocorre albitização, principalmente nas rochas da porção central da intrusão.

Legenda:

△ Basaltos	▽ Riolitos	■ Dados obtidos por Faria (2008)
□ Diabásios	◇ Monzodioritos	● Dados obtidos por Santos (2015)
○ Quartzo Monzodioritos	+	Dados obtidos por Seixas (2014)

Figura 4-19: Diagrama de número de Mg versus sílica para os principais litotipos da intrusão de Limeira.

Neste contexto de evolução magmática se encontram as rochas do estudo, portanto estes conhecimentos são essenciais, contribuindo para melhor compreensão dos componentes mineralógicos, texturas, estruturas e possíveis comportamentos no uso destes materiais pétreos como agregados em obras de engenharia. Nos próximos itens os aspectos de correlação com resultados de ensaios tecnológicos serão abordados. De modo geral as análises petrográficas apresentaram mineralogia, granulação, alterações e estruturas bem conhecidas pela literatura. A Tabela 4-1 organiza as principais características identificadas por microscopia, optou-se pela disposição da composição mineralógica primária e hidrotermal, devido à grande quantidade no caso do MON_{MG} .

Tabela 4-1: Sumário das características petrográficas das rochas estudadas

Rocha		BAS	DIA	MON_M	MON_{MG}
Cor		Preta a verde escuro	Cinza escura	Cinza escuro a branco	Cinza escuro a branco
Estruturas		Maciça	Maciça	Maciça	Maciça, cortada por veios
Texturas		Hialofítica, subofítica e ofítica	Intergranular, ofítica e subofítica	Intergranular, ofítica, sub-ofítica, e de fluxo magmático	Intergranular, ofítica, sub-ofítica, e de fluxo magmático
Granulação		Muito fina a fina (<1 mm)	Fina (0,5 a 1 mm)	Fina a média (0,5 a 5 mm).	Fina a grossa (0,5 a 6mm)
Estado microfissural		Transmineral (preenchimento com minerais de alteração)	Intramineral e transmineral	Intramineral e transmineral	Intramineral e transmineral
Mineralogia primária (%)	Vidro Vulcânico (%)	35	-	-	-
	Plagioclásio (%)	10	45	45	38
	Clinopiroxênio (%)	10	30	34	30
	Opacos (%)	10	15	12	12
Mineralogia hidrotermal (%)	Saussorita, carbonato e clorita/esmectita em meio da matriz vítrea	35	-	-	-
	Agregados de clorita/esmectita	-	9	7	-
	Agregados de clorita/esmectita, quartzo, hornblenda e albita	-	-	-	18

Legenda: BAS – Basalto, DIA – Diabásio, MON_M – Monzodiorito de granulação fina a média, MON_{MG} – Monzodiorito de granulação fina a grossa.

4.3. ÍNDICES FÍSICOS

De acordo com a tabela 4-2, os resultados obtidos para o basalto (BAS) afanítico foram: massa específica aparente: 2.993 kg/m³; porosidade aparente: 0,60% e absorção de água: 0,31 %.

Tabela 4-2: Massas e resultados de índices físicos do basalto (BAS).

CP	m _{sec} (g)	m _{sat} (g)	m _{sub} (g)	ρ _a (kg/m ³)	η _a (%)	α _a (%)
1	238,94	239,31	158,61	2979	0,46	0,23
2	294,78	295,32	195,89	2986	0,54	0,28
3	324,90	325,32	216,81	3010	0,39	0,19
4	258,22	258,96	170,94	2967	0,84	0,43
5	348,72	349,57	231,88	2992	0,72	0,37
6	263,84	264,28	175,95	3007	0,50	0,25
7	207,83	208,44	138,09	2989	0,87	0,44
8	253,95	254,68	168,95	2996	0,85	0,43
9	305,03	305,57	202,88	2991	0,53	0,27
10	312,82	313,19	208,21	2994	0,35	0,18
Média	281,46	281,46	186,82	2993	0,60	0,31

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.

De acordo com a tabela 4-3, os resultados obtidos para o diabásio (DIA) foram: massa específica aparente: 2.949 kg/m³; porosidade aparente: 0.69% e absorção de água: 0.36%.

Tabela 4-3: Massas e resultados de índices físicos do diabásio (DIA).

CP	m _{sec} (g)	m _{sat} (g)	m _{sub} (g)	ρ _a (kg/m ³)	η _a (%)	α _a (%)
1	466,81	467,73	308,79	2960	0,58	0,30
2	328,73	329,51	216,07	2925	0,69	0,36
3	435,74	436,88	288,31	2963	0,77	0,40
4	355,72	356,37	235,54	2965	0,54	0,28
5	543,15	544,23	357,58	2933	0,58	0,30
6	340,97	341,91	224,85	2944	0,80	0,42
7	367,41	368,07	242,64	2950	0,53	0,27
8	446,42	447,56	295,53	2966	0,75	0,39
9	229,53	230,18	151,25	2940	0,82	0,43
10	291,37	292,21	191,94	2939	0,84	0,44
Média	380,59	381,47	251,25	2949	0,69	0,36

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.

As massas e resultados para os corpos de prova dos monzodioritos de granulação média (MON_M) e média a grossa (MON_{MG}) estão organizados respectivamente nas tabelas 4-4 e 4-5. Comparando-se estes resultados as rochas da

borda de resfriamento e de transição (basalto e diabásio) nota-se principalmente diferenças nos pesos específicos aparentes.

Tabela 4-4: Massas e resultados de índices físicos do monzodiorito de granulação média (MON_M)

CP	m _{sec} (g)	m _{sat} (g)	m _{sub} (g)	ρ _a (kg/m³)	η _a (%)	α _a (%)
1	273,97	275,01	176,88	2833	1,06	0,59
2	260,95	261,76	169,34	2857	0,88	0,48
3	435,86	437,03	281,31	2828	0,75	0,42
4	429,05	430,26	278,63	2860	0,80	0,43
5	253,81	254,69	165,12	2872	0,98	0,53
6	303,95	304,61	197,64	2865	0,62	0,33
7	277,38	278,24	181,28	2895	0,89	0,47
8	428,99	430,19	279,53	2878	0,80	0,43
9	272,19	273,02	175,94	2837	0,85	0,47
10	254,69	255,51	168,95	2980	0,95	0,49
Média	319,08	320,03	207,46	2871	0,86	0,46

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.

Tabela 4-5: Massas e resultados de índices físicos do monzodiorito de granulação média (MON_{MG})

CP	m _{sec} (g)	m _{sat} (g)	m _{sub} (g)	ρ _a (kg/m³)	η _a (%)	α _a (%)
1	319,03	320,01	208,61	2898	0,88	0,47
2	388,29	389,01	253,54	2887	0,53	0,28
3	248,94	249,68	161,76	2864	0,84	0,46
4	366,18	367,33	238,95	2887	0,90	0,48
5	310,76	311,5	202,77	2885	0,68	0,36
6	269,93	270,78	176,28	2891	0,90	0,48
7	298,12	298,96	194,63	2889	0,81	0,43
8	344,91	345,71	224,34	2867	0,66	0,36
9	373,51	374,71	243,69	2886	0,92	0,49
10	396,88	397,94	259,03	2887	0,76	0,41
Média	331,66	332,56	216,36	2884	0,79	0,42

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.

De modo geral, as médias calculadas dos índices físicos mostraram que as rochas apresentam um peso específico alto, e porosidades inferiores a 1%. Resultados muito bons e satisfatórios para rochas em aplicações de agregados, isso se deve principalmente pelo baixo grau de alteração e das condições de microfissuramento dos materiais pétreos estudados.

Outros resultados importantes são notados na variação no peso específico aparente seco entre os litotipos ensaiados. Com base nas informações verbais de funcionários da pedreira pesquisada, soube-se que há dificuldades na elaboração de concretos betuminosos na usina de asfaltos, pertencente ao mesmo grupo

minerador que explora o maciço. Isto se deve, principalmente à densidade dos materiais pétreos mesmo que seja na segunda casa decimal. Visto que as operações de mineração não levam em conta as diferentes rochas, há uma imprecisão nos valores utilizados para dosagem dos materiais de pavimentação.

4.4. ENSAIOS MECÂNICOS

Estes ensaios testam as propriedades físico-mecânicas, no caso de aplicações de agregados em meio de ligantes as resistências devem atingir valores mínimos para garantia da estabilidade e segurança dos materiais e estruturas, sejam de concreto hidráulico ou em aplicações de pavimentação. Sendo assim, métodos de ensaios rotineiros para estas aplicações foram realizados e seguem seus resultados nos próximos itens do texto.

4.4.1. RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES E DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES ELÁSTICAS

Neste ensaio o corpo de prova, preparado por meio de testemunhos extraídos de blocos de rocha ou de sondagem, é levado a uma prensa que faz o carregamento até a ruptura. Trata-se de um método difundido principalmente para estudos geomecânicos, mas que também traz certas correlações para estudos de rochas britadas.

A Tabela 4-6 apresenta os valores de carregamentos máximos e resultados de resistências a compressão simples do basalto (BAS). O material apresentou resistência muito elevada, entretanto nota-se um desvio padrão (15 MPa) e coeficiente de variação relativamente altos (5,67%) devendo-se a heterogeneidades do material que apresenta microfissuras, relacionadas as fases mineralógicas hidrotermais.

Para o diabásio (DIA), que tem seus resultados na Tabela 4-7, a resistência em comparação a rocha de granulação mais fina é menor, em torno de 50 MPa, o que é esperado pois o diabásio é uma rocha holocristalina de granulação fina.

Tabela 4-6: Resultados do ensaio de RCU para o basalto (BAS).

Litotipo	CP	Carregamento Máximo (kN)	σ_c (MPa)
BAS	1	679,11	270,68
	2	674,68	264,28
	3	738,31	290,33
	4	753,36	297,72
	5	668,97	263,62
		Média	277,33
		Desvio Padrão	15,71
		Coeficiente de Variação	5,67 (%)

Tabela 4-7: Resultados do RCU para o diabásio (DIA).

Litotipo	CP	Carregamento Máximo (kN)	σ_c (MPa)
DIA	1	552,54	220,52
	2	569,25	226,65
	3	548,73	217,70
	4	544,13	216,39
	5	590,18	234,15
		Média	223,08
		Desvio Padrão	7,34
		Coeficiente de Variação	3,29 (%)

Os monzodioritos tem seus resultados e dados apresentados nas Tabelas 4-8 e 4-9 respectivamente. Em termos de valores de resistência, os dois materiais são praticamente iguais apresentando valores com diferença de menos de 9 MPa. Nota-se ainda que não há grandes alterações nos dados estatísticos, sendo que os desvios padrões estão na casa de 5 a 6 MPa e o coeficiente de variação 3 %, mostrando resultados bem condizentes pois são rochas com mesmas texturas e de granulação ligeiramente variada.

