

TATIANE DE OLIVEIRA

**CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE SERRAGEM DE ROCHAS
ORNAMENTAIS PARA APLICAÇÕES GEOTÉCNICAS**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Geotecnia.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Rogério Pinto Ribeiro

Versão corrigida.
Original se encontra disponível na Unidade que aloja o Programa.

São Carlos - SP
2015

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

048c Oliveira, Tatiane de
Caracterização do resíduo de serragem de rochas
ornamentais para aplicações geotécnicas / Tatiane de
Oliveira; orientador Rogério Pinto Ribeiro. São Carlos,
2015.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2015.

1. granitos. 2. corte de blocos. 3. lama abrasiva.
4. aproveitamento de resíduos. 5. sustentabilidade. I.
Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **TATIANE DE OLIVEIRA**.

Título da dissertação: "Caracterização do resíduo de serragem de rochas ornamentais para aplicações geotécnicas".

Data da defesa: 31/08/2015

Comissão Julgadora:

Resultado:

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

APROVADA

Profa. Dra. **Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Prof. Dr. **Sergio Trajano Franco Moreiras**
(Universidade Estadual de Maringá/UEM)

APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:
Prof. Dr. **Edmundo Rogério Esquivel**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmã, por sempre confiarem em mim e pelo apoio incondicional nas minhas decisões e escolhas. Essa vitória é para vocês!

Ao professor Rogério pela orientação no decorrer do trabalho.

Ao Moisés por estar sempre ao meu lado e me acalmar nos momentos mais difíceis. Obrigada por ter a “cabeça no lugar” e conseguir guiar a minha para decisões mais sensatas. O caminho foi bem mais fácil com você por perto!

Ao Oscar por ter sido muito mais do que um laboratorista, por ser amigo e me ajudar nas horas que mais precisei. Obrigada também por puxar minha orelha quando eu estava fazendo besteira! O mundo seria mais bonito se as pessoas se importassem com o além das suas obrigações, se preocupassem também com os problemas dos outros. Você é fera!

Ao Tiago e Cléver, por me ajudarem em tantos ensaios e me receberem sempre tão bem! Só vocês para montar e desmontar equipamentos pesados toda vez que eu aparecia sempre com um sorriso no rosto!

Aos demais técnicos do Departamento de Geotecnia, muito obrigada pela ajuda, principalmente com o serviço “pesado” e pelos momentos de boas risadas no laboratório.

Aos professores pelo aprendizado adquirido durante esse tempo. Em especial aos professores Orêncio e Glauco (Departamento de Transportes) pelos conselhos durante a pesquisa.

Aos demais funcionários do Departamento de Geotecnia, por sempre ajudar com os problemas burocráticos e também pela amizade.

Aos amigos da Geotecnia pelos momentos de descontração e ajuda. Um obrigado especial aos amigos colombianos por me apresentarem um mundo que não conhecia.

Enfim, agradeço a todos que contibuíram de alguma forma com este trabalho!

RESUMO

OLIVEIRA, T. **Caracterização do resíduo de serragem de rochas ornamentais para aplicações geotécnicas**. 2015. 146 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

O Brasil ocupa hoje posição de destaque na produção mundial de rochas ornamentais e de revestimento. Essa indústria gera diferentes tipos de resíduos, podendo atingir cerca de 83% de perda de matéria-prima. Nesse contexto o que tem causado mais transtornos é a denominada lama abrasiva, gerada no processo de desdobramento de blocos em placas sendo constituída de água, cal, pó de rocha e restos de limalha de aço e de lâminas. Esse material é produzido em grandes quantidades e pode ser estocado no pátio das empresas, ocupando vastas áreas ou podem ser armazenados em aterros o que é mais oneroso. Com vista a este problema, o objetivo desta pesquisa foi caracterizar o resíduo do corte de blocos de rochas ornamentais visando a possibilidade de diferentes aplicações na geotecnia. Para tanto, foram realizadas a classificação do resíduo conforme ABNT NBR 10004, caracterização química/mineralógica e geotécnica, avaliação de resistência e ensaios da metodologia Miniatura Compactada Tropical (MCT) da lama abrasiva produzida em uma empresa do interior do Estado de São Paulo. A partir desses ensaios foi possível classificar o resíduo como não perigoso e inerte, sendo que os parâmetros geotécnicos indicaram uma granulometria com cerca de 64% de silte, índice de plasticidade de 5%, massa específica dos sólidos de 2,823 g/cm³, massa específica máxima seca de 1,650 g/cm³ com umidade ótima de 21% na energia intermediária e 1,645 g/cm³ com 25,6% de umidade na energia normal. A resistência à compressão simples alcançou aos 28 dias de cura 0,354 MPa com o resíduo puro, 1,174 MPa com 2% de cimento e 2,294 MPa com 5% de cimento. Os ensaios de cisalhamento direto mostraram uma coesão de 54 kPa e 35° de ângulo de atrito. De acordo com a metodologia MCT o resíduo foi classificado como NS' (silte não laterítico) de baixa permeabilidade que aumentou com o acréscimo de cimento, e baixa perda de suporte por imersão. Em linhas gerais a partir dos ensaios observou-se que esse material pode ter aplicações geotécnicas, mas para tanto outros ensaios deverão ser realizados.

Palavras-chave: granitos, corte de blocos, lama abrasiva, aproveitamento de resíduos, sustentabilidade.

ABSTRACT

OLIVEIRA, T. **Sawing waste characterization of dimension stones for geotechnics applications**. 2015. 146 p. Master Thesis- University of São Paulo at São Carlos School of Engineering, São Carlos, 2015.

Brazil currently occupies a prominent position in world production of dimension stones and coating. This industry generates different types of waste and may reach 83% loss of the raw material. In this context, the main problem of these wastes is the abrasive slurry, generated in the block sawing process on plates consisting of water, lime, stone powder and abrasive remaining. This material is produced in large quantities and can be stored in the companies' courtyards, occupying vast areas or stored in landfills, which is more costly. Thus, the objective of this study was to characterize the waste of cutting blocks of dimension stones analyzing the possibility of different applications in geotechnics. Therefore, it was carried out an environmental classification according ABNT NBR 10004, geotechnical and chemical/mineralogical characterization, strength assessment and Miniature, Compacted, Tropical methodology (MCT) of sawing abrasive slurry in the State of São Paulo. It was found the waste was classified as a non-hazardous and inert. The geotechnical parameters indicated 64% of silt, 5% of plasticity index, 2,823 g / cm³ of density of solids, maximum dry density of 1,650 g / cm³ with optimum moisture content of 21% in the intermediate energy and 1,645 g / cm³ with 25,6% moisture at normal energy. Unconfined compressive strength achieved after 28 days of curing 0,354 MPa with pure residue, 1,174 MPa with 2% of cement and 2,294 MPa with 5% cement. The direct shear tests showed a cohesion of 54 kPa and 35° of friction angle. According to the MCT results the residue was classified as NS '(silt not lateritic), low permeability's that increased with the addition of cement, and a low loss of support by immersion. Thus, it was observed that this material may have geotechnical applications, however should be conducted further testing

Keywords: granites, cutting blocks, abrasive slurry, waste recovery, sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Avaliação do faturamento com a exportação de rochas ornamentais no período de 1998 a 2014 (Modificado de ABIROCHAS, 2015).....	24
Figura 2 – Etapas da produção de placas de rochas ornamentais: (A) Extração por bancadas, (B) Desdobramento de blocos de granitos em tear multilâmina e (C) Beneficiamento (Arquivo do autor).	24
Figura 3 – Tipos de lavra de rochas ornamentais e de revestimento (Modificado de ALENCAR, CARANASSIOS, CARVALHO, 1996; MATTA, 2003; MENEZES, 2005):.....	25
Figura 4 – Métodos de desdobramento/serragem de rochas ornamentais.	26
Figura 5 – Processo de beneficiamento de rochas ornamentais.	28
Figura 6 – Fluxograma do volume de geração de resíduos por fase da cadeia produtiva (Modificado de CAMPOS et al., 2014).	29
Figura 7 – Resíduos produzidos na cadeia produtiva de rochas ornamentais: (A) Extração e (B) Serragem e beneficiamento (Arquivo do autor).	31
Figura 8 – Tanque de decantação do resíduo para reaproveitamento da água (Arquivo do autor).	33
Figura 9 – Envoltória de ruptura do solo e da mistura SRC (Modificado de DIAS et al., 2014).	39
Figura 10 – Ruptura de um dos CPs submetidos à compressão simples (JOAQUIM et al., 2014).	41
Figura 11 - Depósito da lama de serragem e polimento (Arquivo do autor).....	47
Figura 12 – Coleta manual do resíduo diretamente do poço de expurgo do tear.	48
Figura 13 – Preparação da amostra de resíduo: (A) Destorroamento manual (B) Homogeneização e (C) Estocagem do material homogeneizado (Arquivo do autor).	48
Figura 14 – Esquema mostrando a sequência necessária à classificação ambiental utilizada para o resíduo.	50
Figura 15 - Incidência de um raio x sobre um cristal	52
Figura 16 – Variação do volume do solo com a variação da umidade (NOGUEIRA, 2001). .	54
Figura 17 – Preparação do material para moldagem dos CPs: (A) Após as massas serem pesadas, seja o resíduo puro ou com cimento, foram dispostas na bancada e homogeneizadas manualmente, (B) A quantidade de água destilada calculada foi	

jogada sobre a massa, (C) O material foi homogeneizado manualmente, (D) Passado na peneira #4 e os torrões restantes destorroados com o auxílio do destorroador manual, (E) O material foi novamente homogeneizado manualmente e (F) Ensacado para moldagem dos CPs (Arquivo do autor)..... 58

Figura 18 – Moldagem dos CPs para ruptura à compressão simples: (A) Foi pesada a massa de uma camada, sempre colocando-se um pouco a mais do necessário devido à perda de material no processo de compactação e de extração do CP, (B) Colocação da massa no molde, (C) Compactação com controle de altura da camada realizado com o auxílio do paquímetro, (D) Extração do CP do molde, (E) Pesagem do CP, (F) Medição de três diâmetros a três alturas diferentes, (G) Medição de três alturas buscando-se fazê-las com ângulos de 120° e (H) CP identificado (Arquivo do autor)..... 59

Figura 19 – Imersão de CPs: (A) CPs de resíduo puro, (B) Os CPs de resíduo puro se desfizeram em menos de 5 minutos quando imersos, (C) CPs com 2% de cimento e (D) Os CPs com 2% de cimento resistiram a imersão, o mesmo comportamento foi notado nos CPs com 5% de cimento (Arquivo do autor)..... 60

Figura 20 – Compactação dos CPs: (A) Equipamento de moldagem com o molde posicionado; (B) Detalhe do molde; (C) Sobrecarga posicionada para receber os golpes e compactar o solo; (D) CP moldado; (E) CP embalado com plástico filme para evitar a perda de umidade (Arquivo do autor). 62

Figura 21 – Ensaio de permeabilidade para CP de resíduo puro: (A) Moldagem do CP no compactador manual, (B) Pedregulhos utilizados, (C) Geogrelha, (D) Permeâmetro montado e (E) Esquema da montagem interna do permeâmetro (Arquivo do autor). 65

Figura 22 – Montagem do permeâmetro para CPs com cimento: (A) Primeiro colocou-se os pedregulhos e uma pedra porosa no centro, (B) Depois uma placa de parafina, (C) O CP foi encaixado na base de parafina, (D) Preenchimento com parafina líquida, (E) Cama de bentonita, (F) Colocou-se outra placa de parafina, (G) Preenchimento com parafina líquida, (H) Camada de pedregulhos, (I) Permeâmetro grande pronto para ser fechado e (J) Esquema mostrando a montagem interna do permeâmetro (Arquivo do autor). 66

Figura 23 – Ensaio de mini-MCV: (A) Compactador mecânico com leitor de deslocamento acoplado, (B) Base de um CP em que ocorreu exsudação e (C) CPs moldados (Arquivo do autor). 67

Figura 24 – Ensaio de perda de massa por imersão: (A) Com o auxílio do extrator mecânico o CP foi extraído cerca de 1 cm para fora do molde, (B) Depois foi colocado com muito cuidado sobre uma base dentro de um tanque com água, (C) O material despreendido foi coletado em uma cápsula, (D) O mesmo procedimento foi realizado com os 5 CPs produzidos no ensaio de mini MCV, (E) Após serem retirados da água os CPs estavam destruídos, (F) As cápsulas em que o material despreendido foi recolhido foram para a estufa para secagem por 24 horas e suas massas pesadas (Arquivo do autor).....	68
Figura 25 – Classificação MCT (NOGAMI e VILLIBOR, 1981).	69
Figura 26 – Minerais encontrados na amostra do resíduo.	74
Figura 27 – Curva granulométrica do resíduo.	77
Figura 28 – Gráfico do ensaio de limite de liquidez pelo método de Casagrande.	79
Figura 29 – Carta de plasticidade de Casagrande (Modificado de PINTO, 2006).	79
Figura 30 – Curvas de compactação do resíduo nas energias intermediária e normal.	80
Figura 31 – CPs após finalização do ensaio: (A) Ruptura próxima a vertical, (B) Ruptura próximo a horizontal e localizada no contato entre camada e (C) Ruptura com deslocamento de partes do CP e abatimento do topo com paralização do ensaio (Arquivo do autor).	83
Figura 32 - Resultados de resistência à compressão simples para o resíduo puro, com incremento de 2% e de 5% de cimento.	84
Figura 33 – Diagramas tensão cisalhante x deformação para as tensões normais de 50, 100 e 200 kPa.....	85
Figura 34 – Envoltória de ruptura.....	85
Figura 35 – CPs pós ensaio: (A) Deslocamento das formas após finalização do ensaio; (B) Retirada da forma superior; (C) Superfície de ruptura ao cisalhamento (Arquivo do autor).	87
Figura 36 – Resultados Mini CBR imediato e imerso.....	87
Figura 37 – Resultados dos ensaios de Mini-Proctor – Energia intermediária, Expansão e Retração.	88
Figura 38 – Mini –MCV em função das curvas de afundamento.....	90
Figura 39 – Curvas geradas do afundamento em função do número de golpes para os cinco CPs.	91
Figura 40 – Curvas de compactação em função do teor de umidade.	92
Figura 41 – Gráfico da perda de imersão (PI) em função do Mini-MCV.	93

Figura 42 – Classificação MCT do resíduo.....	94
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores médios do consumo dos principais insumos utilizados na serragem de granitos (SILVEIRA, VIDAL e SOUZA, 2014).	27
Tabela 2 – Granulometria e disposição dos resíduos (RUSSO, 2011).	30
Tabela 3 – Composição química de resíduos produzidos no corte de blocos de vários tipos de rochas ornamentais (Modificado de CAMPOS et al., 2014).	32
Tabela 4 – Resistências encontradas nos ensaios com solo puro e com a mistura (Modificado de DIAS et al., 2014).	39
Tabela 5 – Resultados dos ensaios de compressão simples (Modificado de JOAQUIM et al., 2014).	40
Tabela 6 – Parâmetros de cada solo artificial (SIVRIKAYA, KIYILDI e KARACA, 2013)..	42
Tabela 7 – Análise química dos materiais utilizados no estudo de Sivrikaya, Kiyildi e Karaca (2013).	42
Tabela 8 – Materiais e misturas que foram submetidos à caracterização para as finalidades propostas (Modificado de DINO et al., 2013).	43
Tabela 9 – Resultados para as amostras de resíduo puro (Modificado de DINO et al., 2013).	44
Tabela 10 – Resultados dos ensaios destinados ao aproveitamento em depósitos de lixo (Modificado de DINO et al., 2013).	44
Tabela 11 – Resultados dos ensaios destinados ao aproveitamento como material de enchimento (Modificado de DINO et al., 2013).	44
Tabela 12 – Resultados dos ensaios destinados ao aproveitamento como solos artificiais (Modificado de DINO et al., 2013).	45
Tabela 13 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão simples (Modificado de MIRANDA, 2007).	46
Tabela 14 – Listagem dos ensaios realizados na pesquisa.	49
Tabela 15 – Medidas e volume do molde para confecção dos CPs para ruptura à compressão simples.	56
Tabela 16 – Quantitativo de material utilizado em cada tipo de mistura para confecção de 6 CPs para ruptura à compressão simples.	60
Tabela 17 – Medidas realizadas no molde de resistência ao cisalhamento.	61
Tabela 18 - Propriedades típicas de cada grupo de solo (Modificado de DNER, 1996).	70
Tabela 19 - Emprego recomendado de solos tropicais em obras viárias (Modificado de NOGAMI e VILLIBOR, 1995).	71

Tabela 20 – Resultados do ensaio de lixiviação.....	72
Tabela 21 – Resultados do ensaio de solubilização.....	73
Tabela 22 – Composição química da granalha e lâminas de aço utilizadas no desdobramento.	74
Tabela 23 – Composição química do resíduo de serragem realizada pelo ensaio de fluorescência de raios X e comparação com a composição de outros tipos de resíduos estudados.....	75
Tabela 24 – Porcentagens das frações granulométricas do resíduo obtidas no ensaio de granulometria conjunta.	76
Tabela 25 – Faixas granulométricas do DNIT (Modificado de DNIT, 2010) e a composição do resíduo.....	77
Tabela 26 – Massas específicas dos constituintes do resíduo e sua ocorrência em porcentagem (Compilação de dados da internet).....	78
Tabela 27 - Resultados obtidos nos ensaios de Resistência à Compressão Simples para o resíduo puro.....	81
Tabela 28 – Resultados obtidos nos ensaios de Resistência à Compressão Simples para a mistura do resíduo com 2% de cimento.	82
Tabela 29 - Resultados dos ensaios de Compressão Simples para o resíduo com 5% de cimento.....	83
Tabela 30 – Resumo dos resultados de Mini-Proctor na energia intermediária, Mini CBR, Retração e Expansão.	88
Tabela 31 – Coeficiente de condutividade hidráulica para os três tipos de CPs.	89
Tabela 32 – Resultados do Mini-MCV retirados da Figura 38:	90

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AAMOL	Associação Ambiental Monte Líbano
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABIROCHAS	Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	<i>California Bearing Ratio</i> , em português ISC (Índice de Suporte Califórnia)
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
CETEMAG	Centro Tecnológico do Mármore e do Granito
CP	Corpo-de-prova
DER/SP	Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
IFSC	Instituto de Física de São Carlos
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INT	Instituto Nacional de Tecnologia
LCT	Laboratório de Caracterização Tecnológica
MCT	Miniatura Compactada Tropical
NBR	Norma Brasileira
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
TPH	<i>Total Petroleum Hydrocarbons</i> , em português hidrocarbonetos totais de petróleo
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1. Problemática e relevância da pesquisa	19
1.2. Objetivos	20
1.3. Estrutura da dissertação	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1. Rochas ornamentais.....	23
2.2. Produção	23
2.2.1. Extração/Lavra.....	25
2.2.2. Desdobramento/Serragem	26
2.2.3. Beneficiamento	27
2.3. Geração de resíduos.....	28
2.3.1. Extração	29
2.3.2. Desdobramento e beneficiamento	29
2.3.3. Classificação e estocagem	30
2.4. Composição química do resíduo	31
2.5. Classificação do resíduo conforme NBR 10004.....	33
2.6. Exemplos de aplicações de lamas abrasivas	34
2.6.1. Indústria cerâmica.....	35
2.6.2. Argamassa	36
2.6.3. Tijolos ecológicos.....	36
2.6.4. Vidros	36
2.6.5. Solos para agricultura	36
2.6.6. Indústria do papel	37
2.6.7. Cosméticos	37
2.6.8. Indústria polimérica.....	37
2.6.9. Concreto	38

2.7. Usos potenciais na geotecnia	38
2.7.1. Pavimentação.....	38
2.7.2. Reestabilização de taludes	39
2.7.3. Terraplenagem	40
2.7.4. Estabilização de solos.....	41
2.7.5. Impermeabilização para depósitos de resíduo ou cobertura, material de enchimento e solo artificial para revegetação	43
2.7.6. Solo-Cimento.....	45
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
3.1. Resíduo.....	47
3.2. Ensaio realizados	49
3.2.1. Classificação do resíduo conforme NBR 10004	50
3.2.2. Caracterização química e mineralógica.....	51
3.2.3. Caracterização geotécnica	53
3.2.4. Resistência	56
3.2.5. Metodologia MCT	63
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
4.1. Classificação do resíduo conforme NBR 10004.....	72
4.2. Caracterização química e mineralógica.....	74
4.3. Caracterização geotécnica.....	76
4.3.1. Granulometria conjunta	76
4.3.2. Massa específica dos sólidos	78
4.3.3. Limites de consistência.....	78
4.3.4. Compactação	80
4.4. Resistência	81
4.4.1. Compressão simples	81
4.4.2. Cisalhamento direto.....	85

4.5. Metodologia MCT	87
4.5.1. Compactação Mini-Proctor, Mini CBR e Expansão e Contração	87
4.5.2. Permeabilidade	88
4.5.3. Compactação Mini-MCV, Perda de Massa por imersão e Classificação Geotécnica MCT	89
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
5.1. Conclusões	96
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	97
REFERÊNCIAS	99
APÊNDICES	105

1. INTRODUÇÃO

1.1. Problemática e relevância da pesquisa

O aumento do consumo de produtos cuja origem advém das atividades mineradoras vem proporcionando a toda a população mundial maior conforto. Entretanto, o crescimento da população e conseqüente aumento do consumo destes produtos aliado à uma exploração e utilização irracional dos recursos naturais têm prejudicado as condições de vida no planeta, devido a geração de resíduos provenientes desses processos.

A qualquer processo de transformação de materiais ou fabricação há produção de diferentes tipos de resíduos em todas as fases da produção. Os resíduos do processo de beneficiamento de rocha ornamental, como as lamas do processo de desdobramento e polimento, casqueiros e cacos e outros resíduos como lâminas e granalhas desgastadas, sacos de cimento e cal, restos de pastilhas abrasivas, entre outros geram impacto ambiental em várias etapas do processo produtivo.

Segundo Braga et al. (2010) os resíduos do processo de beneficiamento de rochas ornamentais apresentam composição química variada em função da constituição das rochas, do processo de beneficiamento, das propriedades dos insumos, dentre outros fatores. Geralmente esses resíduos, provenientes de vários tipos de rochas, são dispostos na mesma bacia, e em alguns casos é ainda disposta juntamente a lama do polimento.

Neste cenário existe uma enorme preocupação com o vultoso volume de resíduos produzidos no desdobramento em chapas gera-se cerca de 1/3 em peso seco e 2/3 em peso úmido de resíduos por bloco, o que necessita de um gerenciamento sustentável. Outra grande preocupação é a contaminação que esses resíduos podem provocar no meio ambiente, pois são acondicionados sem nenhum tratamento prévio adequado em bacias escavadas no solo, geralmente sem nenhuma barreira impermeável e sem cobertura. Em alguns casos há apenas o desaguamento dessas lamas com retorno da água ao ciclo produtivo.

Sendo assim há a necessidade de elaboração de um plano de gerenciamento que promova o manuseio, armazenamento, transporte, disposição final e aproveitamento desses resíduos, com a finalidade de proteger a saúde do homem e conservar o meio ambiente. Para sua utilização desse material é de extrema importância o conhecimento de suas propriedades para a avaliação de desempenho técnico e comportamento ambiental para posterior inserção em processos e produtos.

Aliado a esse cenário já se nota em alguns centros econômicos a falta, cada vez mais crescente, de materiais naturais próximos a esses locais, havendo a necessidade de buscá-los

em outras regiões, o que encarece o processo. Além do mais a exploração dessas jazidas vem gerando a degradação do ambiente e isso vem tornando cada vez mais complexo a obtenção de autorização e funcionamento dessas lavras. Com isso tem surgido uma tendência a utilização de materiais alternativos aos naturais, que além de diminuir custos com transporte, diminuem os possíveis impactos ambientais e possibilitam a inserção de resíduos provenientes de fontes naturais.

Na geotecnia existe a busca constante de novas tecnologias e alternativas que tornem viáveis as obras de engenharia e que busquem atenuar os danos causados ao meio ambiente. A utilização de bases granulares para rodovias, por exemplo, torna-se inviável quando a jazida se encontra distante do local da obra, devido ao alto custo do transporte e danos ambientais próprios da jazida. Outro exemplo é a execução de fundações em terrenos de baixa capacidade de suporte e alta deformabilidade, que necessitam de fundações profundas sendo que o custo atribuído a elas pode não condizer com o porte do empreendimento. Nesses casos, uma alternativa é a melhoria das propriedades do solo local. Outro exemplo é o alto custo na preparação de solos com baixíssima permeabilidade adequados a aplicação em camadas de fundo de aterros. Muitas vezes há a necessidade de incorporação de argilas no solo da região para alcançar o coeficiente de permeabilidade necessário a execução da obra, o que a encarece.

O resíduo utilizado na pesquisa é proveniente de uma empresa de serragem e beneficiamento de rochas ornamentais no interior de São Paulo. Essa empresa recebe os blocos de rocha vindos principalmente do Espírito Santo e de Minas Gerais e realiza as etapas de serragem e polimento. O resíduo é estocado em uma bacia por um tempo determinado para que haja secagem inicial da amostra. Quando ela se encontra com a umidade mais baixa, um caminhão recolhe esse material e leva para o aterro. Há uns três anos o aterro da cidade que recebia o material era da prefeitura, portanto não havia custos para disposição. Porém o aterro passou para a iniciativa privada, o que gerou gasto anual que varia entre R\$15.000 e R\$21.000. Encontrar uma forma de utilização desse resíduo seria uma diminuição de custos para a empresa, o que aumentaria sua lucratividade e estaria de acordo com os fundamentos do desenvolvimento sustentável.

1.2. Objetivos

Esse trabalho tem por objetivo geral a caracterização do resíduo de serragem de blocos de rochas ornamentais produzido em tear multilâmina de uma empresa beneficiadora de

pequeno porte do interior paulista, visando sua utilização no campo da engenharia geotécnica. O material utilizado é constituído de três tipos de rochas: sienito “Marrom Caldas”, granito “Marrom São Paulo” e gnaisse “Branco Piracema”.

Dentre os objetivos específicos tem-se:

- Avaliar o teor de umidade ótima (w_{ot}) que forneça a maior massa específica seca máxima (ρ_d) para o resíduo;
- Avaliar a evolução da resistência à compressão simples com o passar do tempo de cura;
- Avaliar a possível melhora das propriedades utilizando-se cimento;
- Avaliar a coesão e atrito do material;
- Determinar seu coeficiente de permeabilidade;
- Definir a classificação Miniatura Compactada Tropical (MCT);
- Fazer um comparativo dos resultados obtidos com os encontrados em pesquisas realizadas com o mesmo tipo de resíduo.
- Classificar o resíduo em perigoso, inerte e não inerte.

1.3. Estrutura da dissertação

O trabalho está dividido em cinco capítulos descritos sucintamente abaixo:

- Capítulo 1: Apresenta-se uma breve introdução ao assunto tratado no trabalho e define-se os objetivos gerais e específicos da pesquisa além de mostrar a estrutura do trabalho.
- Capítulo 2: Constitui-se em uma revisão bibliográfica que aborda aspectos relevantes ao tema proposto. Primeiramente se discute um pouco sobre o que são as rochas ornamentais, a cadeia produtiva e a geração dos resíduos priorizando a lama da serragem. Aprofundando-se na temática dessa lama foram apresentados estudos de caracterização ambiental e algumas tentativas de aproveitamento desse material em diferentes segmentos da indústria e construção civil, finalizando com um levantamento sobre usos potenciais desse material dentro da geotecnia.
- Capítulo 3: Nesse capítulo é apresentado o material utilizado na pesquisa e as metodologias utilizadas para coleta e preparação do material. Além disso é mostrado o procedimento de execução dos ensaios e preparação dos corpos-de-

prova para o ensaio de resistência à compressão simples, cisalhamento e permeabilidade.

- Capítulo 4: Mostrou os resultados encontrados nos ensaios realizados e fez-se uma análise relacionando-os a possíveis aplicações no campo da geotecnia.
- Capítulo 5: Foram apresentadas as conclusões baseadas nos resultados e análise dos resultados para a finalidade proposta. Fez-se ainda sugestões para futuras pesquisas nesse campo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O capítulo apresenta dados sobre a produção do resíduo e como ele vem sendo utilizado em outras cadeias produtivas ou mesmo em aplicações diretas.

2.1. Rochas ornamentais

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2013) define rochas ornamentais como material pétreo natural utilizado em revestimentos internos e externos, estruturas, elementos de composição arquitetônica, decoração, mobiliário e arte funerária. Já as rochas de revestimento são definidas, seguindo a mesma norma, como rocha ornamental submetida a diferentes graus ou tipos de beneficiamento e utilizadas no revestimento de superfícies, especialmente pisos, paredes e fachadas.

A utilização da rocha faz parte da história da civilização já tendo sido empregada em obras e monumentos, como pontes, estradas, aquedutos, palácios, castelos, igrejas, túmulos, etc. Desde que se houvesse a disponibilidade do material e condições mínimas de aproveitamento esses insumos podiam ser usados (FRASCÁ, 2004).

Pela grande variedade de padrões cromáticos e estruturais, as rochas são utilizadas com a finalidade de ornamentação, como em peças decorativas e artes estatuária e funerária e mais largamente empregada na construção civil, em revestimentos de pisos e paredes.

Do ponto de vista comercial, as rochas ornamentais e de revestimento são basicamente subdivididas em granitos e mármore. Como granitos, enquadram-se, genericamente, as rochas silicáticas. Já os mármore englobam as rochas carbonáticas. Do ponto de vista geológico essas rochas podem ser enquadradas em três grupos genéricos: ígneas, sedimentares e metamórficas. Os granitos são de origem ígnea e os mármore metamórfica. Outros tipos litológicos de rochas ornamentais são os quartzitos, serpentinitos, travertinos, calcários e ardósias.

2.2. Produção

Um estudo denominado “Dimension Stone Sector: Brazil in numbers 2012”, da Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (ABIROCHAS), fez um panorama geral da indústria das rochas ornamentais (ABIROCHAS, 2009):

- 9,3 milhões de toneladas de produção em pedreiras (8% da produção mundial);
- 1.000 variedades comerciais de pedras vendidas no mercado interno e externo;

- 1.400 pedreiras de rochas ornamentais;
- 10.000 empresas operando na cadeia de produção;
- 120.000 empregos diretos no setor;

O faturamento com exportações de rochas ornamentais tem crescido com o decorrer dos anos, sendo destaque o aumento na exportação de rochas processadas, Figura 1, (ABIROCHAS, 2015).

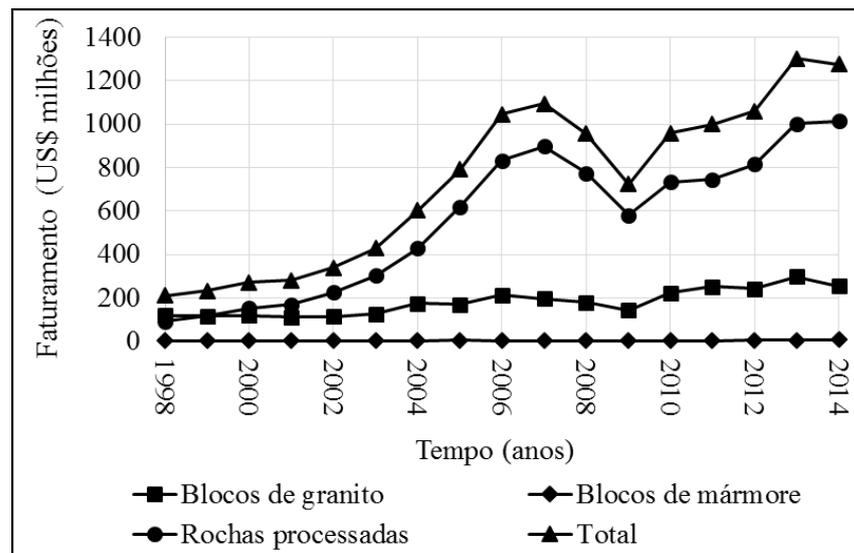


Figura 1 – Avaliação do faturamento com a exportação de rochas ornamentais no período de 1998 a 2014 (Modificado de ABIROCHAS, 2015).

As rochas ornamentais são geralmente comercializadas em forma de placas. Para obtenção dessa geometria são necessárias três etapas: extração, serragem ou desdobramento e beneficiamento (Figura 2).



Figura 2 – Etapas da produção de placas de rochas ornamentais: (A) Extração por bancadas, (B) Desdobramento de blocos de granitos em tear multilâmina e (C) Beneficiamento (Arquivo do autor).

A Figura 2 apresenta os processos e equipamentos de uma empresa localizada no interior de São Paulo. Esse conjunto pode variar de empresa para empresa, de acordo com o nível de tecnologia e tipo de material explorado pela pedreira. No caso explicitado eram retirados e beneficiados diversos tipos de granitos.