Tabela 4-8: Resultados do ensaio de RCU para o monzodiorito de granulação fina a média (MON_M)

Litotipo	CP	Carregamento Máximo (kN)	σ_c (MPa)
MON _M	1	525,77	207,46
	2	521,75	206,51
	3	543,95	214,18
	4	513,50	202,71
	5	506,03	199,25
		Média	206,02
		Desvio Padrão	5,60
		Coeficiente de Variação	2,72 (%)

Tabela 4-9: Resultados do ensaio de RCU para o monzodiorito de granulação fina a grossa (MON_{MG})

Litotipo	CP	Carregamento Máximo (kN)	σ_c (MPa)
MON _{MG}	1	505,71	200,40
	2	509,86	201,94
	3	484,42	193,19
	4	481,11	189,43
	5	516,31	203,97
	Média		197,79
	Desvio Padrão		6,19
	Coeficiente de Variação		3,13 (%)

As Tabelas 4-10 e 4-11 apresentam os resultados das constantes elásticas calculados para o basalto e o diabásio, ambos materiais tem rigidez muito alta, apresentando módulos de elasticidade superiores a 100 GPa. O coeficiente de Poisson do basalto é inferior ao diabásio, em consequência principalmente da diferença entre o tamanho de cristais das rochas, visto que o basalto é uma rocha ainda composta parte por material vítreo e apresenta 80 % de minerais dispostos numa matriz muito fina. Em comparação, o diabásio tem cristais entre 0,5 a 1 mm, sendo assim é mais propício à abertura de microfissuras, o que provoca maior expansão radial do corpo de prova.

Tabela 4-10: Resultados da determinação das constantes elásticas para o basalto (BAS).

Litotipo	CP	E (GPa)	ν
BAS	1	130,56	0,25
	2	135,59	0,28
	3	129,21	0,23
	Média	131,79	0,25
	Desvio Padrão	3,36	0,02
	Coeficiente de Variação	2,55 (%)	9,09 (%)

Tabela 4-11: Resultados da determinação das constantes elásticas para o diabásio (DIA).

Litotipo	CP	E (GPa)	ν
DIA	1	118,05	0,32
	2	122,86	0,29
	3	129,53	0,27
	Média	123,48	0,29
	Desvio Padrão	5,77	0,02
	Coeficiente de Variação	4,67 (%)	7,84 (%)

Mais ao centro do corpo geológico estão os monzodioritos, materiais que chegam a apresentar até minerais grossos (> 5 mm). Portanto também sendo plausíveis de maiores deformações nas faces laterais dos CPs. Pode-se observar nas Tabelas 4-12 e 4-13 os valores obtidos de razão de Poisson, para ambos monzodioritos são iguais e bem próximos ao valor do diabásio. Quanto ao módulo de elasticidade

os monzodioritos apresentam pequenas diferenças, portanto se enquadrando como materiais muito rígidos.

Em relação aos coeficientes de variação nota-se que os mais altos são do basalto e monzodiorito (MON_{MG}) para os valores de razão de Poisson. Ambos materiais apresentam microfissuras preenchidas por minerais de alteração ou hidrotermais, ou seja, uma heterogeneidade em escala microscópica. Portanto são mais propícios a variações neste ensaio, que já apresenta uma configuração favorável a isso, pois os extensômetros somente realizam medições de deformações na sua faixa de instalação.

Tabela 4-12: Resultados da determinação das constantes elásticas para o monzodiorito de granulação fina a média (MON_M).

Litotipo	CP	E (GPa)	ν
MON_M	1	123,87	0,26
	2	131,23	0,28
	3	124,98	0,30
	Média	126,69	0,28
	Desvio Padrão	3,97	0,02
	Coeficiente de Variação	3,13 (%)	6,09 (%)

Tabela 4-13: Resultados da determinação das constantes elásticas para o monzodiorito de granulação fina a média (MON_{MG}).

Litotipo	CP	E (GPa)	ν
MON_{MG}	1	120,70	0,31
	2	119,08	0,28
	3	127,21	0,26
	Média	122,33	0,28
	Desvio Padrão	4,30	0,03
	Coeficiente de Variação	3,28 (%)	9,03 (%)

4.4.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL

Este teste mesmo tendo maior viés em estudos geomecânicos, trata-se de uma propriedade mecânica essencial para estudos geotécnicos de obras, configurando uma caracterização completa dos materiais rochosos.

Os valores de carregamento máximo e resistência a tração (σ_T) do basalto (BAS) e diabásio (DIA) estão organizados nas Tabelas 4-14 e 4-15. O primeiro material em questão apresentou resistência a tração média de 15,31 MPa, já o segundo 14,38 MPa.

Tabela 4-14. Resultados dos ensaios de compressão diametral do basalto (BAS).

Litotipo	CP	Carregamento Máximo (kN)	σ_T (MPa)
BAS	1	30,83	13,48
	2	41,29	16,39
	3	39,04	14,56
	4	37,11	14,26
	5	44,44	17,86
		Média	15,31
		Desvio Padrão	1,78
		Coeficiente de Variação	11,62 %

Tabela 4-15. Resultados dos ensaios de compressão diametral do diabásio (DIA)

Litotipo	CP	Carregamento Máximo (kN)	σ_T (MPa)
DIA	1	37,30	14,34
	2	36,11	13,82
	3	43,24	16,57
	4	41,80	16,09
	5	29,75	11,10
		Média	14,38
		Desvio Padrão	2,17
		Coeficiente de Variação	15,06 %

No caso das rochas mais grosseiras, monzodioritos, os resultados e taxas de carregamento máximos são apresentados nas Tabelas 4-16 e 4-17. Constata-se que os valores de resistência a tração (σ_T) em média são praticamente os mesmos, o monzodiorito mais fino (MON_M) apresentou uma resistência de 12,59 MPa, e o MON_{MG} 12,74 MPa.

Tabela 4-16. Resultados dos ensaios de compressão diametral do monzodiorito (MON_M)

Litotipo	CP	Carregamento Máximo (kN)	σ_T (MPa)
MD_M	1	35,75	13,45
	2	35,09	13,21
	3	32,58	12,21
	4	34,45	12,96
	5	29,79	11,13
		Média	12,59
		Desvio Padrão	0,94
		Coeficiente de Variação	7,45 %

Os resultados dos ensaios de compressão diametral demonstraram que, essencialmente as rochas apresentam valores relativamente altos de resistência, havendo uma tendência à queda de resistência para as rochas de maior granulação.

Tabela 4-17. Resultados dos ensaios de compressão diametral do monzodiorito (MON_{MG}).

Litotipo	CP	Carregamento Máximo (kN)	σ_t (MPa)
MD _{MG}	1	32,79	12,55
	2	35,74	13,63
	3	33,29	12,93
	4	30,93	11,68
	5	33,67	12,93
		Média	12,74
		Desvio Padrão	0,71
		Coeficiente de Variação	5,59 %

4.4.3. ABRASÃO LOS ANGELES

Os ensaios de Abrasão Los Angeles foram realizados em agregados de duas faixas granulométricas, e apresentam valores em porcentagem de perdas de massa. A Tabela 4-18 apresenta os resultados da faixa B, sendo a rocha mais resistente o basalto maciço (BAS), comportamento esperado. Os resultados da faixa C são relativamente maiores que os da faixa B, devido as configurações de ensaio.

Outra vez comprova-se a qualidade dos materiais de estudos, visto que os índices ALA representam pequenas perdas de massa. No entanto cabe salientar que este ensaio é o mais difundido na caracterização de agregados para construção civil, portanto trata-se de um método rotineiro que avalia em essência a durabilidade de fragmentos rochosos em solicitações de atrito e impacto, representando o desempenho dos materiais com certas limitações.

Tabela 4-18: Resultados dos ensaios de Abrasão Los Angeles

Litotipo	Graduação B			Graduação C		
	M _i (g)	M _f (g)	ALA _B (%)	M _i (g)	M _f (g)	ALA _C (%)
BAS	5006,31	4415,57	11,8	5005,45	4336,64	13,4
DIA	5008,96	4365,42	12,8	5002,45	4212,40	15,8
MD _M	5004,38	4267,89	14,7	5003,47	4187,91	16,3
MD _{MG}	5007,61	481,36	16,5	5007,34	4085,99	18,4

Legenda: M_i: Massa inicial - M_f: Massa final – ALA_B: Resistência a Abrasão Los Angeles faixa “B” – ALA_C: Resistência a Abrasão Los Angeles faixa “C”.

4.4.4. RESISTÊNCIA DO AGREGADO GRÁUDO POR ABRASÃO AO MICRO-DEVAL

De acordo com a Tabela 4-19 os resultados para os ensaios de Micro Deval na graduação A, foram inferiores a 10%, não limitando estes materiais para nenhuma aplicação. Portanto este método comprova a excelente qualidade mecânica destes materiais rochosos. Os resultados na faixa granulométrica B, em comparação a faixa A são maiores, ou seja, apresentaram mais perda de massa. Entretanto

também são inferiores a qualquer limite da norma americana D6927 (ASTM, 2017), previamente mencionados no item 2.3.1.3. (Tabela 2-14).

Como constatado em outros ensaios mecânicos em agregados, estes resultados mostram uma inclinação na queda de resistência para as rochas de maior granulação. Mesmo que o monzodiorito (MON_M) apresente menor perda de massa que o MON_{MG} , que apresenta cristais relativamente maiores. Esta nuance nos resultados dos ensaios realizados também pode ter influência de outras variáveis como a heterogeneidades das britas testadas. Portanto são dados importantes a respeito para aplicação destes materiais pétreos.

Tabela 4-19: Resultados dos ensaios de Micro Deval na graduação A e B.

Litotipo	Graduação A			Graduação B		
	Mi_{MDE} (g)	Mf_{MDE} (g)	MDE_A (%)	Mi_{MDE} (g)	Mf_{MDE} (g)	MDE_B (%)
BAS	1501,41	1438,96	4,16	1500,89	1398,15	6,85
DIA	1501,37	1424,32	5,13	1501,33	1387,43	7,59
MD _M	1501,27	1399,88	6,75	1500,85	1362,28	9,23
MD _{MG}	1501,62	1403,48	6,54	1501,69	1368,17	8,89

Legenda: Mi_{MDE}: Massa inicial do ensaio Micro-Deval - Mf_{MDE}: Massa final do ensaio Micro-Deval – MDE_A: Índice de Micro-Deval faixa “B” – MDE_B: Resistência a Abrasão Los Angeles faixa “C”.

No tocante ao ensaio, algumas observações foram notadas, principalmente a respeito do desgaste superficial que o ensaio promoveu nos fragmentos rochosos (Figura 4-20). A rugosidade dos agregados foi muito alterada, de modo que as britas ao final do ensaio têm as superfícies praticamente lisas e com poucas irregularidades, ou seja, arestas angulosas. Parâmetros obtidos por Wang *et al* (2015), em análises 2D e 3D, indicam que a angularidade diminui bruscamente em agregados após ensaios pelo Micro-Deval. Sendo assim estes ensaios confirmam algumas das experiências internacionais sobre o equipamento. O Anexo C apresenta figuras com o aspecto de uma amostra do basalto anterior e posterior ao ensaio em questão.

Figura 4-20: (A) Aspecto superficial rugoso nos agregados de basalto anteriores ao ensaio de Micro-Deval (graduação A); (B) Aspecto superficial liso nos agregados (BAS) após sofrerem desgaste pelo ensaio de Micro-Deval (graduação A).

4.4.5. RESISTÊNCIA AO ESMAGAMENTO

As massas e resultados calculados para todos os ensaios estão organizados na Tabela 4--20. Os materiais rochosos apresentam baixos índices de perda de massa, comprovando mais uma vez a excelente qualidade. Nota-se que os resultados nestes ensaios são muito próximos, no caso do diabásio e monzodiorito de granulação média são praticamente os mesmos. Entretanto as resistências ainda têm correlação direta com a granulação das rochas, ou seja, rochas com cristais mais finos são mais resistentes.