2.2.1. Extração/Lavra

Assim como qualquer atividade mineral com certo nível de desenvolvimento, a lavra deve seguir algumas fases para sua execução. Primeiramente é necessário a prospecção para localização ou identificação da ocorrência das rochas e depois faz-se a pesquisa mineral para avaliação do potencial de aproveitamento da jazida e para levantar dados e informações ao planejamento da lavra (VIDAL et al., 2014).

A extração consiste na remoção do material dos maciços rochosos, tendo como produto blocos de arestas retangulares de dimensões variadas que se aproximam tanto quanto possível de uma geometria que proporcione o melhor aproveitamento do material, além da melhor rentabilidade dos equipamentos nas etapas de beneficiamento (modificado de ALENCAR, CARANASSIOS, CARVALHO, 1996; MATTA, 2003; MENEZES, 2005). A Figura 3 mostra os vários tipos de extração possíveis.

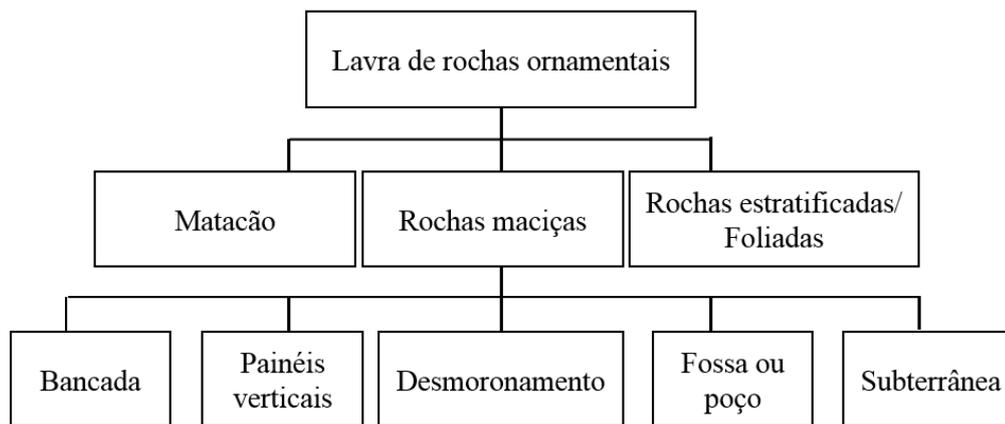


Figura 3 – Tipos de lavra de rochas ornamentais e de revestimento (Modificado de ALENCAR, CARANASSIOS, CARVALHO, 1996; MATTA, 2003; MENEZES, 2005):.

A lavra de matacões resume-se em extrair os blocos ou pranchas por meio de furos raiados coplanares e paralelos, usando-se cunhas e marretas para seccionar o corpo. Esse método não apresenta garantias necessárias a grandes projetos devido às dúvidas relativas à homogeneidade da rocha e total do volume da jazida.

A extração de rochas diretamente do maciço permite um maior planejamento de lavra devido aos grandes volumes envolvidos. Os principais tipos de extração são por bancadas e painéis verticais. A primeira maneira consiste em dividir a jazida em planos horizontais subparalelos que permitem a exploração por diferentes frentes. Podem ser realizados procedimentos por bancadas altas para maciços heterogêneos e por bancadas baixas, para maciços homogêneos. Já o segundo método é aplicado nas fases iniciais da pedreira e no caso em que é permitido o desenvolvimento em profundidade devido à limitação das reservas ou a condicionantes físicos da jazida.

As rochas quando apresentam estruturas estratificadas/foliadas são extraídas diretamente do maciço em forma de placas aproveitando-se a estratificação natural do corpo rochoso.

2.2.2. Desdobramento/Serragem

O desdobramento é o processo de serragem desses blocos em chapas que geralmente variam de 20 a 30 mm de espessura. Nesse procedimento podem ser utilizados basicamente dois tipos de equipamentos, como mostrado na Figura 4, sendo o processo realizado essencialmente por teares multilâmina apesar de que nos últimos anos tem havido um crescimento acentuado no parque tecnológico brasileiro para os teares multifio. O desdobramento/serragem é descrito nos trabalhos de Alencar, Caranassios e Carvalho (1996), Coimbra Filho (2006), Ribeiro (2005), Silveira, Vidal e Souza (2014).

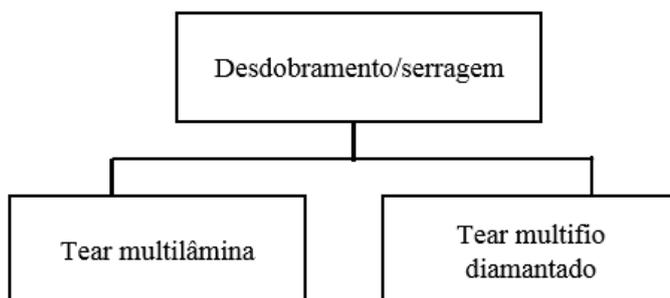


Figura 4 – Métodos de desdobramento/serragem de rochas ornamentais.

No desdobramento por tear de lâminas o corte ocorre na direção de maior comprimento do bloco. Esse processo é o mais difundido independentemente do tipo de material a ser serrado devido ao fato de que ele leva em consideração alguns fatores como maior agilidade na produção e custo relativamente baixo. A serragem ocorre pelo atrito entre

lâmina e lama (composta de água, cal e granalha de aço) com o bloco de rocha. A granalha de aço tem a finalidade de potencializar o corte, a cal aumenta a viscosidade da mistura para que ela fique mais tempo retida entre as placas que estão sendo serradas, e a água serve como meio de união entre os componentes. A Tabela 1 mostra os valores médios do gasto com insumos para serragem de granito. Esses valores variam dependendo da composição mineralógica e textura da rocha.

Tabela 1 – Valores médios do consumo dos principais insumos utilizados na serragem de granitos (SILVEIRA, VIDAL e SOUZA, 2014).

Insumo	Consumo
Lâmina (kg/m ²)	0,3 - 2,5
Granalha (kg/m ²)	0,6 - 4,0
Cal (kg/m ²)	0,4 - 2,5
Energia (kWw/m ²)	2,16 - 18,60

Já a serragem por fio diamantado ocorre pela ação abrasiva dos anéis ou pérolas com grãos de diamante dispostos ao longo do fio. Este funciona como uma espécie de serra fita que é tensionada sobre o bloco e realiza o giro.

Souza, Vidal e Castro (2012) concluíram que o tear multifio tem melhor desempenho em comparação ao multilâmina, pois este tem superiores produtividade (seis vezes maior), desempenho ambiental e qualidade do corte. Por outro lado, o tear convencional (multilâminas) é menos oneroso nos insumos, que corresponde à metade do custo do tear multifio. Somam-se a esses fatos os custos de transação e transporte advindos da implantação do tear de fio diamantado no Brasil, em que também há dificuldades em se encontrar assistência técnica qualificada.

2.2.3. Beneficiamento

No beneficiamento consideram-se todas as tecnologias aplicadas aos processos que conferem características dimensionais, de conformação e especificação ao produto final. Sendo assim, nesse ciclo é realçada a coloração, textura e aparência do material. Os procedimentos realizados são apresentados na Figura 5.

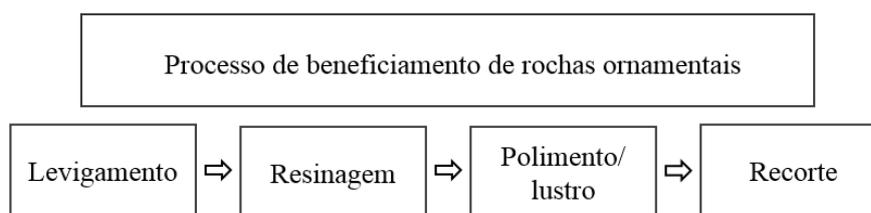


Figura 5 – Processo de beneficiamento de rochas ornamentais.

No levigamento há uma retirada inicial das ondulações da placa por meio do atrito de rebolos abrasivos. Uma esteira move a placa que passa por diferentes granulometrias de abrasivos na politriz. Um fato a ressaltar é que placas provenientes da serragem com fio diamantado, devido a sua precisão de corte, são dispensadas desse processo inicial.

Posteriormente há o aquecimento da placa para abrir os poros e permitir uma melhor penetração da resina em sua superfície. A temperatura e tempo necessários são controlados da forma mais adequada. Com a placa ainda quente, espalha-se a resina de forma que fica exposta para secagem.

A terceira etapa é o polimento/lustro, que consiste no mesmo procedimento descrito no levigamento, porém o objetivo agora é retirar o excesso da resina aplicada e dar brilho à placa. A granulometria dos rebolos utilizados nesta fase é mais fina do que na primeira, e assim como no levigamento, diminuem progressivamente com o decorrer do avanço da placa na máquina.

Na última fase são retiradas as beiradas descontínuas e partes mal-acabadas das placas, fazendo com que fiquem uniformes e de acordo com as medidas exigidas no mercado. Algumas empresas ainda subdividem essas placas no tamanho comercial mais apropriado para posterior comercialização.

2.3. Geração de resíduos

As atividades de extração e transformação mineral são costumeiramente geradoras de resíduos em volume e graus de toxicidade variados, fato que acaba por trazer, à atividade produtiva, desafios como o da estocagem, descarte ou aproveitamento desses materiais. A Figura 6 mostra o volume de resíduo gerado por etapa do ciclo produtivo da produção de placas de rochas no país:

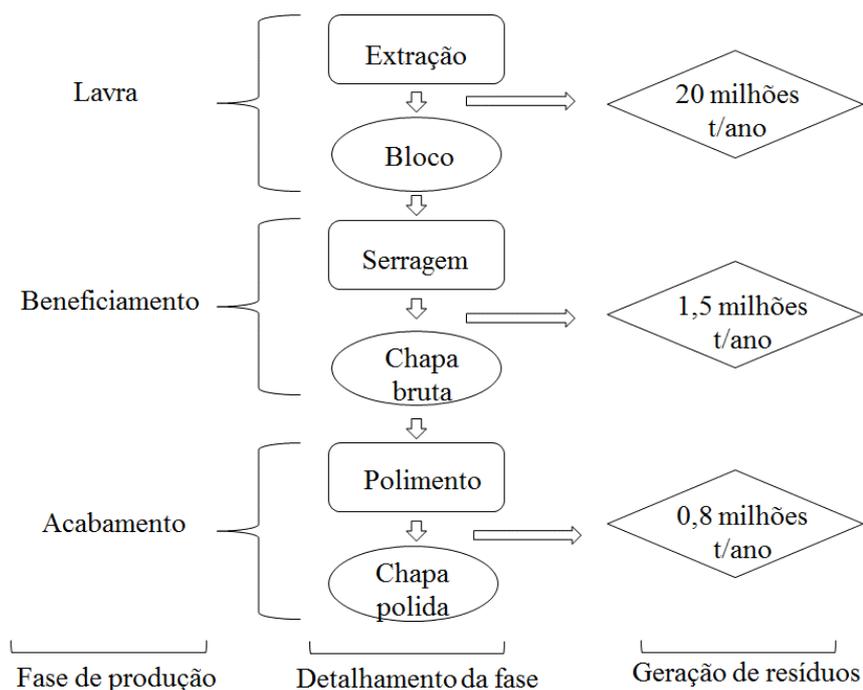


Figura 6 – Fluxograma do volume de geração de resíduos por fase da cadeia produtiva (Modificado de CAMPOS et al., 2014).

2.3.1. Extração

Matta (2003) em seu trabalho fez um levantamento dos resíduos gerados na cadeia produtiva da rocha ornamental. Na extração de matacões os corpos rochosos frequentemente estão em parte ou totalmente soterrados no regolito gerando-se grande quantidade de solo como resíduo. Já na lavra de maciços rochosos, pode-se afirmar que a maior produção de resíduos se origina principalmente:

- Do método de lavra, quando estes utilizam desmonte de grandes pranchas;
- Dos desmontes com cortes cíclicos quando se utiliza explosivos;
- Das perfurações com grandes profundidades através de prováveis desvios dos furos;
- Do calor derivado do flame jet ou maçarico.

Segundo Alecrim (2009) na extração de placas de rochas estratificadas há a geração de estéreis (areias, siltes e matéria orgânica), quartzitos alterados e retalhos.

2.3.2. Desdobramento e beneficiamento

Durante o ciclo de serragem, a viscosidade da mistura aumenta devido à adição de material pétreo, o que faz com que haja necessidade de descarte dessa lama. Após isso,

adiciona-se mais cal e granalha à água, que futuramente atingirá uma alta densidade e será novamente dispensada. Sendo assim, os componentes da mistura abrasiva devem sempre ser repostos para não prejudicar o processo de corte, dando origem a lama residual. Segundo Souza, Vidal e Castro (2012), o volume de resíduos grossos gerados após o desdobramento de blocos em placas, levando-se em consideração medições feitas em várias empresas e com diferentes equipamentos, foi de aproximadamente 14% e o de finos correspondeu a 26% do volume inicial do bloco. Essa lama é direcionada para bacias de deposição.

A etapa de beneficiamento é responsável pela eliminação dos poros e ondulações presentes na placa, que ocorrem com a aplicação de resinas, que são na maioria das vezes do tipo epóxi, com a finalidade de obter o máximo brilho possível. O resíduo proveniente dessa fase é constituído de partículas do rebolo, finos de rocha, água e resíduos advindos da resina. Essa lama passa inicialmente por sistemas adequados para se recuperar a água do processo e, em algumas empresas, é encaminhada para a mesma bacia de rejeitos que foi direcionado o resíduo da serragem. Essa prática é prejudicial ao aproveitamento da lama abrasiva, visto que a resina proveniente do beneficiamento pode contaminar todo o resíduo e tornar sua classificação como resíduo perigoso, impedindo seu uso.

2.3.3. Classificação e estocagem

Os resíduos produzidos na cadeia produtiva de rochas ornamentais podem ser divididos em finos e grossos. A

Tabela 2 apresenta uma classificação que define a granulometria e disposição dos resíduos provenientes da cadeia produtiva de rochas ornamentais (RUSSO, 2011):

Tabela 2 – Granulometria e disposição dos resíduos (RUSSO, 2011).

Granulometria	Origem	Tipo	Disposição
Fina (< 1 mm)	Corte de blocos em teares ou talha-blocos	Polpa	Bacias de decantação
	Polimento de placas		
Média – Grossa (1 - 200 mm)	Remoção de camada de estéril	Granulado	Pilhas
	Etapas de desmonte na lavra		
	Esquadrejamento de blocos		
	Extração, deslocamento, acerto e esquadrejamento de placas		

Os resíduos da extração ficam geralmente estocados na própria área de lavra. A formação desses resíduos se dá por diversos motivos: fissuramento do material, heterogeneidade indesejável que o leva a ser impróprio ao uso, do método de extração, etc. Já os resíduos mais finos, na forma de lama são acondicionados em bacias de deposição. Podem ser formados na serragem e ou beneficiamento. No primeiro caso, a lama abrasiva utilizada se mistura com o pó de rocha, e quando essa mistura atinge uma densidade alta, deve ser descartada e injetada no processo uma nova mistura abrasiva. No segundo caso, durante o levigamento e polimento, jatos de água retiram o pó produzido no processo, sendo essa mistura também encaminhada para bacias de estocagem. A Figura 7 mostra a forma de disposição dos resíduos de uma pedreira no interior do estado de São Paulo:



Figura 7 – Resíduos produzidos na cadeia produtiva de rochas ornamentais: (A) Extração e (B) Serragem e beneficiamento (Arquivo do autor).

Dentre os dois tipos de resíduos citados, o problema maior é a lama, que compromete grandes áreas da mineradora para sua estocagem ou requer custo crescente para envio para aterros. Além disso, há o risco de contaminação do solo dependendo da constituição dessa lama. Conforme Braga et al. (2010) a composição química das lamas varia com a composição das rochas, do processo de beneficiamento, das propriedades dos insumos dentre outros fatores.

2.4. Composição química do resíduo

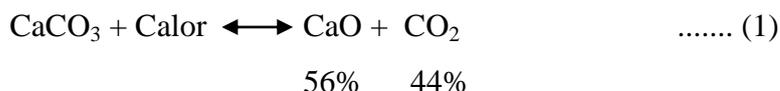
As lamas provenientes do corte de blocos para obtenção de placas nos teares convencionais contêm 66% água, 30% de pó de rocha, 2% de restos de limalha de aço e 1% de lâmina e 1% de cal em massa, sendo produzidas em grandes quantidades. Estima-se que sejam geradas 2,2 toneladas de lama por cada metro cúbico de rocha serrado (CAMPOS et al., 2014). A Tabela 3 mostra a composição química média de resíduos produzidos no corte de blocos de diversos tipos de rochas.