Tabela 4-20. Resultados dos ensaios de resistência ao esmagamento.

Litotipo	Primeira Amostra			Segunda Amostra			R _m (%)
	Mi (g)	Mf (g)	R (%)	Mi (g)	Mf (g)	R (%)	
BAS	2797,40	2461,40	12,0	2802,20	2497,00	10,9	11,5
DIA	2849,00	2456,30	13,8	2822,40	2448,70	13,2	13,5
MD _M	2786,50	2402,20	13,8	2884,90	2499,20	13,4	13,6
MD _{MG}	2834,20	2415,60	14,8	2827,50	2417,90	14,5	14,6

Legenda: Mi: Massa inicial da amostra de resistência ao esmagamento; Mf: Massa final da amostra de resistência ao esmagamento; R: Resistência calculada para uma amostra; R_m: Resistência média ao esmagamento.

4.4.6. RESISTÊNCIA AO IMPACTO TRETON

O ensaio de impacto treton é amplamente utilizado para qualificar materiais para lastro, pois trata-se de um método que fragmenta os agregados com quedas sucessivas de um martelo, situação próxima de carregamentos dinâmicos em ferrovias. Desta forma trata-se de um ensaio muito agressivo. Os cálculos de ensaios estão apresentados na Tabela 4-21 para todos os litotipos. Observa-se que o basalto

(BAS) apresenta menor índice (6,57 %), já a rocha de granulação mais grossa apresenta 13,22%, portanto é o ensaio que denota maior influência da textura e granulação nos resultados.

Tabela 4-21. Resultados dos ensaios de Impacto Treton.

Litotipo	Massas	Primeira Amostra	Segunda Amostra	Terceira Amostra	T _m (%)
BAS	M _{ti} (g)	187,89	197,22	209,44	6,57
	M _{tf} (g)	172,07	186,99	196,3	
	T (%)	8,42	5,19	6,12	
DIA	M _{ti} (g)	193,92	192,61	197,73	10,19
	M _{tf} (g)	173,83	172,6	178,33	
	T (%)	10,36	10,39	9,81	
MD _M	M _{ti} (g)	192,59	196,62	201,04	10,99
	M _{tf} (g)	171,62	174,45	179,33	
	T (%)	10,89	11,28	10,80	
MD _{MG}	M _{ti} (g)	181,22	182,99	191,99	13,42
	M _{tf} (g)	157,33	158,32	165,89	
	T (%)	13,18	13,48	13,59	

Legenda: M_{ti}: Massa inicial de um CP de ensaio impacto Treton; M_{tf}: Massa final de um CP de ensaio de impacto Treton; T: Resistência de um CP; T_m Resistência média calculada.

4.5. SÍNTESE DAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS

Os ensaios apresentados nos itens 4.3 e 4.4 compõe as propriedades físico-mecânicas que apresentam relações diretas com as características petrográficas, tais como composição mineralógica, textura, estruturas e tamanho de cristais dos quatro magmatitos de estudo. A Tabela 4-22 apresenta a síntese de resultados destas propriedades em questão.

No tocante as propriedades físicas, as rochas apresentaram peso específico e porosidade aparentes altos para as aplicações do estudo. São dados típicos de materiais rochosos cristalinos e de baixo grau de alteração intempérica, ou seja, materiais do ponto de vista físico bons para utilização como agregados em obras de engenharia. Ainda assim há nuances já comentadas no item 4.3. que afetam a fabricação de concretos asfálticos, isso se deve principalmente ao conteúdo de minerais félsicos crescente com o distanciamento da borda da intrusão. O reflexo desta variação geológica são alterações no peso específico, portanto esta propriedade torna-se importante no planejamento e operações da indústria, convergindo com a necessidade latente de um zoneamento geológico na pedreira de modo a atender a um mercado consumidor cada vez mais exigente.

As propriedades de rocha intacta refletem características de materiais de resistências e rigidez altas. De acordo com a classificação da ISRM (1978) que utiliza

de valores de RCU (MPa) o basalto (BAS) é uma rocha extremamente resistente, enquanto os outros três litotipos são considerados rochas muito resistentes. No entanto, há decréscimo de RCU e resistência a tração indireta em vista do aumento do tamanho dos cristais. Já o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson variam menos, demonstrando uma certa inclinação à deformabilidades inferiores de acordo com o aumento de granulação. Todavia são valores muito acima do que os sugeridos por autores, sob esta perspectiva estes materiais são excelentes.

Não diferente dos resultados das propriedades geomecânicas de rocha intacta, os ensaios em agregados demonstraram a mesma excelência visando as aplicações de estudo. Ainda cabe ressaltar que estes resultados têm influência de características petrográficas, ou seja, as maiores resistências estão associadas aos materiais mais finos.

Tabela 4-22: Síntese de resultados dos ensaios físico-mecânicos para os litotipos de estudo.

Propriedades		BAS	DIA	MON_M	MON_{MG}
Índices Físicos	ρ_a (g/cm³)	2993	2949	2871	2884
	η_a (%)	0,60	0,69	0,86	0,79
	σ_c (MPa)	277,33	221,49	206,02	197,79
	σ_T (MPa)	15,31	14,38	12,59	12,74
	E (GPa)	131,79	123,48	126,69	122,33
	ν	0,25	0,29	0,28	0,28
Propriedades Mecânicas	ALA_B (%)	11,8	12,8	14,7	16,5
	ALA_C (%)	13,4	15,8	16,3	18,4
	MDE_A (%)	4,16	5,13	6,75	6,54
	MDE_B (%)	6,85	7,59	9,23	8,89
	R_m (%)	11,5	13,5	13,6	14,6
	T_m (%)	6,60	10,2	11	13,4

Legenda: ρ_a : peso específico aparente; η_a : porosidade aparente; σ_c : Resistência a compressão uniaxial; σ_T : Resistência a tração indireta; E: módulo de elasticidade; ν : coeficiente de Poisson; ALA_B: Abrasão Los Angeles graduação B; ALA_C: abrasão Los Angeles graduação C; MDE_A: Micro-Deval graduação A; MDE_B: Micro-Deval graduação B; R_m: Resistência ao esmagamento; T_m: Resistência ao Impacto Tretón.

4.6. ALTERAÇÃO ACELERADA: AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE PELO EMPREGO DE SOLUÇÕES DE SULFATO DE SÓDIO

Apesar de ser um ensaio muito usual para caracterização de agregados, este procedimento é alvo de críticas segundo Fiorentini (2002) ligadas a avaliação da durabilidade de materiais rochosos diante das condições climáticas como as do Brasil (tropical a temperado). Isto se deve a este ensaio tem maior representatividade em regiões onde há atuação de gelo e degelo principalmente.

Entretanto observadas as limitações e prerrogativas do respeito do método de laboratório, realizou-se este ensaio de modo comparativo e para se obter uma caracterização completa dos materiais, tendo em vista o foco do presente trabalho.

Os resultados calculados são referentes a perda de massa em porcentagem de materiais passantes nas peneiras de seleção da granulometria do ensaio. Também há a correção na perda de massa, com base na distribuição granulométrica da alíquota de ensaio, ou seja, proporcional a porcentagem das frações do agregado (antes da realização do ensaio). As massas e resultados calculados realizados nas amostras do basalto (BAS) são apresentados nas Tabelas 4-23, nota-se que são valores muito baixo de perda, menos de 1%.

Tabela 4-23. Resultados do ensaio de Sanidade no Sulfato para o BAS

Granulometria Amostra BAS		Massa das Frações Antes do Ensaio	Porcentagem do Agregado Total (%)	Porcentagem que passa na peneira original retida (%)	Perda Corrigida (%)
Passando (mm)	Retido (mm)				
19,00	9,5	1002,39	76,77	0,59	0,45
9,5	4,8	303,40	23,23	0,98	0,23
Totais:		1305,79	100,00	1,56	0,68

De acordo com a Tabela 4-24 os resultados totais de perda de massa na peneira original (retida anterior ao ensaio) foram 2,21 %, entretanto a correção é menor e apresentou valor de 1,14 % para o diabásio.

Tabela 4-24. Resultados do ensaio de Sanidade no Sulfato para o diabásio DIA.

Granulometria Amostra DIA		Peso das Frações Antes do Ensaio	Porcentagem do Agregado Total (%)	Porcentagem que passa na peneira original retida (%)	Perda Corrigida (%)
Passando (mm)	Retido (mm)				
19,00	9,50	1006,43	76,89	1,17	0,90
9,50	4,80	302,50	23,11	1,04	0,24
Totais:		1308,93	100,00	2,21	1,14

As massas e resultados calculados para os monozodioritos (MD_M e MD_{MG}) são apresentados nas tabelas 4-25 e 4-26. Neste ensaio a diferença é mais evidente, havendo uma tendência de menor resistência no caso do MD_{MG} que apresentou perda corrigida total de 2,01 %.

Tabela 4-25. Resultados do ensaio de Sanidade no Sulfato para o MD_M

Granulometria da Amostra MD_M		Peso das Frações Antes do Ensaio	Porcentagem do Agregado Total (%)	Porcentagem que passa na peneira original retida (%)	Perda Corrigida (%)
Passando (mm)	Retido (mm)				
19,00	9,50	1002,48	76,81	1,03	0,79

9,50	4,80	302,73	23,19	1,28	0,30
Totais:		1305,21	100,00	2,31	1,09

Tabela 4-26. Resultados do ensaio de Sanidade no Sulfato para o MD_{MG}

Granulometria da Amostra MD _{MG}		Peso das Frações Antes do Ensaio	Percentagem do Agregado Total (%)	Percentagem que passa na peneira original retida (%)	Perda Corrigida (%)
Passando (mm)	Retido (mm)				
19,00	9,50	1002,02	76,71	1,63	1,25
9,50	4,80	302,78	23,21	3,26	0,76
Totais:		1304,80	100,00	4,89	2,01

De modo geral os resultados foram relativamente baixos, e seguem uma tendência de maiores alterações em rochas de granulação maior. Também há uma relação direta na absorção de água, pois este ensaio satura os agregados em soluções de sulfato de sódio. No entanto, observações mais significativas visuais nas perdas de massa dos materiais, pós ensaio, ocorreram somente no monzodiorito (MON_{MG}). Este material ensaiado na graduação "C", conforme norma passante na peneira de abertura de 19,00 mm e retido da de abertura 9,5 mm, apresentou perda de 1,63% em massa, de modo que o material perdido na peneira de abertura 9,5 mm pôde ser observado em 1 escala macroscópica com facilidade, Figura 4-21.

Figura 4-21 (A) Amostra do monzodiorito de granulação fina a grossa (MON_{MG}), na graduação C (passante na peneira com abertura de 19,00 mm e retido na de 9,5 mm) do ensaio após peneiramento. (B) Material perdido na peneira de abertura 9.5 mm, perda de 1,63%.

4.7. ENSAIOS NA PRESENÇA DE LIGANTES

Com objetivo de se avaliar o desempenho dos materiais de estudo em aplicações em concretos hidráulicos e asfálticos, estes ensaios são essenciais,

podendo apresentar resultados que indiquem a necessidade de uso de aditivos para melhor estabilidade e durabilidade dos materiais em questão. Portanto, nota-se a extrema importância destes ensaios em uma caracterização de agregados, pois esta poderá contribuir com limites ou até mesmo indicar tratamentos com aditivos químicos em misturas.