Tabela 3 – Composição química de resíduos produzidos no corte de blocos de vários tipos de rochas ornamentais (Modificado de CAMPOS et al., 2014).

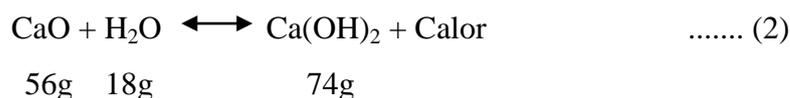
Tipo de bloco rochoso	Composição (%)						
	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Granitos (granalha)	5	2	62	12	7	4	3
Mármore	50	15	5	1	1	0,2	0,1
Mistura de granitos e mármore	21	4	36	9	5	4	2
Calcários	20	5	5	0,5	0,2	0,2	0,2
Quartzitos	0,6	-	80	9	1	-	-

A composição química do pó de rocha depende da mineralogia dos tipos das rochas que a empresa serra.

Segundo Carpio et al. (2013), para produzir a cal é necessário primeiramente a extração do calcário, a base de explosivos, perfuratrizes, etc. Depois o que for retirado é britado, separando-se a fase granulométrica apropriada ao processo de calcinação. O próximo passo é converter o carbonato de cálcio (CaCO₃), conhecido como calcário em óxido de cálcio (CaO), a cal viva, como mostra a Equação (1):



A cal hidratada, Ca(OH)₂, é produzida pela adição de água e muito utilizada na construção civil pois forma uma espécie de cola que liga elementos como pedra, areia e cimento, como mostra a Equação (2):



Sabe-se que o aço comum é uma liga entre ferro e carbono, sendo que o último varia geralmente entre 0,8 e 2% além de outros componentes resultantes do processo de fabricação: manganês (0,3 a 0,6%), silício (0,1 a 0,3%), fósforo (<0,4%) e enxofre (<0,05%). A quantidade desses elementos varia conforme a matéria prima utilizada e a forma de fabricação do ferro gusa e do aço (ROMEIRO, 1997).

Segundo o mesmo autor o carbono é o responsável direto pela dureza. O silício tem função desoxidante. O manganês atua também como desoxidante além de ser dessulfurante em conjunto com o enxofre eliminando o problema de fragilidade a quente que pode ocorrer na presença de sulfeto de ferro. O fósforo e enxofre são impurezas nocivas, o fósforo por ser responsável pela fragilidade a frio e o enxofre por formar FeS que, devido ao fato de fundir-se nas temperaturas correspondentes às ações de forjamento e laminação, diminui a tenacidade

do aço, podendo levar a desintegração e fissuramento durante a ação do martelo de forja ou cilindros para laminação .

A quantidade de material presente no resíduo proveniente do desgaste das granalhas e lâminas de aço depende da rocha que está sendo serrada. Blocos que contêm minerais mais duros ou aspectos texturais distintos geralmente desgastam mais as lâminas e gastam uma maior quantidade de granalha de aço para serem desdobradas, com isso gera-se um resíduo com maior percentual de aço.

Sendo o ferro o elemento constituinte principal da granalha, cerca de 97%, é importante a avaliação dos seus efeitos no solo. Alexandre et al. (2012) afirmam que o ferro em níveis adequados é um micronutriente essencial para a manutenção da vida dos organismos, participando de processos biológicos e compondo estruturas de muitas proteínas. Já em abundância, esse elemento em causa degradação de áreas e dificulta a revegetação no local.

A água utilizada no processo é a proveniente da rede de abastecimento da cidade ou dependendo da empresa, a proveniente do sistema de recirculação, Figura 8. A lama é disposta nesses tanques para sedimentação do resíduo e separação da água que volta ao ciclo produtivo.



Figura 8 – Tanque de decantação do resíduo para reaproveitamento da água (Arquivo do autor).

2.5. Classificação do resíduo conforme NBR 10004

O conjunto regulatório que rege a classificação dos resíduos abrange as seguintes normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR 10004 (ABNT, 2004a), NBR 10005 (ABNT, 2004b), NBR 10006 (ABNT, 2004c) e NBR 10007 (ABNT, 2004d).

A classificação dos resíduos sólidos no país deve ser feita de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004a). Nesta, os resíduos são classificados da seguinte forma:

- a) Resíduos classe I – Perigosos;
- b) Resíduos classe II – Não perigosos;
 - Resíduos classe II A – Não inertes.
 - Resíduos classe II B – Inertes.

Os resíduos classe I (perigosos) são os que apresentam periculosidade, como: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade ou que constam listados nos anexos A ou B da presente norma.

Já os resíduos classe II (não perigosos) são divididos em resíduos classe II A (não inertes) e resíduos classe II B (inertes). Os resíduos classe II A podem ter propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Os resíduos classe IIB são os que quando amostrados conforme a NBR 10007 (ABNT, 2004d) e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, conforme NBR 10006 (ABNT, 2004c), não apresentarem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões estabelecidos para potabilidade da água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, de acordo com o anexo G da norma.

No trabalho de Braga et al. (2010), foram caracterizadas e classificadas as lamas de desdobramento provenientes de seis empresas filiadas à Associação Ambiental Monte Líbano (AAMOL), conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004a). Nos extratos lixiviados todos os elementos se encontraram abaixo do limite máximo permitido na norma. Nos extratos solubilizados os parâmetros que se apresentaram em concentrações superiores aos limites máximos estabelecidos no anexo G da referida norma foram: Al, Fe, Pb, Cr, fenóis, F⁻ e SO₄²⁻ em 100% das amostras ensaiadas sendo esse resíduo classificado como classe IIA. Quanto ao pH foram encontrados valores médios entre 9,29 e 11,64, que apesar do material devido a esse parâmetro não ser classificado como corrosivo, os valores estão bem próximos do limite máximo de pH=12,5.

2.6. Exemplos de aplicações de lamas abrasivas

No Espírito Santo, uma associação foi criada para pesquisar e dar finalidade ao material não aproveitado da indústria da pedra. Silva (2011); Freire, Castro, Vidal (2013) descreveram em seus trabalhos a atuação da AAMOL, um bom exemplo de eficiente gestão do resíduo do desdobramento/beneficiamento de rochas ornamentais com a reintrodução do

mesmo em novas cadeias, principalmente com tentativas de uso na construção civil. A associação surgiu a partir da mobilização dos empresários do setor de Cachoeiro do Itapemirim com o incentivo do Centro Tecnológico do Mármore e Granito (CETEMAG) e envolvimento do Governo do Estado do Espírito Santo com a finalidade de resolver um dos maiores problemas ambientais do Espírito Santo, a falta de destinação adequada à essa lama.

A AAMOL é formada por 79 empresas do setor de rochas ornamentais de Nova Venécia e Cachoeiro do Itapemirim, ambas no Espírito Santo, que depositam mensalmente 15.000 toneladas desses resíduos no aterro. A associação é responsável por receber, tratar e dispor os resíduos, assim como implantar ações concretas no que se refere ao desenvolvimento sustentável.

Juntamente com a empresa ARGAMIL, fabricante de argamassa com resíduos de rochas ornamentais em Santo Antônio de Pádua (RJ), com tecnologia desenvolvida pelo Centro de Tecnologia Mineiral (CETEM) e o Instituto Nacional de Tecnologia (INT) está projetando a construção de uma fábrica de argamassa em suas instalações. Além disso, já se tem uma parceria entre uma empresa de engenharia e a Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) que instalaram uma fábrica de artefatos de cimento para bloquetes de pavimentação, meio fio e tijolos. A associação já conta com o equipamento e serão desenvolvidos diferentes traços com a incorporação de lama e agregados. Estão em andamento estudos e formatação de parceria com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) para se utilizar este resíduo como sub-base asfáltica e até mesmo incorporá-lo na massa do asfalto.

Vários outros estudos para utilização dessa lama no país têm sido realizados, a seguir tem-se um breve apanhado de algumas dessas aplicações:

2.6.1. Indústria cerâmica

Silva, Oliveira, Souza (2009) trabalharam a aplicabilidade de pó fino do polimento (PFP) e argila visando a fabricação de produtos de cerâmica vermelha. Os traços utilizados nos ensaios foram 10% PFP com 90% de argila e 40% PFP e 60% de argila. Os corpos-de-prova (CPs) foram confeccionados e submetidos a uma determinada pressão e variadas temperaturas de queima. Realizaram-se ensaios tecnológicos cerâmicos com os CPs e constatou-se a melhora da trabalhabilidade e o aumento da resistência mecânica à flexão em três pontos, apesar do aumento em massa para 40% de PFP não aumentar consideravelmente esse quesito.

2.6.2. Argamassa

A AAMOL realizou um trabalho em que foi desenvolvida uma argamassa com lama abrasiva do setor de rochas ornamentais da região de Cachoeiro do Itapemirim (ES). Os testes comprovaram que as argamassas estão totalmente de acordo com as normas da ABNT e foram também testadas e aprovadas por lideranças relevantes do mercado da construção civil e aprovadas. Foi verificado também que uma única fábrica pode consumir, por mês, todo o volume recebido pela AAMOL no mesmo período (ROCHAS DE QUALIDADE, 2014).

2.6.3. Tijolos ecológicos

Oliveira et al. (2012) estudaram a aplicação de resíduos provenientes da etapa do beneficiamento de rochas ornamentais em tijolos ecológicos para construção de casas populares. A mistura foi feita com resíduos e pó de rocha, areia, cimento e água. Com o traço de 60% de resíduos, atingiu-se uma resistência à compressão cerca de 50% maior do que a mínima estabelecida pela NBR 10836 (1994) e absorção cerca de 5% menor de que o mínimo exigido.

2.6.4. Vidros

Babisk (2009) desenvolveu vidros sodo-cálcicos a partir de resíduos de serragem de rochas ornamentais. Para isso foram utilizadas duas amostras de lama: uma proveniente do desdobramento de granitos em tear multi-lâmina e outra de mármore com fio diamantado. Foi constatado na pesquisa que os vidros com os resíduos apresentaram propriedades típicas de vidros sodo-cálcicos e similares aos vidros comerciais que foram comparados. Além disso, os vidros produzidos apresentam uma coloração verde devido ao ferro presente no resíduo de granito, e isso faz com que apresente um espectro ideal para vidros que possuem função de reduzir o calor, pois transmitem pouca radiação infravermelha e luz visível.

2.6.5. Solos para agricultura

Machado et al. (2008) estudaram a aplicação de resíduos oriundos do corte de rochas ornamentais para correção e adubação de solos tropicais. Para tal finalidade foram amostrados dois tipos de solos (latossolo vermelho – LV e latossolo vermelho-amarelo LVA), três tipos de corretivos da acidez do solo (calcário, resíduo de mármore e resíduos de rocha) em cinco

doses de calagem (0, 20%, 60%, 90% e 120%). Os resíduos incorporados mostraram potencialidade para serem utilizados como corretivo de acidez do solo e como fonte de nutrientes, não apresentando diferenças significantes em relação à utilização de calcário.

2.6.6. Indústria do papel

O trabalho de Morani, Caranossios, Ribeiro (2008) aplicou os resíduos do corte de mármore proveniente de Cachoeiro de Itapemirim (ES) com fins a utilização na indústria do papel para recobrir a camada porosa deixada pela celulose. Os autores chegaram à conclusão de que o resíduo após sofrer um processo de purificação, enquadrou-se nas exigências requeridas, reduzindo substâncias indesejáveis.

2.6.7. Cosméticos

Oliveira, Queiróz e Ribeiro (2009) estudaram a viabilidade de aplicação dos resíduos de corte das rochas ornamentais em sabonetes, variando-se a taxa de 5 a 70%. Os sabonetes foram testados quanto as propriedades de densidade, absorção de água, porosidade, rachaduras e desgaste e também na pele de coelhos albinos com a finalidade de observar possíveis alterações. Nesta pesquisa concluíram que o melhor teor era 40% e que não surgiram problemas de pele nas cobaias.

2.6.8. Indústria polimérica

O objetivo do trabalho de Souza, Carrisso, Ribeiro (2008) foi verificar a possibilidade de utilização dos resíduos oriundos do corte de mármore como carga de materiais poliméricos. As cargas são incorporadas visando melhorar as propriedades e reduzir os custos da composição polimérica. Com essa finalidade foram confeccionados CPs utilizando-se o polímero polipropileno (PP) e o rejeito. Em sequência esses compósitos foram submetidos a ensaios de impactos, antes e depois os ensaios de alterabilidade (exposição a névoa salina, umidade e UV). Os resultados mostraram ser possível adição de resíduo ao compósito em percentual de até 60% além de uma resistência moderada.

2.6.9. Concreto

Gonçalves, Moura, Dal Molin (2002) avaliaram o comportamento da adição de resíduo de corte de granito em concreto por meio de ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão. Concluíram que as misturas de concreto com resíduo apresentaram maior coesão, melhor consistência e diminuição na exsudação. Em relação à resistência à compressão axial o comportamento da mistura foi melhor do que o concreto de referência em todas as condições testadas.

2.7. Usos potenciais na geotecnia

2.7.1. Pavimentação

Lucena (2009) teve como objetivo em sua pesquisa estudar a viabilidade técnica da utilização do resíduo de serragem de granito como fíler em misturas asfálticas. O material é proveniente da empresa de beneficiamento POLIGRAN, localizada em Campina Grande/PB. Para execução do trabalho, a metodologia se dividiu em duas fases: na primeira fez-se a caracterização do resíduo; na segunda foram realizadas misturas do resíduo com agregados (brita 1 de rocha granítica, areia de rio do tipo quartzosa e pó de pedra de rocha granítica) e o cimento asfáltico de petróleo (CAP) do tipo 50/70 para moldagem dos CPs a serem ensaiados.

Para que algum material seja utilizado como fíler o DNIT estabelece que 95 a 100% do material deve passar pela peneira ABNT de nº 80 e pelo menos 65% na peneira ABNT de nº 200. A análise granulométrica mostrou que o material se enquadra nessa condição. A massa específica resultou em 2,67 g/cm³. A análise química mostrou um resíduo silicato-aluminoso com elevado teor de sílica (cerca de 60%) e quantidades significativas de Al₂O₃ e Fe₂O₃ (11,8% e 6%, respectivamente). Na análise mineralógica encontrou-se quartzo (SiO₂), microclínio (KAlSi₃O₈), albita (NaAlSi₃O₈) e, em menor quantidade, muscovita (KAl₂Si₃AlO₁₀(OH,F)₂). Esse resíduo foi classificado segundo a NBR 10004 como resíduo Classe II A (não perigoso e não inerte).

As análises realizadas com os CPs mostraram que os valores de estabilidade Marshall (resistência à compressão radial do CP), e da análise de tração (realizada pelos métodos Indireta por Compressão Diametral e pelo ensaio de Lottman Modificado) aumentaram com o crescimento do teor de fíler, sendo que para todos os teores o valor atingido superou o valor mínimo estabelecido pelo DNIT. Concluiu-se finalmente que, desde que as deformações

previstas para o pavimento estejam de acordo com o mostrado pelo material, este pode ser utilizado como filler em concretos asfálticos.

2.7.2. Reestabilização de taludes

Dias et al. (2014) estudaram a utilização do resíduo de serragem de granito em misturas de solo-cimento. O solo utilizado vem da rodovia Leste-Oeste entre os municípios de Cariacica e Vila Velha, no Espírito Santo. Este é um solo residual maduro bastante intemperizado, de cor amarelada e maior fração correspondente ao silte. Fez-se ensaios com o solo puro (S) e com a mistura de 70% solo, 20% resíduo e 10% cimento (SRC) variando-se as tensões normais em 50, 100 e 200 kPa. Os resultados são mostrados na Tabela 4 e Figura 9.

Tabela 4 – Resistências encontradas nos ensaios com solo puro e com a mistura (Modificado de DIAS et al., 2014).

Material (Amostra)	Tensão normal (kPa)	Deformação (mm)	Tensão cisalhante (MPa)	Ângulo de atrito (°)	Coesão (KPa)
Solo	1	50	0,79	15,24	0,28
	2	100	0,9		
	3	200	1		
SRC	4	50	-	32,60	5,84
	5	100	8		
	6	200	10		

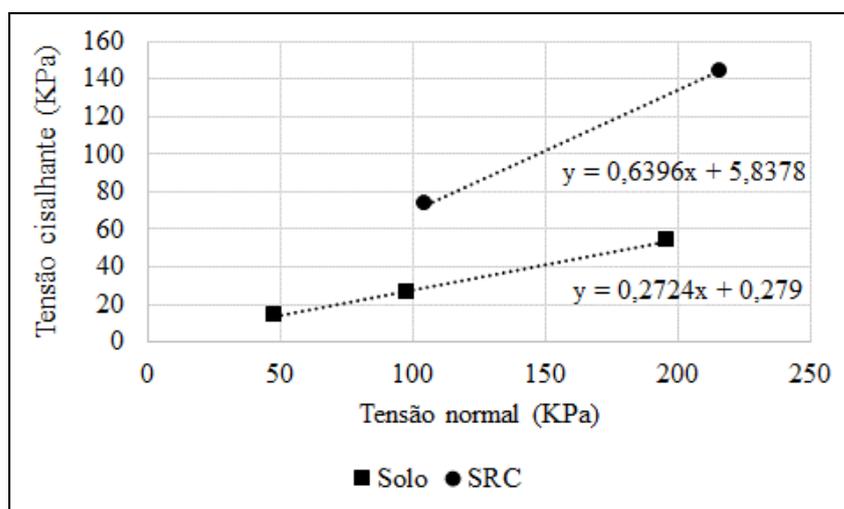


Figura 9 – Envoltória de ruptura do solo e da mistura SRC (Modificado de DIAS et al., 2014).

Nota-se um aumento significativo no ângulo de atrito e da coesão incorporando-se resíduo e cimento ao solo. O autor afirma não poder garantir que esse aumento é devido ao acréscimo do resíduo, sobretudo o resultado é satisfatório pelo ponto de vista ambiental.

2.7.3. Terraplenagem

Joaquim et al. (2014) fizeram misturas envolvendo solo e resíduo de corte de rocha com o incremento de cimento, cal e escória variando-se a proporção destes. O solo utilizado no trabalho foi o mesmo que Dias et al. (2014) empregou. Em seu trabalho a escória de alto forno é proveniente da Arcelor Mital Tubarão, o resíduo foi fornecido por uma empresa localizada no município de Colatina, Espírito Santo e a cal foi CHIII e o Cimento Portland CPIII 40RS, adquiridas no comércio local. Os corpos-de-prova foram moldados na energia Proctor Normal sendo a compactação realizada em três camadas com 25 golpes cada no cilindro de 1000 cm³. Dos CPs moldados e armazenados em câmara úmida, parte foi levada a estufa até atingirem massa constante e pesados, secos e submersos em água por 24 horas. O que sobrou, após o período de cura, foi imerso em água por 4 horas. A Tabela 5 mostra os resultados do ensaio de resistência à compressão simples.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios de compressão simples (Modificado de JOAQUIM et al., 2014).

Misturas	Identificação do CP	Carga de ruptura (N)	Tensão de ruptura (MPa)
100% solo	37*	12699,61	1,65
	38*	14602,10	1,90
80% solo + 20% resíduo	31*	16190,78	2,09
	35*	14072,54	1,82
75% solo + 20% resíduo + 5% cimento	3	4050,15	0,53
	4	5570,18	0,72
70% solo + 20% resíduo + 10% cimento	6	12827,10	1,67
	8	7619,77	1,01
75% solo + 20% resíduo + 5% cal	11	1912,30	0,25
	14	Não suportou imersão	
70% solo + 20% resíduo + 10% cal	19	1647,52	0,21
	20*	9992,98	1,30
75% solo + 20% resíduo + 5% escória	21	7149,05	0,98
	22	6217,42	0,79
70% solo + 20% resíduo + 10% escória	27	15190,50	1,97
	28	8894,63	1,14

* CPs não foram imersos em água por receio de desfazerem-se.

A Figura 10 mostra um corpo-de-prova após a ruptura. Nota-se predominantemente fissuras próximas a vertical e horizontal. Ocorre também o deslocamento das camadas mais superficiais do CP:



Figura 10 – Ruptura de um dos CPs submetidos à compressão simples (JOAQUIM et al., 2014).

As misturas envolvendo apenas resíduo e solo não suportaram a imersão, sugerindo que o resíduo não proporcionou à mistura propriedades cimentantes como as demais adições (cimento, cal e escória moída). Os resultados não atingiram o valor recomendado pela NBR 12025 (ABNT, 1990), que sugere o mínimo de 2,1 MPa.

2.7.4. Estabilização de solos

Sivrikaya, Kiyildi e Karaca (2013) realizaram um estudo de comparação da eficiência do resíduo do mármore calcítico e dolomítico e pó de granito na estabilização de solos argilosos. Os resíduos de pedreiras são provenientes de empresas da Turquia. Inicialmente prepararam-se 3 tipos de solos artificiais que foram posteriormente misturados aos resíduos: A (95% caulinita e 5% bentonita), B (90% caulinita e 10% bentonita) e C (80% caulinita e 20% bentonita). Foram realizados ensaios de caracterização geotécnica e a classificação da mistura conforme o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS). A Tabela 6 mostra os resultados de cada tipo de mistura e sua classificação.

Tabela 6 – Parâmetros de cada solo artificial (SIVRIKAYA, KIYILDI e KARACA, 2013).

Solos	LL (%)	LP (%)	IP (%)	ρ_s (g/cm ³)	w _{ot} (%)	ρ_d (kN/m ³)	Classificação do solo (SUCS)
A	56	20	36	2,59	24,0	13,65	Argila de alta plasticidade
B	68	20	48	2,60	26,8	14,10	Argila de alta plasticidade
C	84	28	56	2,61	27,0	14,50	Argila de alta plasticidade

LEGENDA: LL – limite de liquidez; LP – limite de plasticidade; IP – índice de plasticidade; ρ_s - massa específica dos sólidos; w_{ot} – umidade ótima; ρ_d - peso específico seco máximo.

As amostras de solo foram preparadas usando bentonita e caulinita. A caracterização química dos materiais utilizados é mostrada na Tabela 7.

Tabela 7 – Análise química dos materiais utilizados no estudo de Sivrikaya, Kiyildi e Karaca (2013).

Análises químicas	Materiais				
	Bentonita	Caulinita	Pó de granito	Pó de mármore calcítico	Pó de mármore dolomítico
SiO ₂	55,47	52,03	67,04	0,29	0,009
Al ₂ O ₃	16,7	32,85	13,06	0,05	0,003
Fe ₂ O ₃	4,57	0,69	7,66	<0,04	0,24
MgO	2,08	0,25	0,46	0,36	21,21
CaO	2,68	0,23	3,94	55,86	30,56
Na ₂ O	3,00	0,20	3,13	0,02	0,001
K ₂ O	1,89	1,18	3,74	0,02	<0,01
TiO ₂	0,57	0,21	0,15	<0,01	<0,01
P ₂ O ₅	0,32	0,07	0,05	<0,001	<0,01
MnO	0,08	<0,01	0,12	<0,001	0,01
Cr ₂ O ₃	<0,02	0,02	0,009	<0,002	<0,02
Perda ao fogo	12,30	12,20	0,5	43,50	47,50

Os resíduos foram adicionados nas proporções de 5, 10, 20, 30 e 50% em massa. Em vias gerais, os resultados dos ensaios realizados mostraram que:

- O peso específico com a adição dos resíduos aumentou significativamente com o aumento do teor de resíduo adicionado;
- Com o aumento da porcentagem dos resíduos, o limite de liquidez diminuiu e o de plasticidade aumentou, gerando um decréscimo no índice de plasticidade;
- Os ensaios de compactação mostraram a diminuição da umidade ótima e aumento do peso específico seco máximo com o aumento do teor de resíduos.

Finalmente os autores concluíram que o aumento em proporção de todos os resíduos é eficaz na estabilização do solo, porém o proveniente do mármore dolomítico é mais efetivo devido a sua composição química.

2.7.5. Impermeabilização para depósitos de resíduo ou cobertura, material de enchimento e solo artificial para revegetação

Dino et al. (2013) realizaram a caracterização geotécnica do resíduo de serragem com vista a três aplicações: impermeabilização para depósitos de resíduo ou sua cobertura, material de enchimento e geração de solo artificial para revegetação. Para tal, foram analisadas misturas com três resíduos: proveniente do processo com quadro de diamante – CG, de lâminas com abrasivo – SR, ou uma mistura das duas GG e com outros materiais. A composição de cada amostra e seu uso hipotético é mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 – Materiais e misturas que foram submetidos à caracterização para as finalidades propostas (Modificado de DINO et al., 2013).

Tipo de material	Tipo de material/mistura	Amostra	Uso hipotético
Resíduo puro	serragem com quadro de diamante	CG	
	serragem com lâminas e abrasivo	SR	
	mistura das duas anteriores	GG	
Resíduo com bentonita	CG + bentonita (95%-5%)	CG 5%	Impermeabilização de depósito de resíduo ou cobertura
	CG + bentonita (90%-10%)	CG 10%	
	SR + bentonita (95%-5%)	SR 5%	
Resíduo com material britado	GG + material britado (90% - 10%)	COA 10%	Material de enchimento
	GG + material britado (80% - 20%)	COA 20%	
	GG + material britado (70% - 30%)	COA 30%	
Resíduo com areia, adubo e turfa	GG + turfa (50% - 50%)	I1	Solos artificiais para revegetação
	GG + adubo (50% - 50%)	I2	
	GG + adubo + areia/turfa (50% - 25% - 25%)	I3	

Foram realizados ensaios de granulometria, limites de Atterberg, condutividade hidráulica, Proctor modificado e cisalhamento direto. Os resultados para os resíduos puros são mostrados na Tabela 9. No GG, foram realizados 2 ensaios de granulometria, sendo que cada

amostra forneceu um resultado diferente. Os resultados com as misturas destinadas ao aproveitamento em depósitos de resíduo são mostrados na Tabela 10.

Tabela 9 – Resultados para as amostras de resíduo puro (Modificado de DINO et al., 2013).

Amostras	Granulometria	Limites de Atterberg	K (m/s)	w _{ót} (%)	Ø (°)
SR	Silte argiloso com areia	Não plástico	2,3x10 ⁻⁸	15%	34,2° - 34,4°
CG			2,9x10 ⁻⁸	14%	36,7° - 37,3°
GG	Silte argiloso / Silte arenoso		9,2x10 ⁻⁹	14%	31,9° - 33,0°

LEGENDA: K – coeficiente de permeabilidade; w_{ót} - umidade ótima; Ø – ângulo de atrito interno.

Segundo os autores as amostras GG, SR5%, CG5% e GG10% possuem coeficientes de permeabilidade necessário para serem utilizadas como cobertura e CG10% camada impermeabilizante conforme as leis italianas, que estimam que esse parâmetro tem que ser menor que 10⁻⁹ m/s para o fundo e menor que 10⁻⁸ m/s para cobertura.

Tabela 10 – Resultados dos ensaios destinados ao aproveitamento em depósitos de lixo (Modificado de DINO et al., 2013).

Misturas	Granulometria	LL (%)	LP (%)	K (m/s)	w _{ót} (%)	Ø (°)
CG 5%	Silte argiloso com areia	39,7	29,2 - 31,0	1,9x10 ⁻⁹	17%	28,9° - 29,3°
CG 10%		36,3 - 37,2	24,9 - 25,8	2,3x10 ⁻⁹ - 4,2x10 ⁻¹¹	16%	33,7° - 35,2°
SR 5%	Silte arenoso com argila	39,7 - 40,5	26,3	5,2x10 ⁻⁹ - 5,6x10 ⁻⁹	18%	36,8°

LEGENDA: LL – limite de liquidez; LP – limite de plasticidade; K – permeabilidade; w_{ót} - umidade ótima; Ø – ângulo de atrito interno.

Com vista a utilizar o resíduo como material de enchimento para trabalhos na engenharia civil, como preencher valas e cavas, foram realizados ensaios cujos resultados são mostrados na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados dos ensaios destinados ao aproveitamento como material de enchimento (Modificado de DINO et al., 2013).

Misturas	Granulometria	Limites de Atterberg	K (m/s)	w _{ót} (%)	Ø (°)
COA 10%	Silte com areia, pedregulho e argila	Não plástico	-	17%	37,6°
COA 20%			-	18%	38,1°
COA 30%			-	17%	38,8°

LEGENDA: K – permeabilidade; w_{ót} - umidade ótima; Ø – ângulo de atrito interno.

- Solos artificiais

Para se utilizar o resíduo em solos artificiais para revegetação de áreas degradadas, analisaram-se três misturas. Os resultados são mostrados na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados dos ensaios destinados ao aproveitamento como solos artificiais (Modificado de DINO et al., 2013).

Misturas	Granulometria	Limites de Atterberg	K (m/s)	w _{ót} (%)	Ø (°)
I1	Silte argiloso com areia	Não plástico	$6,8 \times 10^{-8}$	-	37,6°
I2	Silte argiloso pedregulhento com areia		$6,9 \times 10^{-8}$	-	38,1°
I3	Areia com silte argiloso		$5,2 \times 10^{-8}$	-	38,8°

LEGENDA: K – permeabilidade; w_{ót} - umidade ótima; Ø – ângulo de atrito interno.

Para uso como preenchimento de cavas e solos artificiais, os resultados geotécnicos se mostram promissores, porém a exploração do resíduo nessas aplicações requer análises adicionais. É necessário garantir que não haverá problemas de contaminação do solo, água e ar, que podem estar ligados a presença de metais potencialmente tóxicos e hidrocarbonetos totais de petróleo (TPH). Para diminuir a quantidade de metais potencialmente tóxicos pode-se realizar separação magnética ou hidrogravimétrica, já para o TPH podem ser realizados tratamentos com biorremediação.

2.7.6. Solo-Cimento

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) o solo-cimento é uma mistura de solo, cimento e água, que em proporções adequadas resulta em um material com boa resistência à compressão simples, bom índice de impermeabilidade, baixa retração e boa durabilidade. O cimento geralmente é utilizado variando o teor entre 5% e 10%.

O solo-cimento pode ser utilizado em diversas aplicações, como as citadas por Silveira (2005):

- Camadas de pavimentos rodoviários, pátios industriais, estacionamentos e pistas de aeroportos;
- Blocos e painéis para construção civil;
- Revestimento de barragens, canais, diques e reservatórios;
- Revestimento e impermeabilização de túneis;
- Estabilização de taludes e encostas;

Miranda (2007) estudou a viabilidade de aplicar o resíduo de serragem de mármore e granitos em solo-cimento com vista a fabricação de tijolos. O solo utilizado possui cerca de 50% de finos (passante peneira #200), o cimento foi um Portland composto com fíler, CP II-F-32, da marca Cimento Goiás e o resíduo foi coletado em uma empresa que beneficia mármore e granitos. Ela realizou os ensaios de resistência à compressão simples variando o teor de resíduo e cimento, como mostrado na Tabela 13.

Tabela 13 – Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão simples (Modificado de MIRANDA, 2007).

% Resíduo	% Cimento	% Solo	Tensão de ruptura (MPa) média	
			7 dias de cura	28 dias de cura
0	5	95	0,53	1,10
	10	90	3,10	3,29
	15	85	4,14	3,86
10	5	85	0,87	0,91
	10	80	2,12	2,74
	15	75	3,20	4,52
15	5	80	0,55	1,21
	10	75	2,89	3,71
	15	70	4,58	5,60
30	5	65	1,19	1,32
	10	60	3,08	2,86
	15	55	4,03	4,10

Analisando-se a Tabela 13 nota-se um valor máximo de 4,03 MPa aos 7 dias de cura e 4,03 MPa com 28 dias de cura dentre os traços com presença de resíduo para a proporção 30% de resíduo e 15% de cimento. Todos os CPs com 10 e 15% de adição de cimento apresentaram resistência acima de 2,1 MPa, mínimo estabelecido pela NBR 12253 (ABNT, 1992).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esse capítulo apresenta os materiais empregados para execução dessa pesquisa, além dos métodos e procedimentos de ensaios utilizados no decorrer do trabalho.

3.1. Resíduo

O resíduo utilizado na pesquisa é proveniente de uma empresa de serragem e beneficiamento de rochas ornamentais no interior de São Paulo. A Figura 11 mostra o local em que o resíduo fica armazenado até perder umidade e ser levado ao aterro:



Figura 11 - Depósito da lama de serragem e polimento (Arquivo do autor).

Como são serradas em uma única empresa vários tipos de rochas e os resíduos provenientes dessas serradas são dispostas juntamente, nesse estudo a lama residual foi constituída por resíduos de corte de blocos de três tipos de “granitos” representando condições mais próximas ao dia-a-dia de empresas beneficiadoras de rochas ornamentais. A proporção da mistura foi aproximadamente de 100 kg de sienito “Marrom Caldas”, 50 kg do granito “Marrom São Paulo” e 200 kg do gnaisse “Branco Piracema”. O resíduo foi coletado manualmente do poço de expurgo do tear e ensacado, como mostra a Figura 12.