Em aplicações de reação álcali-agregados (RAA), a norma nacional vigente é a NBR 15577-3 (ABNT, 2018), que utiliza de um método acelerado que avalia a expansão de barras de argamassa. Os resultados deste ensaio, valores adimensionais de expansão, são calculados a partir de dados de leituras em relógios comparadores. Desta forma, pode-se analisar os valores em relação ao limite normativo e, se necessário, recomendar-se medidas preventivas para mitigar possíveis problemas de RAA.

A adesividade a ligantes asfálticos é avaliada visualmente, de modo que sejam notados descolamentos da película de asfalto, parcial ou total. Assim sendo qualquer deslocamento, mesmo que seja em poucos agregados, torna o material pétreo não satisfatório para o ligante segundo a norma NBR 12583 (ABNT, 2017). Fotografias dos materiais de ensaios encontram-se no ANEXO C.

4.7.1. REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: MÉTODO ACELERADO DE BARRAS DE ARGAMASSA

Os resultados destes ensaios são de fato os mais significativos, pois apresentam valores, que se analisados comparativamente entre as rochas estudadas, demonstram que somente uma rocha é potencialmente inócua (Figura 4-22). Entretanto, também demonstram uma certa contaminação de minerais deletérios, no caso do monzodiorito (MON_{MG}), causada pela presença de veios aplíticos, que possuem quartzo microcristalino mineral reativo. Os resultados constatados para esta litologia foram os de maior expansão nas barras de argamassa. Contudo, considerando a mineralogia essencial (primária) do material pétreo em questão não foram identificadas outras fases reativas. Ainda sobre os magmatitos mais internos da intrusão, o monzodiorito (MON_M) não apresentou fase mineral considerada de risco à RAA, mesmo comportamento foi observado no perfil de expansão desta rocha no ensaio (inócua à RAA). Estas análises relativas às duas rochas ao centro da intrusão mostram que a possibilidade da contaminação de minerais reativos do MON_{MG}, pode na realidade atingir parte expressiva do maciço rochoso. Isto se deve a distribuição

dos veios aplíticos, que segundo Lino (2015) ocorrem desde a borda de transição (diabásio) até ao núcleo da intrusão (quartzo-monzodiorito), portanto esta hipótese requer atenção no referente à utilização da pedra britada para fabricação de concretos.

O basalto (BAS), que apresenta principalmente a matriz vítrea considerada como fase mineralógica potencialmente reativa, tem resultado positivo para possibilidade de RAA nos ensaios em barra de argamassa. Já no diabásio (DIA), o qual teve mesmo resultado de expansão superior ao limite da norma nacional, em contrapartida, não foram identificados microscopicamente minerais que poderiam reagir com álcalis de cimento *Portland*, produzindo gel expansivo.

Quitete *et al* (2013) também analisaram rochas que apresentaram comportamento similar ao diabásio, sem apresentar minerais reativos em análises petrográficas e com resultados positivos nos ensaios acelerados. Segundo estes autores, há a possibilidade de que os ensaios de RAA, não medem somente a expansão das barras de argamassas por formação de gel expansivo, mas também devido ao inchamento dos argilominerais do grupo da esmectita, fenômeno causado por absorção de água. Portanto torna-se necessário maior detalhamento petrográfico e mineralógico sobre os argilominerais desta rocha.

Tendo em vista estes resultados de potencialidade à RAA em três dos materiais de estudo, as etapas de mitigação de RAA devem ser seguidas conforme a NBR 15771-1 e NBR 15577-5. Ainda há a possibilidade de reavaliação do potencial destas rochas também pelos métodos: acelerado dos prismas de concreto (em 90 dias) e pelo de longa duração dos prismas de concreto (1 ano).

Figura 4-22: Gráfico com os resultados dos ensaios de RAA, método acelerado de barras de argamassa NBR 15577-4 (ABNT, 2018).

4.7.2. ADESIVIDADE AO LIGANTE ASFÁLTICO

Após a realização dos procedimentos típicos de ensaio, o conjunto resultante dos agregados com a mistura de cimento asfáltico foi retirado dos recipientes (béqueres) e dispostos em fundo branco. Este procedimento foi realizado para otimizar a análise visual dos materiais ensaiados, e também para possibilitar fotografias com a alíquota total disposta para detalhamentos pontuais.

Os resultados para todos os litotipos foram não satisfatórios, de modo que houveram deslocamentos de ligantes em todos os casos. Para este ensaio nota-se uma tendência maior nas rochas como diabásio e monzodioritos de não aderência ao ligante, Figuras 4-23 e 4-24, em comparação ao basalto. Isto se deve principalmente à composição mineralógica das rochas, mas também são notadas diferenças texturais e de tamanho de cristais principalmente com o basalto.

Assim como a classificação química das rochas também deve ser considerada, os dados de outros autores corroboram com estas nuances nos resultados, pois as rochas intermediárias e ácidas apresentaram pior aderência ao ligante. Procedimentos de *dopping* devem ser executados, para aplicação destes

materiais em outras de engenharia, tendo visto os resultados não satisfatórios dos materiais rochosos.

Figura 4-23. Fotografias dos materiais nos ensaios de adesividade, mostrando partículas com descolamento: (A) diabásio, (B) monzodiorito médio e (C) monzodiorito grosso.

Figura 4-24. Descolamentos do CAP no basalto (BAS), em detalhe amarelo tracejado.

4.8. APLICAÇÃO DOS MATERIAIS PÉTREOS EM CONCRETOS

A presente pesquisa tem como objetivo a avaliação dos materiais pétreos da Intrusão de Limeira, visando aplicação como agregados em obras de engenharia, especialmente para composição de concretos hidráulicos de cimento *Portland* e concretos asfálticos para pavimentação. Como já citado, são as duas finalidades maiores de agregados na construção civil, se aplicando também ao caso do maciço em questão que é explorado por duas pedreiras. Com base nestas premissas, informações condizentes foram compiladas de normas brasileiras e internacionais, conforme apresentado na Tabela 4-27. Adicionalmente a norma referente ao uso como base e sub-base de pavimentos é comparada, mesmo que esta aplicação seja menos nobre na área de infra-estrutura de transportes, ainda assim considerando-se correta esta avaliação.

Os resultados dos ensaios realizados estão apresentados na Tabela 4-28, e também no ANEXO D. Em relação às propriedades mecânicas (Abrasão Los Angeles e Resistência ao Esmagamento), os materiais apresentaram índices inferiores a 20%, ou seja, muito abaixo dos limites. Os ensaios de durabilidade realizado em solução de sulfato de sódio apresentaram perdas corrigidas em torno de 0,5 a 2%, também passando nos limites. Destaca-se que estes valores se referem para todos os usos (concretos, base e sub-base). Estes aspectos mais uma vez comprovam a excelente qualidade destas rochas em quesitos mecânicos, principalmente.

Por outro lado, os ensaios na presença de ligantes notoriamente apresentaram certos comportamentos que exigem um maior cuidado. No caso dos concretos de cimento *Portland*, a norma DNER-ME 037 /97 (DNER, 1997) não apresenta um método de averiguação de ensaio como o caso da NBR 7211 (ABNT, 2009) o "Guia para avaliação de RAA potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto" da NBR 15577-1 (ABNT, 2008). A consulta a norma americana C33/C33M (ASTM, 2016) traz a informação de que, no caso da exigência do comprador, se requer que os estudos de RAA devem seguir outro guia da ASTM. Sendo assim, a normalização ABNT torna-se importante, tratando-se de um método avaliativo em vigor. Ainda que esteja desatualizada a exigência na NBR 7211 (ABNT, 2009), pois esta especifica a versão de 2008 para investigação e mitigação de RAA, a versão nova NBR 155577 (ABNT, 2018) apresenta algumas mudanças já apresentadas no item 2.3.1.7.

Nesta perspectiva os resultados obtidos por estes ensaios são relevantes contribuindo para o conhecimento do método de avaliação quanto à possibilidade de RAA, e também para o estudo das rochas da Intrusão de Limeira. Desta forma nota-se na Tabela 4-28 que somente o monzodioritos MON_M teve resultado negativo para este ensaio, sendo considerado potencialmente inócuo de grau R0, sendo o único material que não tem restrições em quaisquer que seja o concreto com este agregado. Já o basalto (BAS), o diabásio (DIA) e o monzodiorito (MON_{MG}) foram classificados como grau R1 e potencialmente reativos. Para estes materiais, a norma NBR 15577-1 apresenta uma tabela quanto ao uso em concretos (Tabela 2.7).

A avaliação em concretos asfálticos também conta com um ensaio específico em meio de ligantes, o de adesividade. Como trata-se de um método avaliativo visual, todos os resultados apresentados são insatisfatórios. Entretanto, no caso do basalto (BAS) notou-se que houve melhor aderência do que nos outros materiais pesquisados. Esta informação é um conhecimento básico para estudos de *dopping*, ou como a norma se refere como "melhorador de adesividade".

Todos estes resultados são essenciais para caracterização e controle mais acurado dos materiais rochosos quando se propõe o emprego em obras de engenharia. Portanto trata-se de uma contribuição científica para este setor de mineração e o de construção civil que se utiliza de britas.

Ressalta-se, ainda, que outros métodos de caracterização foram realizados, e que contribuem amplamente para caracterização destes materiais como agregados, mas também com estudos geomecânicos, cujos dados podem também subsidiar pesquisas sobre o comportamento do maciço rochoso frente a escavações e desmontes.

Tabela 4-27: Sumário de normas e limites exigidos para aplicações de estudo.

Tabela 4-27. Síntese de Normas e Limites Exigidos para Aplicações de Estrada.						
Aplicações/Limites		Abrasão Los Angeles	Resistência ao esmagamento	Durabilidade: em soluções de sulfatos	Adesividade	RAA – Método Acelerado
Concreto de cimento Portland	DNER-ME 037/97: Agregado graúdo para concreto de cimento	Inferior a 50%	Inferior a 65%, para concretos superficiais. E para outros concretos deve ser inferior a 55%	Inferior a 12% em 5 ciclos.	Não se aplica	Não deve apresentar qualquer reatividade que cause expansão. Exceto em casos que o cimento empregado contenha menos que 0,6% de equivalente alcalino
	ABNT NBR 7211 2009 - Agregados para concreto - especificações	Inferior a 50%	Ensaio especial	Não se aplica	Não se aplica	Atender as exigências da ABNT NBR 15577-1 2008.
	ASTM C33/C33M Standard Specification for Concrete Aggregates	Inferior a 50%	Não se aplica	Inferior a 12%	Não se aplica	Quando exigido pelo comprador deverá seguir a ASTM C1778
Concreto asfáltico	DNIT 031/2004 Pavimentos flexíveis: Concreto asfáltico	Inferior a 50%	Não se aplica	Inferior a 12%	Não havendo boa adesividade pode ser empregado melhorador de adesividade.	Não se aplica
Base ou sub-base	ABNT NBR 11803 - Materiais para base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento	Inferior a 40%	Não se aplica	20% sulfato de sódio e 30% sulfato de magnésio.	Não se aplica	Não se aplica

Tabela 4-28: Sumário dos resultados dos ensaios tecnológicos desenvolvidos no presente estudo.