Figura 12 – Coleta manual do resíduo diretamente do poço de expurgo do tear.

As amostras de resíduo foram preparadas para os ensaios de caracterização, compactação e moldagem dos CPs conforme NBR 6457 (ABNT, 1986).

A lama precisou ser secada em estufa em temperatura baixa, cerca de 60°C por aproximadamente 12 dias devido à alta umidade. Após secagem foi destorroada e peneirada (peneira nº 4). Depois foi colocada na betoneira e homogeneizada por 20 minutos. Em seguida foi disposta em uma lona para ser novamente homogeneizada com o auxílio de enxada e pá. Ao final todo o material foi ensacado e devidamente identificado. O processo descrito acima pode ser visualizado na Figura 13.



Figura 13 – Preparação da amostra de resíduo: (A) Destorroamento manual (B) Homogeneização e (C) Estocagem do material homogeneizado (Arquivo do autor).

3.2. Ensaio realizados

A Tabela 14 apresentada abaixo mostra a quantificação dos ensaios realizados. Ela também foi utilizada como controle na execução desses ensaios.

Tabela 14 – Listagem dos ensaios realizados na pesquisa.

Ensaio		Resíduo			
		Puro	2% cimento	5% cimento	
Classificação do resíduo conforme NBR 10004	Lixiviação	-			
	Solubilização	-			
Caracterização química e mineralógica	Difração de raios X	-			
	Fluorescência de raios X	-			
Caracterização geotécnica	Granulometria	-			
	Massa específica dos sólidos	-			
	Limites de consistência	Contração	-		
		Plasticidade	-		
		Liquidez	-		
	Compactação Proctor	Energia normal	-		
Energia intermediária		-			
Resistência à compressão simples	Sem imersão	0 dias de cura	-		
		7 dias de cura	-	-	
		14 dias de cura	-	-	
		28 dias de cura	-	-	
	Com imersão	0 dias de cura	-		
		7 dias de cura	-	-	
		14 dias de cura	-	-	
		28 dias de cura	-	-	
Resistência ao cisalhamento direto	Sem cura	Tensão normal 50 kPa	-		
		Tensão normal 100 kPa	-		
		Tensão normal 200 kPa	-		
Metodologia MCT	Compactação mini Proctor	-			
	Mini CBR	-			
	Expansão e Contração	-			
	Permeabilidade	-	-	-	
	Compactação mini MCV	-			
	Perda de massa por imersão	-			
Classificação geotécnica MCT	-				

3.2.1. Classificação do resíduo conforme NBR 10004

O ensaio de classificação dos resíduos sólidos, conforme proposto nas normas da ABNT, tem como objetivo classificar os resíduos quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para seu correto gerenciamento e possível utilização.

Para a classificação do resíduo utilizou-se a NBR 10004 (ABNT, 2004a). Para tanto foram realizados ensaios de lixiviação conforme NBR 10005 (ABNT, 2004b) e solubilização NBR 10006 (ABNT, 2004c). A Figura 14 mostra um esquema de classificação.

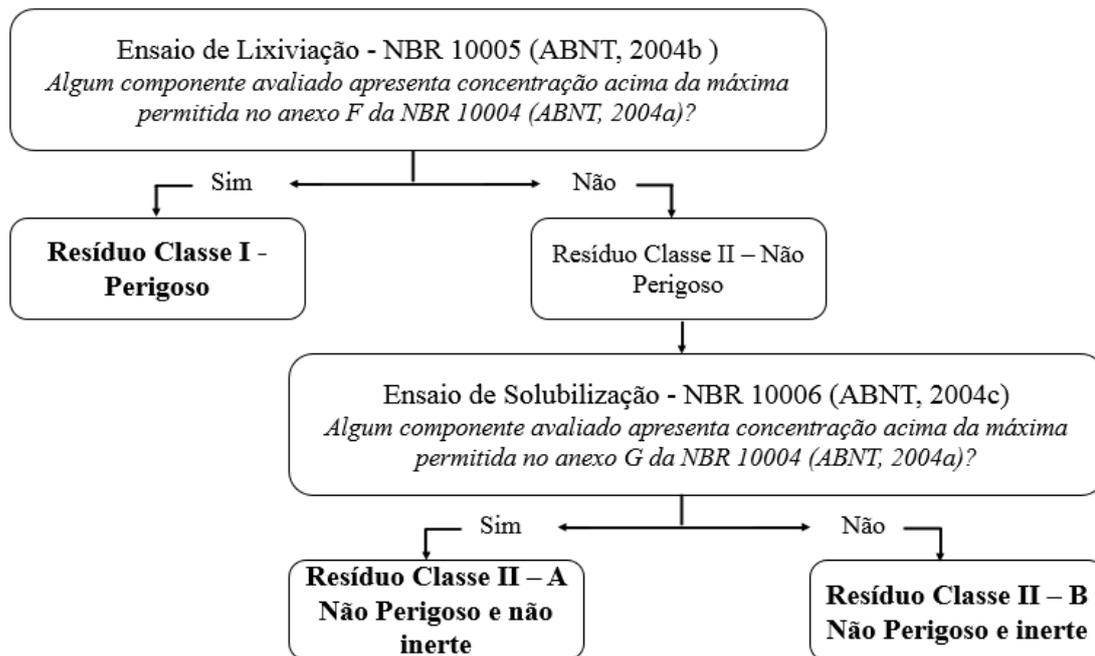


Figura 14 – Esquema mostrando a sequência necessária à classificação ambiental utilizada para o resíduo.

Os ensaios de Lixiviação e Solubilização foram realizados no Laboratório de Saneamento do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP).

Lixiviação

O ensaio de lixiviação é executado com o objetivo de avaliar a concentração de substâncias contaminantes por meio de lavagem e percolação e desta forma classificar o resíduo segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004a). O primeiro passo é determinar por meio da avaliação do pH qual solução de extração utilizar. Depois adiciona-se a 100 g do resíduo um volume determinado da solução de extração e mantém em frasco fechado sob agitação por um período de 16 ± 2 horas à temperatura de até 25°C com uma rotação de (30 ± 2) rpm no

agitador rotatório. Em seguida filtrou-se a amostra em membrana filtrante de 0,45 μm de porosidade sendo que o filtrado é o extrato lixiviado, posteriormente encaminhando para definição das porcentagens dos constituintes. O extrato lixiviado é obtido segundo a NBR 10005 (ABNT, 2004b).

Solubilização

O ensaio de solubilização é executado com a finalidade de diferenciar os resíduos da classe IIA (não inertes) da classe IIB (inertes). Após o resíduo ser secado a 42 °C, transferiu-se 250 g para um frasco de 1500 mL e adicionou-se 1000 mL de água destilada, agitando por 5 minutos. O frasco foi coberto com plástico filme e ficou em repouso por 7 dias a 25°C. A mistura foi filtrada em membrana filtrante de 0,45 μm de porosidade. O filtrado constitui o extrato solubilizado, posteriormente encaminhando para definição das porcentagens dos constituintes. O extrato solubilizado é obtido conforme a NBR 10006 (ABNT, 2004c).

3.2.2. Caracterização química e mineralógica

A caracterização química e mineralógica foi realizada em conjunto com a realização dos ensaios de Difração de raios X e Fluorescência de raios X. O primeiro ensaio mostra as espécies cristalinas presentes, como por exemplo os minerais enquanto o segundo fornece as porcentagens de cada elemento. A quantificação por Difração de raios X é difícil, visto que a altura dos picos obtidos depende além da sua quantidade do grau de cristalinidade das espécies (RATTI, 2015).

Difração de raios X

O ensaio se baseia na incidência de um feixe de raios x com ângulo θ sobre um cristal de distância interplanar d , conforme mostra a Figura 15 (PICCOLI et. al., 2009). Os feixes refletidos por dois planos subsequentes apresentam o fenômeno da difração. Quando a diferença entre seus caminhos óticos for um número inteiro de comprimentos de onda, haverá superposição construtiva e um feixe difratado será observado; caso contrário, haverá superposição destrutiva e não se observará qualquer sinal de raios X.

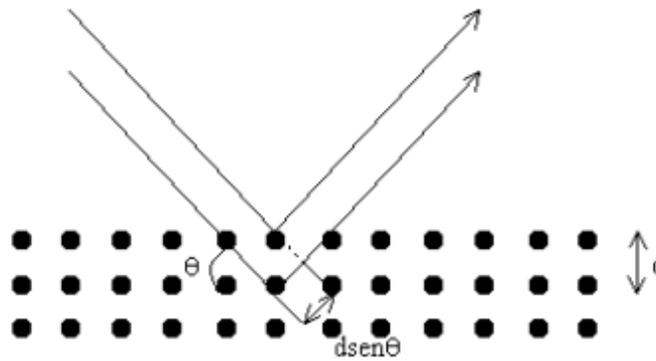


Figura 15 - Incidência de um raio x sobre um cristal

A Equação 3 é conhecida como Lei de Bragg e rege o uso da difração de raios X para estudos cristalográficos. Sendo os parâmetros θ , n e λ conhecidos, encontra-se o valor de d , usado para reconhecer os minerais presentes na amostra por meio de tabelas ou softwares que já fazem o reconhecimento automaticamente.

$$2d \sin \theta = n \lambda \quad \dots\dots (3)$$

Onde:

d = espaçamento interplanar, parâmetro que se deseja medir

θ = ângulo de difração dos feixes de raios-x

n = número inteiro

λ = comprimento de onda da radiação monocromática utilizada

O ensaio foi realizado no Laboratório de Cristalografia do Instituto de Física de São Carlos (IFSC) da USP. O gerador de raios-x utilizado foi o da marca Rigaku Ultima IV e seu modelo Ultima IV com potência de 40kv e 30 Am, velocidade de 2°/minuto, tubo de Cu com comprimento de onda do tubo 1,45Å. Foram realizadas análises de difração de raios-x 2 theta/theta.

Fluorescência de raios X

A fluorescência de raios X consiste em incidir um feixe de raios X em uma amostra e produzir radiações fluorescentes (transições eletrônicas dos elétrons das camadas mais internas dos átomos), que são características para cada elemento químico, sendo estas radiações captadas por um detector. A técnica é aplicada para determinações qualitativas e quantitativas de constituintes de diversos materiais (SCARPIN, 2003).

Os teores dos constituintes do resíduo foram determinados por análise sem padrões (*standardless*) dos elementos químicos detectados, de flúor e urânio, em espectrômetro por fluorescência de raios X Axios Advanced, marca. A perda ao fogo foi efetuada a 1050°C por 1 hora. O ensaio foi realizado pelo Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) do Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

3.2.3. Caracterização geotécnica

Os ensaios referentes à caracterização geotécnica do resíduo foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Geotecnia da EESC / USP.

Granulometria conjunta

Os sólidos de um solo possuem diferentes tamanhos em quantidade variadas, sendo então de extrema importância a determinação do tamanho de cada sólido e sua porcentagem de ocorrência. Para solos com partículas mais finas é necessária a utilização da granulometria conjunta, que envolve a sedimentação das partículas menores e o peneiramento das maiores. Na etapa de sedimentação utilizou-se 61,52 g e 125 ml de defloculante que formaram uma pasta deixada em repouso por 12 horas e depois desse período permaneceu por 15 minutos no dispersor. A mistura foi transferida para uma proveta e o volume foi completado até 1000ml. A amostra foi homogeneizada e depois foram anotadas as densidades em intervalos de tempo pré-definidos. Finalizado o ensaio a amostra foi lavada na peneira nº 200 e a parte retida foi secada em estufa para realizar a etapa de peneiramento, que consiste em anotar a massa de resíduo retida em cada peneira. De posse das densidades e das massas retidas define-se a curva granulométrica. O procedimento do ensaio é o definido pela NBR 7181 (ABNT, 1988b).

Massa específica dos sólidos

A massa específica dos sólidos depende do tipo de mineral e da porcentagem de ocorrência de cada um deles no solo. O procedimento começa com uma preparação prévia da amostra que deve ficar em repouso por 12 horas com água destilada. Depois essa amostra é transferida para um picnômetro com o cuidado de não perder material completando o volume até 250 cm³. É então realizada a retirada de ar do picnômetro. O ensaio consiste em se tomar a massa do conjunto picnômetro + água (sempre mantido o volume de 250 cm³) + resíduo em

diferentes temperaturas que variam em um intervalo de cerca de 1,5°C. O ensaio de massa específica dos sólidos foi realizado baseado na norma da NBR 6508 (ABNT, 1984b).

Limites de consistência

Os limites de consistência são usados para separação dos estados de consistência de um solo fino ou da fração fina de um solo grosso, por meio de um teor de umidade limite entre esses estados, como visto na Figura 16. O estado sólido (I), semi-sólido (II), plástico (III) e líquido (IV) são definidos pelos limites de contração (W_C), plasticidade (W_P) e liquidez (W_L), sendo S_r o grau de saturação.

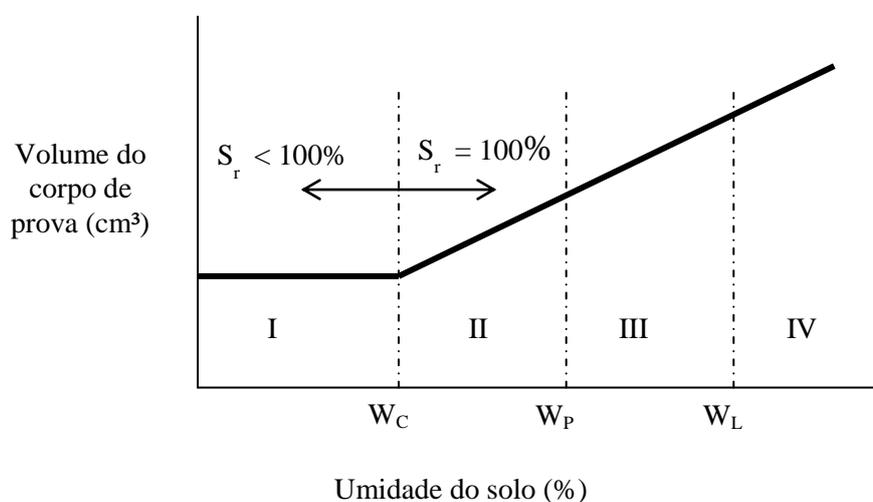


Figura 16 – Variação do volume do solo com a variação da umidade (NOGUEIRA, 2001).

Um solo quando no estado líquido (IV) não apresenta forma própria nem resistência ao cisalhamento. Quando se retira gradualmente água desse solo, seu comportamento vai se modificando, até que para uma dada umidade a amostra começa a adquirir forma própria e uma pequena resistência ao cisalhamento (w_L). O solo começa nesse momento a ter um comportamento plástico (III), definido como a capacidade que uma argila tem de alterar sua forma sem apresentar ruptura nem variação volumétrica, mantida constante a umidade. Prosseguindo a retirada de água, o solo atinge um ponto em que seu comportamento deixa de ser plástico (w_P), tornando-se semi-sólido (II) e começando ao formar fissuras quando manuseado. A partir desse momento a retirada de água chegará a um limite em que o solo perderá água a volume constante (w_C), e nessa situação o solo estará no estado sólido (I) (NOGUEIRA, 2001).

- Limite de liquidez

O ensaio consiste em colocar uma pasta formada pela amostra e água em uma concha fazendo uma ranhura nessa pasta. Com o equipamento preso a manivela girá-la a uma velocidade de 2 voltas por segundo. Anotar quantas voltas serão necessárias para que a ranhura se feche. Após isso, colher uma amostra para checar a umidade. Fazer esse procedimento pelo menos 5 vezes com o valor de golpes variando entre 40 e 10 golpes. A realização do ensaio para menores umidades foi difícil visto que o resíduo começou a empedrar e com isso ficava difícil fazer o traço na amostra. O método utilizado para o ensaio de limite de liquidez é descrito na NBR 6459 (ABNT, 1984a).

- Limite de plasticidade

Esse teste envolve a confecção de um pequeno bastão de amostra para ser rolada em uma placa esmerilhada de vidro com a mão. O objetivo é chegar a um bastão de aproximadamente 3 mm de diâmetro com início de formação de fissuras. Sendo essas duas características satisfeitas, tira-se uma amostra da parte fissurada para checagem da umidade. O ensaio de limite de plasticidade foi conduzido de acordo com as diretrizes da norma NBR 7180 (ABNT, 1988a).

- Limite de contração

O procedimento para a realização desse ensaio consiste em preencher uma cápsula com a pasta de material e água referente a umidade de 10 golpes no ensaio de limite de plasticidade. Retira-se o ar dessa pasta e deixa-a secar a temperatura ambiente até umidade constante. O ensaio de limite de contração foi realizado segundo as recomendações da NBR 7183 (ABNT, 1982).

Compactação

O procedimento consiste em compactar em 3 camadas CPs com teores de umidade diferentes pesando-os ao final da compactação e retirando cápsulas para verificar o teor de umidade. Com esses dados consegue-se traçar a curva de variação da massa específica seca em função do teor de umidade. No trabalho utilizaram-se a energia intermediária e normal e o experimento foi realizado sem reutilização da amostra. Desse procedimento tem-se a umidade ótima de compactação que fornece a maior massa específica seca. A norma que rege esse ensaio é a NBR 7182 (ABNT, 1988c).

3.2.4. Resistência

Os ensaios referentes à resistência do resíduo foram realizados no Laboratório de Geossintéticos e de Mecânica dos Solos do Departamento de Geotecnia da EESC / USP.

Compressão simples

Segundo Lopes Júnior (2007) os ensaios de compressão simples têm sido muito utilizados na maioria dos programas experimentais relatados na literatura quando o objetivo é verificar a efetividade na resistência em solos tratados. Além disso esse ensaio é simples, de rápida execução, baixo custo, confiável e amplamente difundido no meio técnico. O procedimento utilizado foi uma mescla das normas NBR 12770 (ABNT, 1992) e NBR 12253 (ABNT, 2012), que abordam respectivamente os ensaios para solos e para solo-cimento.

- Confeção dos CPs

Primeiramente foram tomadas as medidas da fôrma em que seriam moldados os CPs, que devem possuir 50 ± 2 mm de diâmetro e 100 ± 2 mm de altura. Esse percentual de erro foi definido para que os CPs tivessem um padrão de tamanho. As medidas obtidas do molde foram as mostradas na Tabela 15:

Tabela 15 – Medidas e volume do molde para confecção dos CPs para ruptura à compressão simples.

Medida	Identificação medidas						Volume (cm ³)
	1	2	3	4	5	Média	
Diâmetro (mm)	51,10	51,10	51,12	51,00	51,00	51,06	204,79
Altura (mm)	100						

A umidade ótima utilizada foi 25,6% e ρ_d máximo de 1,545 g/cm³, obtidos no ensaio de Compactação (Proctor) com energia normal. Considerando-se as Equações (4) e (5), pode-se chegar a Equação (6) utilizada para calcular o valor da massa de resíduo necessária a cada CP:

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} \quad \text{..... (4)}$$

$$M = M_s \times (1 + w) \quad \text{..... (5)}$$

$$M = \rho_{d\text{máx}} \times V_{\text{CP}} \times (1 + w) \times GC \quad \text{..... (6)}$$

Onde:

ρ_d = Massa específica seca (g/cm³);

M_S = Massa de sólidos (g);

V = Volume (cm³);

w = Teor de umidade (%);

$\rho_{dm\acute{a}x}$ = Massa específica seca máxima (g/cm³);

V_{CP} = Volume do corpo-de-prova;

GC = Grau de compactação (%).

O grau de compactação (GC) adotado foi 1. Por meio da Equação (6) obteve-se a massa média de 397,40 g para cada CP, totalizando a massa de 2384,38 g para 6 CPs. Esse valor foi arredondado para 2500 g para retirada de cápsulas de umidade. Para se chegar a umidade de 25,6% foi necessária adição de água. Levando-se em consideração a Equação (7) e voltando-se na Equação (5) chega-se a fórmula (8) para definição de massa de água a adicionar:

$$w = \frac{M_w}{M_S} \quad \dots\dots (7)$$

$$M_{\text{água a adicionar}} = \frac{M}{1 + w_{\text{inicial}}} \times (w_{\text{compactação}} - w_{\text{inicial}}) \quad \dots\dots (8)$$

Onde:

M_w = Massa de água (g);

$M_{\text{água a adicionar}}$ = Massa de água a adicionar para se chegar a umidade de compactação (g);

w_{inicial} = Umidade inicial da amostra após secagem, no trabalho a umidade inicial foi 5,31%;

$w_{\text{compactação}}$ = Umidade de compactação, no trabalho para a energia normal foi 25,6%.

Chegou-se à partir da fórmula acima ao valor de 481,67 g de água, como sabemos que a massa específica da água é 1 g/cm³ temos que o volume necessário de água é de 481,67 cm³ que corresponde a 481,67 mL.

A Figura 17 ilustra o processo de homogeneização e preparação da amostra estudada:

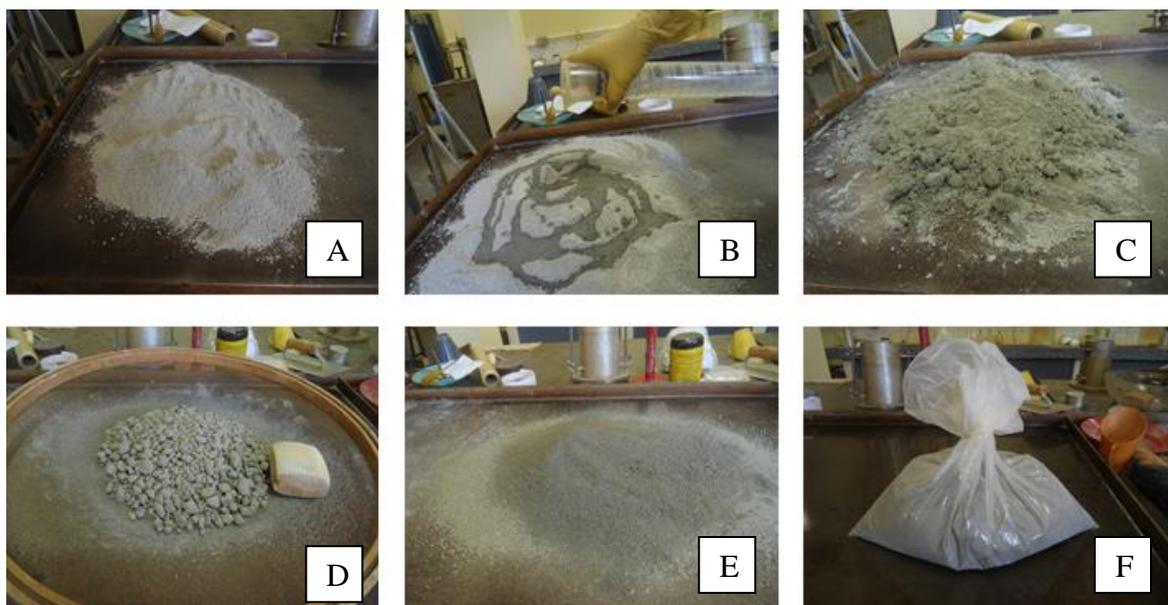


Figura 17 – Preparação do material para moldagem dos CPs: (A) Após as massas serem pesadas, seja o resíduo puro ou com cimento, foram dispostas na bancada e homogeneizadas manualmente, (B) A quantidade de água destilada calculada foi jogada sobre a massa, (C) O material foi homogeneizado manualmente, (D) Passado na peneira #4 e os torrões restantes destorroados com o auxílio do destorroador manual, (E) O material foi novamente homogeneizado manualmente e (F) Ensacado para moldagem dos CPs (Arquivo do autor).

O traço da mistura foi 2500 g de resíduo/cimento e 481,67 ml de água. Porém nem todos os CP's eram compostos de apenas resíduo. Com isso foi realizado a proporção dentro dessa massa para obter as misturas com 2 e 5% de cimento. Os CPs foram moldados em compactador manual em 5 camadas, o processo é mostrado na Figura 18. Para cada 6 CPs de cada tipo foram utilizados o quantitativo de material mostrado na Tabela 16.



Figura 18 – Moldagem dos CPs para ruptura à compressão simples: (A) Foi pesada a massa de uma camada, sempre colocando-se um pouco a mais do necessário devido à perda de material no processo de compactação e de extração do CP, (B) Colocação da massa no molde, (C) Compactação com controle de altura da camada realizado com o auxílio do paquímetro, (D) Extração do CP do molde, (E) Pesagem do CP, (F) Medição de três diâmetros a três alturas diferentes, (G) Medição de três alturas buscando-se fazê-las com ângulos de 120° e (H) CP identificado (Arquivo do autor).

Tabela 16 – Quantitativo de material utilizado em cada tipo de mistura para confecção de 6 CPs para ruptura à compressão simples.

Quantidades	Resíduo		
	Puro	2% de cimento	5% de cimento
Resíduo (g)	2500	2450	2375
Cimento (g)	-	50	125
Água (ml)	481,67	481,67	481,67

O controle do grau de compactação dos CPs encontra-se detalhado nos Apêndices A, B e C. Foram utilizados no ensaio CPs com grau de compactação variando de $100 \pm 3\%$ e a umidade de moldagem de $25,6 \pm 2\%$. Para a média das resistências, foram descartados valores que se afastaram em mais de 5% da média, calculados pelo coeficiente de variação.

- Períodos de cura e imersão

Os CPs que necessitaram de cura foram acondicionados em caixas de isopor e dispostos em câmara úmida por tempos pré-determinados. Os que foram imersos eram retirados das embalagens de plástico filme e colocados em imersão durante um período de 4 horas em água destilada dentro de um recipiente apropriado (Figura 19). Após o tempo necessário foram secados com papel toalha, embalados e submetidos aos ensaios de ruptura.



Figura 19 – Imersão de CPs: (A) CPs de resíduo puro, (B) Os CPs de resíduo puro se desfizeram em menos de 5 minutos quando imersos, (C) CPs com 2% de cimento e (D) Os CPs com 2% de cimento resistiram a imersão, o mesmo comportamento foi notado nos CPs com 5% de cimento (Arquivo do autor).

- Execução do ensaio

O ensaio consiste em comprimir o CP em prensa de compactação que é ligada a um computador que traça os gráficos de deslocamento em função da tensão identificando a tensão de ruptura do CP.

Cisalhamento direto

Segundo Pinto (2006) a ruptura dos solos é quase sempre um fenômeno de cisalhamento, como por exemplo quando uma sapata é carregada até a ruptura ou quando ocorre a ruptura de um talude. Dificilmente a ruptura ocorrerá por tensões de tração.

O ensaio foi realizado conforme estabelece a *American Society for Testing and Materials* - ASTM D 3080 (ASTM, 2011).

A resistência ao cisalhamento é definida em função da coesão e do ângulo de atrito por uma envoltória retilínea, obtida pelo ensaio de cisalhamento direto realizado com diferentes tensões normais:

$$\tau = c + \sigma \times tg\phi \quad \text{..... (9)}$$

Onde:

τ = tensão cisalhante (kPa);

c = coesão aparente (kPa);

σ = tensão normal (kPa);

ϕ = ângulo de atrito (°).

- Confeccção dos CPs

Foram realizadas 5 medidas de largura e espessura da parte interna do molde (Tabela 17):

Tabela 17 – Medidas realizadas no molde de resistência ao cisalhamento.

Medida	Identificação medidas						Volume (cm ³)
	1	2	3	4	5	Média	
Largura (mm)	100,8	100,9	101,2	101,1	101,2	101,04	259,72
Altura (mm)	25,4	25,6	25,4	25,5	25,3	25,44	

Foi definida a massa do CP de 504 g de resíduo para cada CP, a ser compactado em uma única camada. A Figura 20 mostra as etapas na compactação dos CPs para o ensaio de cisalhamento direto.

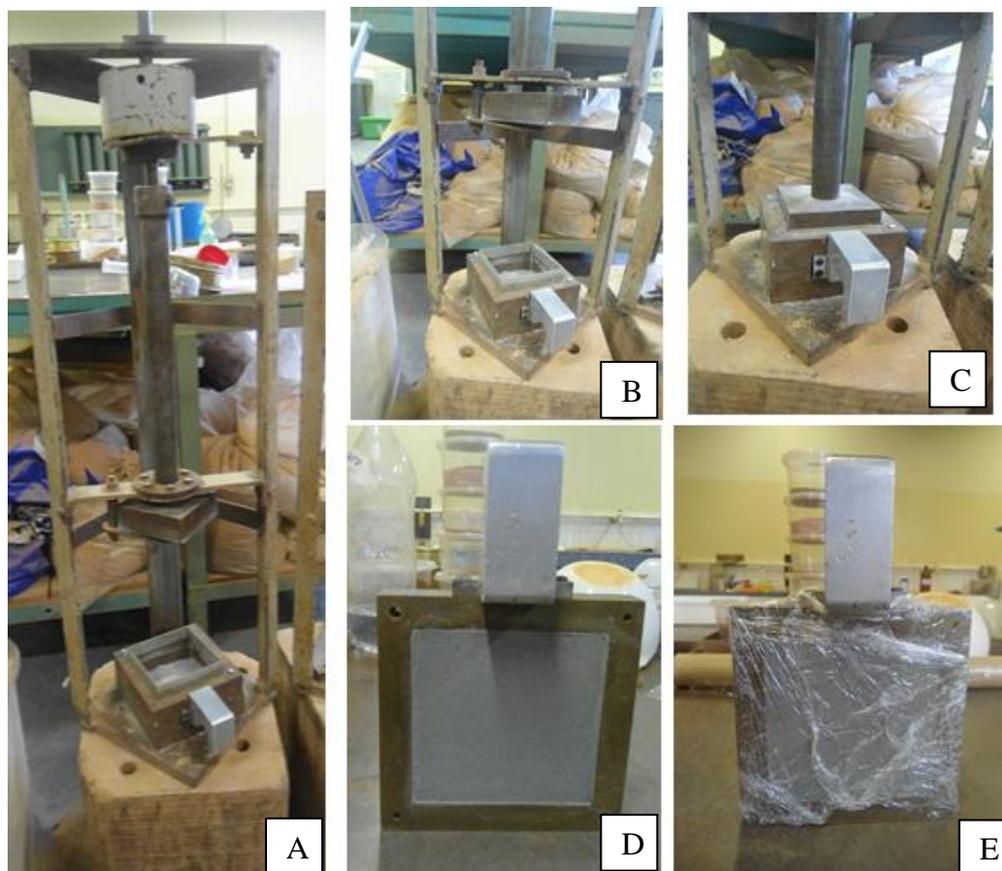


Figura 20 – Compactação dos CPs: (A) Equipamento de moldagem com o molde posicionado; (B) Detalhe do molde; (C) Sobrecarga posicionada para receber os golpes e compactar o solo; (D) CP moldado; (E) CP embalado com plástico filme para evitar a perda de umidade (Arquivo do autor).

- Execução do ensaio

O ensaio consiste em manter a parte de baixo do molde fixo e deslocar a velocidade constante a parte de cima, sendo a tensão normal pré-definida. A velocidade utilizada foi de 0,5 mm/min e constante da mola de 0,0016 mm/divisão. O controle dos CPs para o ensaio de cisalhamento direto é mostrado no Apêndice D. Os critérios definidos de controle para teor de umidade e grau de compactação foram os mesmos utilizados para os CPs de compressão simples.

3.2.5. Metodologia MCT

A maior parte da tecnologia de pavimentação foi concebida e desenvolvida na Europa e Estados Unidos, onde costuma-se limitar a porcentagem de finos na construção de pavimentos, pois na maior parte das vezes nesses locais os finos reduzem a permeabilidade dos materiais e sua rigidez, aumentam sua deformabilidade e, principalmente, aumentam a expansão volumétrica em presença de água, o que causa redução na resistência nesses solos. Porém, essas características indesejadas podem não ser notadas em solos tropicais que possuem propriedades bem diferentes dos solos de clima temperado. Sendo assim com o desenvolvimento dos países de clima tropical observou-se a incoerência entre as propriedades esperadas dos solos finos e o que eles realmente mostravam. Desse modo, Nogami e Villibor, engenheiros do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER/SP) e professores da USP publicaram em 1981 uma classificação aplicável aos solos tropicais para obras viárias (BERNUCCI et al., 2006). A sistemática MCT é recomendada para o estudo de solos tropicais que passam integralmente ou possuem uma pequena parte (menos de 10%) retida na peneira de 2mm, (VILLIBOR e NOGAMI, 2009). A quase totalidade dos solos do Estado de São Paulo e outras regiões do Brasil estão nesse grupo, diferentemente dos solos de regiões do hemisfério norte, que são mais grosseiros.

A sistemática MCT envolve uma série de ensaios, descritos a seguir. O presente estudo seguiu as recomendações explicitadas por Villibor e Nogami (2009).