Propriedades Tecnológicas		BAS	DIA	MON _M	MON _{MG}
Aspectos Petrográficos	Composição Mineralógica	Matriz Vítrea (80%), Plagioclásio (10%) e Augita (10%).	Plagioclásio (45%), Augita (30%, Opacos (15%), Clorita/Esmeclita (9%) e Apatita (1%)	Plagioclásio (45%), Clinopiroxênio (34%), Opacos (12%), Agregados minerais (7%), Apatita (2%).	Plagioclásio (38%), Clinopiroxênio (30%), Opacos (12%), Agregados minerais (18%), Apatita (2%).
	Estruturas	Maciça	Maciça	Maciça	Maciça, cortada por veios de riolito
	Texturas	Hialofítica, sub-ofítica e ofítica.	Intergranular, ofítica e sub-ofítica.	Intergranular, ofítica, sub-ofítica	Intergranular, ofítica, sub-ofítica
	Granulação	Muito Fina a Fina	Fina	Fina a Média	Fina a Grossa
Índices Físicos	ρ_a (kg/m³)	2,993	2,949	2,871	2,884
	η_a (%)	0,60	0,69	0,86	0,79
	σ_c (MPa)	277,33	221,49	206,02	197,79
Mecânicas	σ_T (MPa)	15,31	14,38	11,13	12,74
	ALA _B (%)	11,8	12,8	14,7	16,5
	ALA _C (%)	13,4	15,8	16,3	18,4
	MD _A (%)	4,16	5,13	6,75	6,54
	MD _B (%)	6,85	7,59	9,23	8,89
	R _m (%)	11,5	13,5	13,6	14,6
	Média T _m (%)	6,60	10,2	11	13,4
Alteração Acelerada	Perda Corrigida (%)	0,68	1,14	1,09	2,01
Ensaio em Presença de Ligantes	Adesividade ao ligante betuminoso	Insatisfatório, com pequenos deslocamentos	Insatisfatório	Insatisfatório	Insatisfatório
	RAA- Método Acelerado de barras de argamassa	Expansão ao final dos 30 dias: 0,29. Potencialmente Reativo grau: R1	Expansão ao final dos 30 dias: 0,26. Potencialmente Reativo: grau R1	Expansão ao final dos 30 dias: 0,17. Potencialmente Inócuo: grau R0	Expansão ao final dos 30 dias: 0,29. Potencialmente Reativo: grau R1

Legenda: BAS: Basalto; DIA – Diabásio; MON_M: monzodiorito de granulação fina a média; MON_{MG}: Monzodiorito de granulação fina a grossa; ρ_a : peso específico aparente; η_a : porosidade aparente; σ_c : Resistência a compressão uniaxial; σ_T : Resistência a tração indireta; ALA_B: Abrasão Los Angeles graduação B; ALA_C: abrasão Los Angeles graduação C; MDE_A: Micro-Deval graduação A; MDE_B: Micro-Deval graduação B; R_m: Resistência ao esmagamento; T_m: Resistência ao Impacto Treton.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Partindo-se de informações iniciais encontradas em trabalhos anteriores a este, principalmente os de cunho geológico, percebe-se a necessidade de um estudo de caráter tecnológico que avaliasse diferentes rochas da Intrusão de Limeira. As observações já das primeiras visitas à cava da pedreira investigada indicaram que os diferentes materiais rochosos aflorantes, encaixados em arenitos do Grupo Itararé, apresentavam características petrográficas distintas e marcantes. Estas constatações nortearam ideias para o desenvolvimento da presente pesquisa de mestrado.

Com base nos modelos geológicos e na evolução magmática propostos por Faria (2008), Lino (2015) e Lino *et al* (2018) é possível observar dois processos geológicos fundamentais: o de cristalização fracionada e o de hidrotermalismo tardi magmático. Parte destes processos foram identificados tanto em campo como nas análises petrográficas, sendo os grandes responsáveis pela variabilidade de materiais rochosos. Portanto, são essenciais para compreensão dos resultados e correlações entre ensaios tecnológicos.

De maneira geral, os ensaios realizados resultaram em índices relativamente bons a excelentes nos aspectos mecânicos e de alteração. No entanto, há variações nestes resultados que se relacionam com as características mineralógicas das rochas (granulação, textura, condições de microfissuramento, etc.), perfazendo assim contribuições aos estudos de materiais pétreos. Também é importante destacar que a escolha dos testes laboratoriais se focou nos principais métodos avaliativos, logo os materiais pétreos foram caracterizados mecanicamente em diversas solicitações. Sendo assim têm-se uma série de dados relevantes principalmente nos quesitos mecânicos.

Em termos de propriedades físicas, as informações verbais de técnicos da empresa (pedreira), que além de produzir brita também elabora concretos asfálticos, a respeito de variações na densidade foram confirmadas também em laboratório. Aparentemente, os resultados destes ensaios não variam muito nos litotipos, pois apresentam pesos específicos altos, no entanto a diferença na segunda casa decimal pode ser decisiva para dosagem de materiais na usina de asfalto. Fatos estes que revelam a necessidade da contextualização geológica nos ensaios de

caracterização de agregados, pois os métodos para obtenção de índices físicos (aparentes) em rochas são relativamente simples, porém sem informação petrográfica e de “procedência” são somente dados que não geram informações relevantes para esta indústria.

O destino final dos agregados produzidos no maciço investigado é principalmente em composição de concretos hidráulicos e asfálticos, portanto estudos das reações entre ligantes e rochas foram necessários e relevantes. Estudos estes que confirmaram a potencialidade de algumas das rochas para reação álcali-agregado. Sendo que o basalto e o monzodiorito (MON_{MG}) foram os materiais que apresentaram minerais reativos, e tiveram resultados positivos quanto à RAA nos ensaios acelerados com barras de argamassa. A primeira rocha tem como fase mineral deletéria principalmente vidro vulcânico (35%). Já a segunda é cortada por veios de riolito, sendo que este resultado corrobora uma hipótese de que parte considerável do corpo geológico possa ser reativo, visto que os veios de riolito são frequentes na intrusão.

O diabásio também tem comportamento reativo no ensaio acelerado. Entretanto microscopicamente não apresentou nenhum mineral deletério, o mesmo acontece com o monzodiorito (MON_M) em lâmina, porém diferentemente do diabásio, não houve manifestação de expansão suficiente para potencialidade à RAA. Outra questão importante neste aspecto é o grau de reatividade das rochas, pois este tem relação direta com o concreto e ambiente de exposição, portanto deve-se levado em conta isso para exigir adequação aos usos.

Quanto a aderência de cimentos asfálticos de petróleo nos agregados, todos litotipos tiveram resultados não satisfatórios. Somente no basalto, rocha básica, poucos e pequenos deslocamentos do ligante ocorreram. Este ensaio tem avaliação visual, ou seja, ao se detectar qualquer superfície de agregado que não proporcione aderência ao ligante, o material é classificado como não satisfatório. Uma explicação plausível para o comportamento das rochas de estudo é a classificação química de rochas, pois geralmente rochas básicas tendem apresentar melhor aderência com ligantes asfálticos. Ainda sobre este método laboratorial, vale a pena frisar que se trata de um teste rotineiro e consagrado na caracterização de agregados.

Portanto o presente trabalho alinhado as pesquisas geológicas realizadas, que trazem o contexto genético da intrusão, trata-se um subsídio para uma exploração mineral mais adequada, que selecione materiais mais homogêneos. Nesta perspectiva estudos de geologia *stricto sensu* são importantes para a engenharia que utiliza de agregados pétreos. Pois estas informações reunidas com uma devida caracterização tecnológica constituem sólidas ferramentas de controle avaliativo dos produtos destinados à construção civil.

Apesar deste estudo mostrar a necessidade do uso de métodos laboratoriais, que requerem uma maior quantidade de informações de geologia e tecnologia de rochas, ainda no meio profissional estas práticas são pouco difundidas. Portanto todos estes resultados e constatações podem enaltecer a necessidade de desenvolvimento de pesquisas neste sentido. Cabe destacar que o presente estudo foi delineado com base em amostragens pontuais de campo, que representam materiais típicos do maciço rochoso, podendo haver mais variedades de rochas, bem como heterogeneidades em meso e micro-escalas.

De um modo geral, é importante frisar que a variabilidade e diferenciações geológicas dos maciços rochosos podem incorrer em incertezas mesmo com dados integrados de campanhas de investigações. Neste sentido, a recomendação é a de sempre esmiuçar as informações da geologia de uma área de estudo, bem como o aprofundamento em métodos com escala adequada, uma vez que estes conhecimentos alinhados aos estudos de caracterização tecnológica de rochas geram resultados mais consistentes no sentido de aplicabilidade em obras de engenharia.

Levando-se em conta as heterogeneidades geológicas já explicitadas, verifica-se a importância de se acompanhar as etapas de operação minerária em pedreiras, notadamente desmonte e britagem, em razão de variações que não estejam previstas no modelo conceitual geológico concebido para um dado maciço. Idealmente, podem ser conjugados a utilização de equipamentos capazes de realizar ensaios em campo (*in situ*) e a coleta de amostras representativas para posterior realização de testes laboratoriais rotineiros.

A Intrusão de Limeira se enquadra bem nesta concepção de método para acompanhamento de operações minerárias, pois a grande variação de rochas e

conforme Lino (2015) também há diversas formas de contatos litológicos como: irregulares; laterais; sub-verticais; difusos. De modo que mesmo haja maior detalhamento geológico, por meio de mapeamento superficial e investigações do substrato rochoso, as etapas de desmontes não poderiam ser somente ser planejadas por informações como estas. Isto se deve a distribuição irregular das rochas, sendo que estas mesmas estão dispostas em camadas concêntricas, e ainda há finas camadas de basaltos em torno de 1 a 3 metros logo em contato com as rochas encaixantes, impossibilitando uma malha adequada para um desmonte. Portanto nestes casos o acompanhamento técnico de campo é essencial, proporcionando um controle adequado do material produzido em desmontes e posteriormente levado as etapas seguintes de britagem.

Por fim, os dados de ensaios tecnológicos obtidos poderão ser usados de uma maneira ampla, embora não substituam a necessidade da realização de caracterizações de agregados frequentemente. Também é importante reconhecer que a ordem de atividades desenvolvidas (realização de compilação de informações, atividades de campo e amostragens, preparação laboratorial de agregados e execução de ensaios) pode ser uma rotina que se aplique a outras situações em maciços rochosos diferentes.

5.1. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Complementação de análises geoquímicas (FRX) e mineralógicas (DRX) nos materiais de estudo, para classificação química e identificação de argilominerais;
- Levantamento geológico e sistemático de campo averiguando, em escala de detalhe adequada, atributos como variações litológicas, distribuições espaciais, contatos, granocrescência de cristais, feições de alteração intempérica;
- Juntamente com o levantamento geológico, realização de amostragem de outras variedades litológicas, para execução de análises petrográficas, geoquímicas (FRX), mineralógicas (DRX) e de ensaios na presença de ligantes (RAA e adesividade ao ligante betuminoso);

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR12583: Agregado graúdo - Verificação da adesividade a ligante betuminoso. 2017. Rio de Janeiro.
- ABNT NBR12584: Agregado múdo - Verificação da adesividade a ligante betuminoso. 2017. Rio de Janeiro.
- ABNT NBR NM 51: Agregados – Determinação da abrasão "Los Angeles" Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2001. 6p.
- ABNT NBR15577-1: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro Rio de Janeiro. 2018.
- ABNT NBR15577-2: Agregados - reatividade álcali-agregado - parte 2: coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostras de agregados para concreto. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro Rio de Janeiro. 2018.
- ABNT NBR15577-5: Agregados - reatividade álcali-agregado Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro Rio de Janeiro. 2018.
- ABNT NBR 15577-3: Agregados - Reatividade álcali-agregado - parte 3: análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro Rio de Janeiro. 2018.
- ABNT NBR15577-7: Agregados - reatividade álcali-agregado - parte 7: determinação da expansão em prismas de concreto pelo método acelerado. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro Rio de Janeiro. 2018.
- ABNT. NBR 7211. Agregados para concreto: Especificação, Rio de Janeiro, 2009.
- ABNT NBR 9938: Agregados – Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro Rio de Janeiro. 2013.
- ABNT. NBR 7225. Materiais de pedra e agregados naturais. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro Rio de Janeiro. 2009.
- ABNT NBR 9935. Agregados – Terminologia. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro Rio de Janeiro. 2011.
- ABNT NBR 5564: Via Férrea – Lastro-Padrão- Requisitos e Métodos de Ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2014.
- ABNT NBR 11803 - Materiais para base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2013.
- AIRES BARROS, L.. A análise modal e a definição de um índice de qualidade micropetrografica. Bol. Soc. Port. Cienc. Mat. v. XII. 105-1116p. 1969. Lisboa

- ALMEIDA, F.F.M. Síntese sobre a tectônica da Bacia do paraná. In: Simpósio Regional de Geologia, 2, 1981, São Paulo, Resumos. São Paulo. Sociedade Brasileira de Geologia, 1988
- ALMEIDA, A. S.. Métodos de Mineração. Cap. 5. In Mineração & Município: Bases para planejamento e gestão dos recursos minerais. IPT – Instituto de Pesquisas e Tecnológicas. P. 61- 85 . 2003.
- ANATASIO, S.; PÉREZ-FORTES, A.; SCIBILIA, E.; DANIELSEN, W..Relevant Petrological Properties and their Repercussions on the Final use of Aggregates. In Energy Procedia. v. 97. 546-553 p. 2016.
- ALEXANDER, M.; MINDESS, S..Aggregates in Concrete. CRC Press. EUA. 448p. 2005.
- ALEXANDER, M.G.; DAVIS, D.E.. Aggregates in concrete – a new assessment of their role. Concrete Beton, v. 59, p. 10–20.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D6928-17: Standard Test Method for Resistance of Coarse Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro-Deval Apparatus. West Conshohocken, 2017, p.6.
- _____. D6928-17: Standard Test Method for Resistance of Fine Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro-Deval Apparatus. West Conshohocken, 2015, p.6.
- _____. C1260-14, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method). West Conshohocken, 2014, p.5.
- _____. C33 / C33M-18, Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, 2018,
- _____. C1778-16, Standard Guide for Reducing the Risk of Deleterious Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, 2016.
- BORGES, K. O. Caracterização da Degradao Natural dos Enrocamentos de Proteo de Barragens. Dissertação de mestrado. Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2016.
- BELL, G. Methods of Exploration and Evaluation of Quarries. In Workshop on the Geology of Quarries, ARRC, February 1977. Australian Road Research Board Research Report. ARR no. 80. 95-105p. 1978.
- BENEDIKTSSON, S.. Effects of Particle Shape on Mechanical Properties of Aggregates. Masters Thesis. Department of Geology and Mineral Resources Engineering. Norwegian University of Science and Technology. 125p. 2015.
- BUCHER, H., R., F. Agregados para Concreto. In: 1o Simposo Nacional de Agregados. Anais. 20p. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1986.
- BRAVO, J. C. S.; GALAN, C. G.; SILVESTRE, R. Alternativas para melhorias em pesquisa mineral, aplicadas ao setor de agregados. In Anais 48 do Congresso Brasileiro de Geologia. 1p.

- CALAES, G. D.s; MARTINEZ GONZALES, Ar. . Planejamento estratégico, competitividade e sustentabilidade na indústria mineral: dois casos de não metálicos no Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: CETEM / MCT / CNPq / CYTED, 2006. 236 p.
- CARVALHO, S. G.; NARDY, A. J. R.; OLIVEIRA, M. A. F.; SOARES, P; C.; ZANARDO, A.; ANTONIO, M. C. Aspectos geológicos litoquímicos dos sills Borda de mata e Limeira Cosmópolis (SP): Resultados Preliminares. Congresso Brasileiro de geologia, Belém (PA), Anais São Paulo – SP, Sociedade Brasileira de Geologia, vol. 3. 1998.
- CARROL, D. Rock Weathering. New York. Plenum Press. 1970.
- CAPIK, M.; YILMAZ, O. A.. Modeling of Micro Deval abrasion loss based on some rock properties. In Journal of African Earth Sciences. v. 134 549-556 p. 2017.
- DAMO, G. F.. Avaliação do desempenho de diferentes agregados miúdos de britagem em concretos de cimento Portland. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. 230p. 2012.
- DEARMAN W. R. IRFAN Y. MONEY M. S. TURK N. HUSSEN T. I.. Quality variations in whin sill aggregates from Northumberland, England. In: Bulletin of the International Association of Engineering Geology. V. 29, is 1. P 355-359. 1984.
- DNER-IE 089/74- Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. 1994
- DNER-ME 399/99 - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem Agregados – determinação da perda ao choque no aparelho. treton 1999.
- DNER-ME 037/97: Agregado graúdo para concreto de cimento. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. 1997.
- DNIT 031/2004 Pavimentos flexíveis: Concreto asfáltico. Departamento nacional de infraestrutura e transportes. 2004.
- DNPM. Anuário Mineral do Estado de São Paulo. Departamento Nacional de Produção Mineral. 2016.
- EN 1097-1 (DIN 2011) Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 1: Determination of the resistance to wear (micro-Deval).
- ERNESTO, M.; RAPOSO, M. I.; MARQUES, L. S.; RENNE, P. R.; DIOGO, L. A.; MIM, A.. Paleomagnetism, geochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of North-eastern Paraná Magmatic Province: tectonic implications. Jorunal of Geodynamics. v. 28, p 321-340. 1999.
- FARIA, C. A.. Evolução magmática do Sill de Limeira: petrografia e geoquímica. Dissertação (Mestrado em Petrologia Ígnea e Metamórfica) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- FARIAS, M. M.; PALMEIRA, E. M. Agregados para a construção civil. In: ISAIA, G.C. (Ed.). Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo: IBRACON, 2007. v. 1. p.481-523.

- FARJALLAT, J.E.S. (1969). Observações sobre a desagregação do basalto compacto usado no enrocamento do aterro da ponte do Rio Sucuriú.) . In. Semana Paulista de Geologia Aplicada, 1, São Paulo, Anais, APGA. 9p.
- FARJALLAT, J.E.S. (1971). Estudos experimentais sobre desagregação de rochas Basálticas. São Paulo. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências/USP.
- FARJALLAT, J.E.S. (1972). Desagregabilidade de rochas basálticas e problemas relativos à sua aplicabilidade (relato sobre o tema). In. Semana Paulista de Geologia Aplicada ,4, São Paulo,, Anais, APGA. P.19-53
- FIORENTINI, J. A..Avaliação de durabilidade, abrasividade e dureza das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 178 p. 2002.
- FRASCÁ, M. H. B. O.. Rocha como material de construção. In: Geraldo C. Isaia. (Org.). Materiais de Construção e princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. 1ed.São Paulo: IBRACON, 2007, v. 1, p. 437-479.
- 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.21-3
- 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 em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. 1993.
- FRAZÃO, E. B.; PARAGUASSU. A. B.. Materiais rochosos para construção civil. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Ed 1) Geologia de Engenharia. São Paulo. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. 331-342p. 1998.
- FRAZÃO, E. B.. Tecnologia de rochas na construção civil. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. ABGE. Ed 01. 132p. 2002.
- FRAZÃO, E. B.- Agregados para a construção civil no Brasil. Cap. 1- Organização: Tannús, M. B., Cardoso, J. C. C. -: contribuições para a formulação de políticas públicas.CETEC. 2007
- FRAZÃO, E. B. (2012). Alteração de rochas como critério de seleção de agregados 2ªedição. São Paulo: ABGE.
- FRANCK, H. T.. Gênese e padrões de distribuição de minerais secundários na formação Serra Geral (Bacia do Paraná). 2008. Tese (Doutorado em Geociências). Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2008.
- FURLAN, A. P.. Considerações acerca da adesão e da suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas densas à luz de algumas propriedades mecânicas. 2006. Tese (Doutorado em Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006..

- GOMES, R.L, RODRIGUES, J.E. Reconhecimento dos diferentes tipos de derrames basálticos segundo a compartimentação entablamento-colunata em algumas guibuis do Estado de São Paulo. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. 1999.
- GOMES, R. L. Características tecnológicas e alterabilidade dos compartimentos entablamento e colunata de derrames basálticos da porção setentrional da bacia do Paraná. Tese (Doutorado em Geotecnia) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2001.
- GOKALP, I; EMRE, V. E. U.. Testing the abrasion resistance of aggregates including by-products by using Micro Deval apparatus with different standard test methods. *Construction and Building Materials*. v. 123, p 1-7. 2016.
- GOSWAMI S. C.. Influence of geological factors on soundness and abrasion resistance of road surface aggregates: A case study. In *Bulletin of Association of Engineering Geology*. v. 30.. is. 1. 59-61p. 1984.
- GUIBU, G. K. T.; ABREU, A. E.; RIBEIRO, R. P., CURTIS NETO, J. A.; BRAZO, J. C. S.. (2018). CARACTERÍSTICAS DAS DESCONTINUIDADES DE TALUDES ROCHOSOS EM PEDREIRA DE DIABÁSIO EM LIMEIRA (SP). 6º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. 4º Simpósio de Obras de Infraestrutura e Investigações, São Paulo, 10.
- 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.
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. Commission on testing methods, suggested methods for Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties and Swelling and Slake-Durability Index Properties. 1977.
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. Commission on testing methods, suggested methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials – 1979
- LANG, A. P., RANGE, P. H., FOWLER, D. W. AND ALLEN, J. J., "Prediction of Coarse Aggregate Performance by Micro-Deval and Other Soundness, Strength, and Intrinsic Particle Property Tests," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol 2026, 2007, pp. 3—8.
- LEYLAND, R.. (2015) Some Variations in Petrography of South African Karoo Dolerites and the Effects Thereof on Aggregate Properties. In: Lollino G., Manconi A., Guzzetti F., Culshaw M., Bobrowsky P., Luino F. (eds) *Engineering Geology for Society and Territory – Vol. 5*. Springer.
- LINO, L. M.. A Intrusão Toleítica de Limeira (SP): Contribuições à Geologia, Petrografia e Alteração Hidrotermal. 2015. Trabalho de Formatura (Graduação em Geologia). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2015.
- LINO, L. M., VLACH, S. R. F.. A intrusão toleítica de limeira (sp): contribuições à geologia e estratigrafia de uma intrusão acamadada. 2016. In: Congresso Brasileiro de

Geologia, 48, 2016, Porto Alegre. Anais, São Paulo – SP, Sociedade Brasileira de Geologia 2016

- LINO, L. M.; VLACH, S. R. F., FARIAS, R. S., CUNHA, D.. 2D magnetometric modeling of a basic-intermediate intrusion geometry: geophysical and geological approaches applied to the Limeira intrusion, Paraná Magmatic Province (SP, Brazil). In Brazilian Journal Of Geology. v. 48, n. 2, p. 305-315. 2018.
- KANDHAL, P. S., AND PARKER JR., F., "Aggregate Tests Related to Asphalt Concrete Performance in Pavements," Final Report Prepared for National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, D.C., May 1997.
- KAHRAMAN, S.; TORMAN, O. Y.. Predicting Los Angeles abrasion loss of rock aggregates from crushability index. In Bulletin of Materials Science. v. 31 . is. 2. 173-177p. 2008.
- KAHRAMAN, S.; FENER, M.. Predicting the Los Angeles abrasion loss of rock aggregates from the uniaxial compressive strength. In Materials Letters. v. 61 . is. 26. 4861-4865p. 2007.
- KIHARA, Y. Reação álcali-agregado: aspectos mineralógicos. In: 1º Simposio Nacional de Agregados. Anais. 15p. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1986.
- KOPPE, J. C.; COSTA, J. F. C. L. Operações de lavra em pedreiras. In: Manual de agregados para a construção civil. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012. Cap.7. p.127-145.
- KORKANÇ., M. TUGRUL, A. Evaluation of selected basalts from the point of alkali-silica reactivity In Cement and Concrete Research, vol 35, n.3, p505-512. 2005
- NARDY, A. J. R.; OLIVEIRA, M. A. F. ; BETANCOURT, R. H. S. ; VERDUGO, D. R. H. ; MACHADO, F. B.. Geologia e estratigrafia da Formação Serra Geral. Geociências (São Paulo), São Paulo, SP, v. 21, n.1/2, p. 13-30, 2002.
- MACHADO, F. B.. Geologia e aspectos petrológicos das rochas intrusivas e efusivas mesozóicas de parte da borda leste da bacia do paraná no estado de são Paulo. Dissertação (Mestrado em Geologia Regional. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, Campus Rio Claro. 214p. 2005.
- MACHADO, F.B., NARDY, A.J.R., MELO, R.P., OLIVEIRA, M.A.F., SQUISATO, E.. P.. As Rochas intrusivas da Formação Serra Geral na porção leste da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo. 2005. Revista de Geociências, v. 24, n. 1, p 5-17. 2005.
- 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, v. 37, n. 1, p. 64-80, 2007.
- MANIESI, V, OLIVEIRA, M. A. F.. Petrologia das soleiras de diabásio de Reserva e Salto do Itararé/PR. 1997. Geochimica Brasiliensis, v. 11, n.2, p 153-169.
- MARRANO, A. Caracterização tecnológica das rochas basálticas da Usina Hidroelétrica Canoas I, rio Parapanema, SP/PR. 1997. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

- MARTINS, C. C.. Utilização de métodos geoeletricos para auxílio do planejamento de lavra em pedra de gnaiss. Dissertação (Mestrado em Geofísica). Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2014.
- MCNALLY, G.. Soil and Rock Construction Materials. CRC Press. 416p. 1998.
- MEHTA, P. K. E MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON. 2008.
- MELFI, A. J. Intemperismo de granitos e diabásios no município de Campinas e arredores, Estado de São Paulo. Tese (Doutorado em Geologia e Mineralogia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1967.
- MENDES, S. K.. Viabilidade do emprego de finos de basalto em concreto compactado a rolo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1999
- OLIVEIRA, A. M. D. S.. Estudo da percolação d'água em maciços rochosos para o projeto de grandes barragens. 1981. Dissertação (Mestrado em Geologia Geral e de Aplicação) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1981.
- OLIVEIRA, E. P. & DANTAS, E. Closed-system differentiation in mesozoic high-Ti basic sill of Limeira, São Paulo State: implications for the origin of bimodal felsic-mafic volcanic rock in the Paraná Igneous Province. IV Simpósio de Vulcanismo e Ambientes Associados, Foz do Iguaçu: SBG.
- OLIVEIRA, E.P.; SATO, L.; GOMES, L.C.C.; MARTINS, G. Large scale magmatic banding in mesozoic basic sill of the Paraná Basin, Campinas, São Paulo State, Brazil. Boletim IGc-USP, Série Científica, 29, 220-220.
- PICCOLO, J. R.; ADISSY, M. A.. Adesividade ao ligante betuminoso. In Anais da 2ª Semana de Geologia Aplica. APGA. p 587-599.1970
- 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. 2014. Railway Ballast Characteristics, Selection Criteria and Performance. Norwegian university of science and technology, Faculty of engineering science and technology, Department of civil and transport engineering.
- PROWELL, B. D., ZHANG, J., BROWN, E. R. Aggregate properties and the performance of superpave-designed hot mix asphalt. Washington, D.C : Transportation Research Board. 2005.
- PARAGUASSÚ, A. B.; RODRIGUES, J. E.; RIBEIRO, R. P.; FRAZÃO, E. B.. Indústria da Pedra: da Extração à aplicação final. São Carlos: EESC-USP. 130p. Formato eletrônico:2017.
- PETRINCE, J. E. Geology of Construction Materials (Topics in Earth Sciences). Springer. 216p. 1990.

- PETRUCCI, E. G. R.. *Materiais de Construção*. ed 06. Editora Globo. Porto Alegre. 2007.
- PINHO, D. *Contribuição à petrografia de pedra britada*. 2007. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- PROSPECT HERITAGE TRUST INC Quarries: Quarrying on Prospect Hil. Acessado em 20/10/2018. <http://www.prospectheritagetrust.org.au/page26.html>.
- QUARESMA, L. F.. *Perfil da brita para construção civil*. Relatório técnico 30. Produto 22. Ministério de Minas e Energia. Brasília.. 30p. 2009.
- QUITETE, E. B.; MENEZES, P. M. L.; MIRANDA, A. O. Reatividade potencial de diabásio, rocha semelhante ao basalto abordagem microestrutural. In Congresso Brasileiro do concreto, 55. 2013, Anais São Paulo. IBRACON, 2013. 16p.
- RÄISÄNEN, M., TORPPA, A.. Quality assessment of a geologically heterogeneous rock quarry in Pirkanmaa county, southern Finland. v. 64, is. 4, p 409-418. 2005.
- RANGEL G. W. A.; ARAGAO, F. T. S. ; MOTTA, L. M. G. ; PONTES JUNIOR, C. L. . Verificação da diferença entre agregados basálticos para lastro ferroviário oriundos de uma mesma jazida em diferentes profundidades. In: XXX ANPET. 10 p. 2016.
- REMÉDIO, M. J.. *Caracterização tecnológica de agregados para uso como lastro de trem de alta velocidade – trecho Campinas / São Paulo*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2017.
- ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E. R.; LEE, D. Y.; KENNEDY, T. W. (1991). *Hot mix asphalt materials, mixture, design, and construction*. NAPA Education Foundation Maryland ed 1.
- ROGERS, C. Canadian Experience with the MicroDeval Test for Aggregates. *Advances in Aggregates and Armourstone Evaluation* 13, 139 – 147. 1998.
- RUIZ, M. D.. *Características tecnológicas de Rochas do Estado de São Paulo*. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1962.
- SADOWSKI, G. R.. A Short Review on the Importance of Collonades, Entablatures and "Fault-Joints" Soils and Rocks v. 35, n..3, 2012.
- SADOWSKI, G. R.. Problems of large relief or weathered shear joints in granites and basalts in brazilian dam foundations. In The 13th International Congress Of Rock Mechanics, At Montreal, Canada, Volume: Proceedings Isrm Congress 2015
- SBRIGHI NETO, C.. A areia britada granítica como agregado para concreto. In: I Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. P. 271-280 .1976.
- SBRIGHI NETO, C.. O uso do pó de pedra em concreto. In: Anais do I seminário Nacional de Agregados. São Paulo: EPUSP, 1986.
- SBRIGHI NETO, C.; SOARES, L. . The use of rock dust in Portland cement concrete production. In: SWEMP/96, 1996, Cagliari. Anais do SWEMP/96, 1996.

- SBRIGHI NETO, C. Agregados Naturais, Britados e Artificiais para Concreto. Cap. 07 in Concreto Ciência e Tecnologia. IBRACON. São Paulo. 2011.
- SEIXAS, A.; NARDY, A. J. R.; MORIEIRA, C. A.; PEREIR, A. M. Caracterização magnetométrica do sill de Limeira- SP. Geociências v. 34, n. 2, p. 169-184, 2015
- SELMO, L. T.. Caracterização geológico-geotécnica da brecha vítrea ocorrente em uma jazida de riodacito: projeto de expansão da mina Maestra, Caxias do Sul - RS. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2014.
- SENIOR, S.A.; ROGERS, C.A.. Laboratory tests for predicting coarse aggregate performance in Ontario, Relatório n. 1301, Washington: Transportatio Research Board. 1991.
- SOARES, P. C. Informações sobre Sills de diabásio da Bacia do Paraná. 1985. Curitiba. Relatório DOCEGEO. 1985.
- SOUZA JUNIOR, N. N. Feições Lito-Estruturais de interesse geológico e geotécnico em maciços basálticos. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1985.
- SOUZA JUNIOR, N. N.. O "Entablamento" em Derrames Basálticos da Bacia do Paraná, Aspectos Genéticos e Caracterização Geotécnica. Tese (Doutorado em Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 1992.
- SLOBODAN, C.; IMRE, I.; DRAGAN, O..Influence of the type and degree of alteration of andesite and dacite on the quality and life of asphaltic concrete. In Bulletin of the International Association of Engineering Geology. v. 30. Is. 1. 44-45p. 1984
- SHESTOPEROV, S. R.. Road and Buildings Materials. Moscou: Mir Publishers. v. 1.
- TIECHER, F. Reação álcali-agregado: avaliação do comportamento de agregados do sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2006.
- TOROK, A.. Los Angeles and Micro-deval values of Volcanic Rocks and Their use as Aggregates from Hundary. In Engineering Geology for Society and Territory. v. 5. Org. LOLLINO, G.. p 115-118. 2015.
- VALLEJO, L, Ingeniería Geológica. Pearson Prentice Hall. Madrid. 2004.
- YILMAZ, A..Mechanical Properties of Basalt Aggregates for Use in Unbound Pavement Layers. In Transportation Research Board 95th Annual Meeting. Washington DC, United States. 15 p. 2016
- YILMAZ, M.; TUGRUL, A.; The importance of lithologic changes in an aggregate quarry. In 9th Asian Regional Conference of IAEG, Global View of Engineering Geology and the Environment, At Beijing, China, p 405-412.
- YOSHIDA, R.; FRAZÃO, E. B. , GIROLDO, A. M. P.. Estudo sobre a forma de agregados rochosos. In Anais da 4ª Semana de Geologia Aplicada. APGA. P. 285-320. 1972.

ZHANG, Z. X. .Rock Fracture and Blasting: Theory and Applications. 1st edition. Elsevier. 528p.

ZANCHETTA, L. M.; SOARES, L.. O Uso de Finos de Pedreira de Rocha Granítico-Gnáissica em Substituição às Areias Naturais na Elaboração de Argamassas. Geociências (São Paulo), São Paulo, v. 22, n.1, p. 65-73, 2003.

ANEXO A**ANÁLISE PETROGRÁFICA DE AGREGADOS
QUANTO À REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADOS
NBR 15577:3 (ABNT, 2018)**

Análise Petrográfica de Rocha quanto à Reação Álcali - NBR 15777-3 (ABNT, 2018)			
Identificação: BAS – Intrusão de Limeira			
Tipo de amostra: Fragmento de rocha			
Forma dos fragmentos/Índice de forma (para pedra britada e pedrisco):			
☐ Lamelar ☐ Equidimenssional ☐ Alongada ☒ Não se aplica: Material britado em laboratório			
Propriedades Físico-Mecânicas: Rocha muito coerente			
Características Macroscópicas:			
Cor: Preta a verde escuro			
Estrutura:			
☒ Maciça ☐ Foliada ☐ Bandada ☐ Outra			
Características Microscópicas:			
Composição Mineralógica :			
Principal:	Subordinada:	Deletérios:	
Vidro Vulcânico (35%)			
Plagioclásio (10%)		☐ Opala	☐ Clorofeita
Clinopiroxênio (10%)		☐ Calcedônia	☐ Zeólita
Opacos (10%)		☒ Vidro vulcânico (35%)	☐ Quartzo deformado
Agregados de: saussurita (epidoto, sericita, dentre outros), carbonatos, clorita/esmectita em meio da matriz vítrea (35%)		☒ Vidro devitrificado	☐ Quartzo microgranular
		☐ Outros	
Textura:			
Granulação:			
☐ Grossa (3 cm a 5 mm) ☐ Média (5 mm a 1 mm) ☒ Fina (< 1 mm)			
Estado de alteração			
☒ Rocha ☐ Rocha alterada Sã ☐ Rocha pouco alterada Observações: Somente alterações deutéricas (hidrotermais).			
Feições indicativas de deformação			
Feldspatos com texturas potencialmente reativas:			
☐ Mimerquítica (quartzo vermiforme) ☐ Mesopertita ☐ Pertita em chama ☒ Não se aplica			
Granulação da matriz/cimento (para rochas sedimentares):			
☐ > 1 mm ☐ 1 mm a 0,20 mm ☐ < 0,20 mm ☐ Não se aplica			
Microfissuração			
☐ Ausente ou fraca ☒ Moderada ☐ Forte ☐ Não se aplica:			
Tipo de rocha			
☒ Ígnea ☐ Sedimentar ☐ Metamórfica			
Classificação petrográfica: Basalto			
Reatividade potencial Álcali-Agregado: Potencialmente Reativo			

Análise Petrográfica de Rocha quanto à Reação Álcali - NBR 15777-3 (ABNT, 2018)		
Identificação: DIA – Intrusão de Limeira		
Tipo de amostra: Fragmento de rocha		
Forma dos fragmentos/Índice de forma (para pedra britada e pedrisco):		
☐ Lamelar	☐ Equidimenssional	☐ Alongada ☒ Não se aplica: Material britado em laboratório
Propriedades Físico-Mecânicas: Rocha muito coerente		
Características Macroscópicas:		
Cor: Cinza escura		
Estrutura:		
☒ Maciça	☐ Foliada	☐ Bandada ☐ Outra
Características Microscópicas:		
Composição Mineralógica :		
Principal:	Subordinada:	Deletérios:
Plagioclásio (45%)	Apatita (1%)	☐ Opala ☐ Clorofeita
Clinopiroxênio (10%)		☐ Calcedônia ☐ Zeólita
Opacos (15%)		☐ Vidro ☐ Quartzo deformado vulcânico
Agregados de: clorita/esmectita (9%)		☐ Vidro ☐ Quartzo microgranular devitrificado
		☐ Outros
Textura:		
Granulação:		
☐ Grossa (3 cm a 5 mm)	☐ Média (5 mm a 1 mm)	☒ Fina (< 1 mm)
Estado de alteração		
☒ Rocha Sã	☐ Rocha alterada	
☐ Rocha pouco alterada		
Observações: Somente alterações deutéricas (hidrotermais).		
Feições indicativas de deformação		
Feldspatos com texturas potencialmente reativas:		
☐ Mimerquítica (quartzto vermiforme)	☐ Mesopertita ☐ Pertita em chama	☒ Não se aplica
Granulação da matriz/cimento (para rochas sedimentares):		
☐ > 1 mm	☐ 1 mm a 0,20 mm	☐ < 0,20 mm ☒ Não se aplica
Microfissuração		
☒ Ausente ou fraca	☐ Moderada ☐ Forte	☐ Não se aplica:
Tipo de rocha		
☒ Ígnea	☐ Sedimentar	☐ Metamórfica
Classificação petrográfica: Diabásio		
Reatividade potencial Álcali-Agregado: Potencialmente inócuo		

Análise Petrográfica de Rocha quanto à Reação Álcali - NBR 15777-3 (ABNT, 2018)		
Identificação: MON _M – Intrusão de Limeira		
Tipo de amostra: Fragmento de rocha		
Forma dos fragmentos/Índice de forma (para pedra britada e pedrisco):		
☐ Lamelar ☐ Equidimenssional ☐ Alongada ☒ Não se aplica: Material britado em laboratório		
Propriedades Físico-Mecânicas: Rocha muito coerente		
Características Macroscópicas:		
Cor: Cinza escura a branco		
Estrutura:		
☒ Maciça ☐ Foliada ☐ Bandada ☐ Outra		
Características Microscópicas:		
Composição Mineralógica :		
Principal:	Subordinada:	Deletérios:
Plagioclásio (45%)	Apatita (1%)	☐ Opala ☐ Clorofeita
Clinopiroxênio (34%)		☐ Calcedônia ☐ Zeólita
Opacos (12%)		☐ Vidro vulcânico ☐ Quartzo deformado
Agregados de: clorita/esmectita (7%)		☐ Vidro devitrificado ☐ Quartzo microgranular
		☐ Outros
Textura:		
Granulação:		
☐ Grossa (3 cm a 5 mm) ☒ Média (5 mm a 1 mm) ☒ Fina (< 1 mm)		
Estado de alteração		
☒ Rocha Sã ☐ Rocha pouco alterada ☐ Rocha alterada		
Observações: Somente alterações deutéricas (hidrotermais).		
Feições indicativas de deformação		
Feldspatos com texturas potencialmente reativas:		
☐ Mimerquítica (quartzto vermiforme) ☐ Mesopertita ☐ Pertita em chama ☒ Não se aplica		
Granulação da matriz/cimento (para rochas sedimentares):		
☐ > 1 mm ☐ 1 mm a 0,20 mm ☐ < 0,20 mm ☒ Não se aplica		
Microfissuração		
☒ Ausente ou fraca ☐ Moderada ☐ Forte ☐ Não se aplica:		
Tipo de rocha		
☒ Ígnea ☐ Sedimentar ☐ Metamórfica		
Classificação petrográfica: Monzodiorito de granulação fina a média		
Reatividade potencial Álcali-Agregado: Potencialmente Inócuo		

Análise Petrográfica de Rocha quanto à Reação Álcali - NBR 15777-3 (ABNT, 2018)																				
Identificação: MON _{MG} – Intrusão de Limeira																				
Tipo de amostra: Fragmento de rocha																				
Forma dos fragmentos/Índice de forma (para pedra britada e pedrisco): ☐ Equidimenssional ☐ Alongada ☒ Não se aplica: Material britado em laboratório Lamelar																				
Propriedades Físico-Mecânicas: Rocha muito coerente																				
Características Macroscópicas: Cor: Cinza escuro a branca Estrutura: ☒ Maciça ☐ Foliada ☐ Bandada ☒ Outra Maciça cortada por veios de riolito																				
Características Microscópicas: Composição Mineralógica : <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 33%;">Principal:</th> <th style="width: 33%;">Subordinada:</th> <th style="width: 34%;">Deletérios:</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Plagioclásio (38%)</td> <td>Apatita (1%)</td> <td>☐ Opala ☐ Clorofeita</td> </tr> <tr> <td>Clinopiroxênio (30%)</td> <td></td> <td>☐ Calcedônia ☐ Zeólita</td> </tr> <tr> <td>Opacos (12%)</td> <td></td> <td>☐ Vidro vulcânico ☐ Quartzo deformado</td> </tr> <tr> <td>Agregados de: clorita/esmectita , quartzo, hornblenda e albita (18%)</td> <td></td> <td>☐ Vidro devitrificado ☒ Quartzo microgranular</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>☐ Outros</td> </tr> </tbody> </table>			Principal:	Subordinada:	Deletérios:	Plagioclásio (38%)	Apatita (1%)	☐ Opala ☐ Clorofeita	Clinopiroxênio (30%)		☐ Calcedônia ☐ Zeólita	Opacos (12%)		☐ Vidro vulcânico ☐ Quartzo deformado	Agregados de: clorita/esmectita , quartzo, hornblenda e albita (18%)		☐ Vidro devitrificado ☒ Quartzo microgranular			☐ Outros
Principal:	Subordinada:	Deletérios:																		
Plagioclásio (38%)	Apatita (1%)	☐ Opala ☐ Clorofeita																		
Clinopiroxênio (30%)		☐ Calcedônia ☐ Zeólita																		
Opacos (12%)		☐ Vidro vulcânico ☐ Quartzo deformado																		
Agregados de: clorita/esmectita , quartzo, hornblenda e albita (18%)		☐ Vidro devitrificado ☒ Quartzo microgranular																		
		☐ Outros																		
Textura: Granulação: ☒ Grossa (3 cm a 5 mm) ☒ Média (5 mm a 1 mm) ☒ Fina (< 1 mm)																				
Estado de alteração ☒ Rocha ☐ Rocha alterada Sã ☐ Rocha pouco alterada Observações: Somente alterações deutéricas (hidrotermais).																				
Feições indicativas de deformação																				
Feldspatos com texturas potencialmente reativas: ☐ Mimerquítica (quartzo vermiforme) ☐ Mesopertita ☐ Pertita em chama ☒ Não se aplica																				
Granulação da matriz/cimento (para rochas sedimentares): ☐ > 1 mm ☐ 1 mm a 0,20 mm ☒ Não se aplica ☐ < 0,20 mm																				
Microfissuração ☒ Ausente ou fraca ☐ Moderada ☐ Forte ☐ Não se aplica:																				
Tipo de rocha ☒ Ígnea ☐ Sedimentar ☐ Metamórfica																				
Classificação petrográfica: Monzodiorito de granulação fina a grossa																				
Reatividade potencial Álcali-Agregado: Potencialmente Inócuo																				

ANEXO B

**ASPECTO DE ALÍQUOTA (BAS) PRÉ
E PÓS AO ENSAIO DE MICRO-DEVAL:
BASALTO (BAS) - GRADUAÇÃO A**

Amostra de basalto (BAS) pré ao ensaio de Micro-Deval (Graduação A):

Aspecto da amostra de basalto (BAS) posterior ao ensaio de Micro-Deval (Graduação A):

ANEXO C**ENSAIOS DE ADESIVIDADE AO LIGANTE ASFÁLTICO
NBR 12583 (ABNT, 2017)**

Basalto (BAS): Avaliação da adesividade ao ligante asfáltico

Diabásio (DIA): Avaliação da adesividade ao ligante asfáltico

Monzodiorito (MON_M): Avaliação da adesividade ao ligante asfáltico

Monzodiorito (MON_{MG}): Avaliação da adesividade ao ligante asfáltico