Compactação Mini-Proctor

O ensaio segue o mesmo procedimento estabelecido na Compactação Proctor, realizada na caracterização geotécnica do resíduo com a finalidade de definir a umidade ótima do material e a máxima massa específica seca. O ensaio foi realizado com energia de compactação intermediária no Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da EESC/USP.

Mini-CBR e expansão

Fornece a capacidade de suporte utilizável para dimensionar os pavimentos e escolher os materiais a serem utilizados para base, reforço e sub-base além também de servir para caracterizar os solos do subleito. Foi realizado na energia de compactação normal. O ensaio de expansão é feito com o objetivo de verificar o aumento do volume como aumento do teor de umidade. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da EESC/USP.

Ensaio de Contração

O ensaio é realizado medindo-se diretamente a contração axial dos CPs por secagem lenta ao ar. O ensaio foi realizado no Laboratório de Estradas do Departamento de Transportes da EESC/USP.

Permeabilidade

O ensaio de permeabilidade foi realizado com três tipos de CPs: resíduo puro, resíduo com 2% de cimento e resíduo com 5% de cimento. Primeiramente foi ensaiado o CP com resíduo puro com carga constante. Segundo a metodologia para esse ensaio, toma-se durante um dado período de tempo o volume de água que sai do permeâmetro. No caso do CP de resíduo puro, a água passava muito lentamente, portanto esse método não seria válido, mudando para carga variável. O mesmo procedimento foi adotado nos outros tipos de CPs. As amostras utilizadas não são indeformadas, foram moldados CPs para execução do ensaio.

O CP de resíduo puro foi moldado em um permeâmetro de diâmetro 70 mm e altura 100 mm. Após isso foi feita a montagem com geotêxtil na base, pedregulho, o CP e pedregulho, como mostra a Figura 21.



Figura 21 – Ensaio de permeabilidade para CP de resíduo puro: (A) Moldagem do CP no compactador manual, (B) Pedregulhos utilizados, (C) Geogrelha, (D) Permeâmetro montado e (E) Esquema da montagem interna do permeâmetro (Arquivo do autor).

Os CPs que continham cimento foram moldados assim como os para rompimento à compressão simples com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm, embalados e deixados em cura por 28 dias. Após isso foram colocados no permeâmetro grande com parafina e pedregulhos. A Figura 22 mostra o procedimento de montagem do permeâmetro.

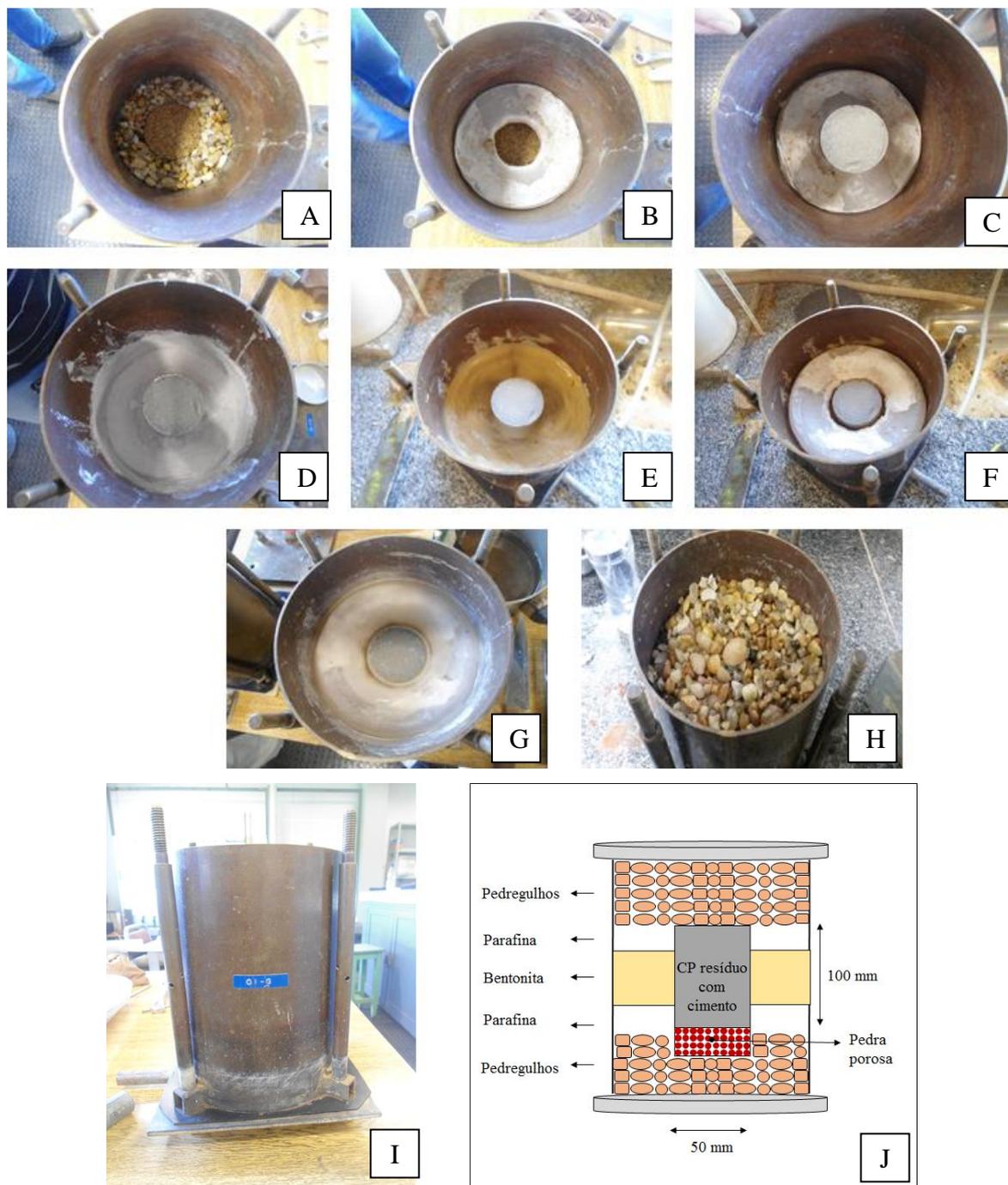


Figura 22 – Montagem do permeâmetro para CPs com cimento: (A) Primeiro colocou-se os pedregulhos e uma pedra porosa no centro, (B) Depois uma placa de parafina, (C) O CP foi encaixado na base de parafina, (D) Preenchimento com parafina líquida, (E) Cama de bentonita, (F) Colocou-se outra placa de parafina, (G) Preenchimento com parafina líquida, (H) Camada de pedregulhos, (I) Permeâmetro grande pronto para ser fechado e (J) Esquema mostrando a montagem interna do permeâmetro (Arquivo do autor).

Compactação Mini – MCV

Para o ensaio de mini – MCV, Figura 23, o resíduo foi umedecido previamente nos teores de umidade de 29%, 27%, 25%, 23% e 21%. Após isso uma quantidade de 200 gramas foi colocada no molde de compactador mecânico onde os deslocamentos foram medidos durante os golpes. Caso houvesse exsudação o ensaio era finalizado.



Figura 23 – Ensaio de mini-MCV: (A) Compactador mecânico com leitor de deslocamento acoplado, (B) Base de um CP em que ocorreu exsudação e (C) CPs moldados (Arquivo do autor).

Durante a compactação do ensaio o CP era constantemente virado para evitar que a compactação não fosse uniforme.

Outro cuidado que se teve foi sempre tirar o relógio medidor de deslocamento sempre que íamos dar os golpes necessários a compactação. Devido as pancadas o relógio poderia ser danificado, por isso a necessidade do procedimento.

Ensaio de perda de massa por imersão

Os CPs moldados no ensaio de mini-MCV foram colocados em um extrator manual para que saíssem 1cm de dentro do molde. Após isso foram dispostos dentro de um reservatório de água por um período de 24 horas e o material solto recolhido em um recipiente. Depois esse material foi seco e pesado. A Figura 24 mostra todas as etapas:



Figura 24 – Ensaio de perda de massa por imersão: (A) Com o auxílio do extrator mecânico o CP foi extraído cerca de 1 cm para fora do molde, (B) Depois foi colocado com muito cuidado sobre uma base dentro de um tanque com água, (C) O material desprendido foi coletado em uma cápsula, (D) O mesmo procedimento foi realizado com os 5 CPs produzidos no ensaio de mini MCV, (E) Após serem retirados da água os CPs estavam destruídos, (F) As cápsulas em que o material desprendido foi recolhido foram para a estufa para secagem por 24 horas e suas massas pesadas (Arquivo do autor).

Classificação geotécnica MCT

A classificação, denominada MCT separa solos lateríticos de não lateríticos, sendo que os lateríticos apresentam elevada resistência, baixa expansibilidade apesar de serem plásticos e baixa deformabilidade. Abaixo tem-se a Figura 25 que mostra a classificação MCT.

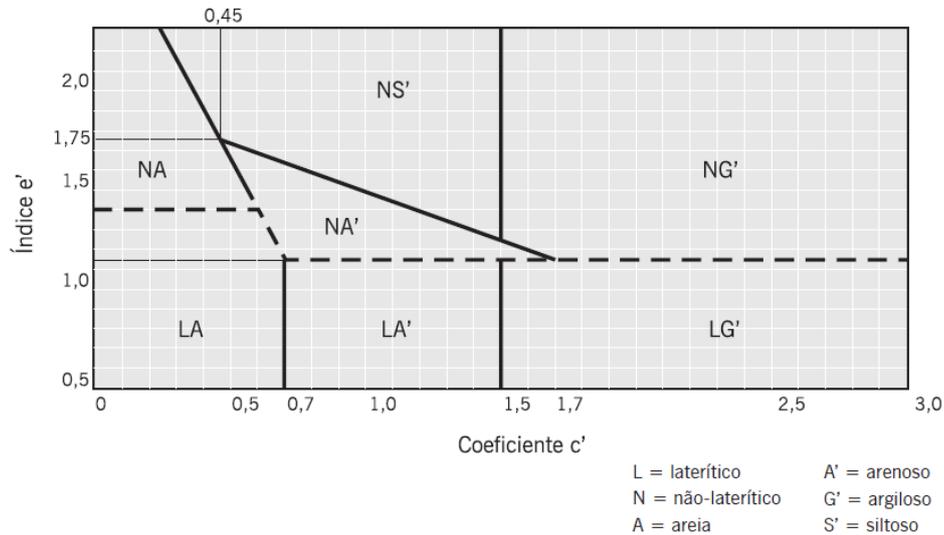


Figura 25 – Classificação MCT (NOGAMI e VILLIBOR, 1981).

A Tabela 18 mostra as características esperadas para cada classificação encontrada para solos tropicais. Como o resíduo estudado é um material artificial, espera-se que algumas características esperadas para solo não se apresentem no resíduo.

Tabela 18 - Propriedades típicas de cada grupo de solo (Modificado de DNER, 1996).

Classes				N - Solos de comportamento "Não laterítico"				L - Solos de comportamento "Laterítico"			
Grupos				NA areias	NA' arenosos	NS' siltosos	NG' argilosos	LA areias	LA' arenosos	LG' argilosos	
Granulometrias típicas e Minerais (q-quartzo, m-micas e k-caulinita)				Areias Areias siltosas Siltos (q)	Areias siltosas Areias argilosas	Siltos (k,m) Siltos arenosos Siltos argilosos	Argilas Argilas arenosas Argilas siltosas	Areias com pouca argila	Areias argilosas Argilas arenosas	Argilas Argilas arenosas	
Capacidade de suporte*	Mini-CBR sem imersão (%)	Muito alto	>30	Alta a média	Alta	Média a alta	Alta	Alta	Alta a muito alta	Alta	
		Alto	12-30								
		Médio	4-12								
		Baixo	<4								
Perda de suporte por imersão (%)	Alta	>70	Média a baixa	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	
		Média									40-70
		Baixa									<40
Expansão (%)*	Alta	>3	Baixa	Baixa	Alta	Alta a média	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	
		Média									0,5-3
Contração (%)*	Baixa	<0,5	Baixa a média	Baixa a média	Média	Alta a média	Baixa	Baixa a média	Média a alta	Média a alta	
Permeabilidade log k (cm/s)	Alta	>(-3)	Média a alta	Baixa	Média a baixa	Baixa a média	Média a baixa	Baixa	Baixa	Baixa	
		Média									(-3) a (-6)
		Baixa									<(-6)
Plasticidade	Alta	IP (%)	LL (%)	Baixa a NP	Média a NP	Média a alta	Alta	NP a baixa	Baixa a média	Média a alta	
		>30	>70								
		Média	7-30								30-70
	Baixa	<7	<30								

*CP's compactados na umidade ótima e energia normal NP=não presente

A Tabela 19 mostra as utilizações recomendadas para cada tipo de solo da classificação MCT em obras de pavimentação.

Tabela 19 - Emprego recomendado de solos tropicais em obras viárias (Modificado de NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

Comportamento	N= não-laterítico				L = laterítico		
Grupo MCT	NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'
Recomendação de utilização em obras viárias							
Base de pavimentos de vias de baixo volume de tráfego	NR	4°	NR	NR	2°	1°	3°
Reforço do subleito	4°	5°	NR	NR	2°	1°	3°
Subleito compactado	4°	5°	7°	6°	2°	1°	3°
Corpo de aterro compactado	4°	5°	6°	7°	2°	1°	3°
Camada de proteção à erosão	NR	3°	NR	NR	NR	2°	1°
Revestimento primário	5°	3°	NR	NR	4°	1°	2°
Ganulometrias típicas	Argilas Siltos	Areias siltosas	Siltos Siltos arenosos	Argilas Argilas arenosas Argilas siltosas Siltos argilosos	Areais siltosas	Areias argilosas	Argilas Argilas arenosas Argilas siltosas Siltos argilosos
Grupos prováveis das classificações tradicionais de solo							
Classificação Unificada de Solos	SP	MS	SM	MH	SP	SC	MH
	SM	SC	CL	CH	SC		ML
		ML	ML				CH
			MH				
Classificação Rodoviária	A-2	A-	A-4	A-6	A-2	A-2	A-6
		A-4	A-5	A-7-5		A-4	A-7-5
		A-7	A-7-5	A-7-6			
NR: não recomendado							

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esse capítulo apresenta os resultados e discussão dos ensaios realizados juntamente com uma análise e avaliação em relação a algumas possíveis aplicações dentro do campo da geotecnia.

4.1. Classificação do resíduo conforme NBR 10004

Os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização são mostrados na Tabela 20 e Tabela 21 respectivamente. Nenhum parâmetro foi encontrado em concentrações maiores que o limite máximo permitido nos ensaios, logo a amostra foi classificada como classe II B – não perigoso e inerte, sendo que os componentes Al e F⁻ apresentaram valores muito próximos aos respectivos LMPs.

Tabela 20 – Resultados do ensaio de lixiviação.

Parâmetro	Unidade	Resíduo	LMP	LD
Arsênio	mg L ⁻¹	<LD	1	0,0001
Bário	mg L ⁻¹	2,9	70	0,001
Cádmio	mg L ⁻¹	0,088	0,5	0,0006
Chumbo	mg L ⁻¹	0,08	1	0,01
Cromo total	mg L ⁻¹	0,04	5	0,005
Fluoretos	mg L ⁻¹	0,38	150	0,01
Mercúrio	mg L ⁻¹	<LD	0,1	0,0001
Prata	mg L ⁻¹	0,035	5	0,001
Selênio	mg L ⁻¹	<LD	1	0,001
pH do lixiviado		5,86		

LEGENDA: AR- amostra de reconhecimento; LMP - limite máximo permitido pela NBR 10004; LD - limite de detecção do aparelho.

Tabela 21 – Resultados do ensaio de solubilização.

Parâmetro	Unidade	Resíduo	LMP	LD
Alumínio	mg L ⁻¹	0,19	0,2	0,01
Arsênio	mg L ⁻¹	<LD	0,01	0,0001
Bário	mg L ⁻¹	<LD	0,7	0,001
Cádmio	mg L ⁻¹	<LD	0,005	0,0006
Chumbo	mg L ⁻¹	<LD	0,01	0,01
Cianetos	mg L ⁻¹	<LD	0,07	0,001
Cloretos	mg L ⁻¹	6,6	250	0,01
Cobre	mg L ⁻¹	<LD	2	0,003
Cromo total	mg L ⁻¹	<LD	0,05	0,005
Ferro total	mg L ⁻¹	0,21	0,3	0,005
Fluoretos	mg L ⁻¹	1,47	1,5	0,01
Manganês	mg L ⁻¹	0,003	0,1	0,003
Mercúrio	mg L ⁻¹	<LD	0,001	0,0001
Nitratos	mg L ⁻¹	2,15	10	0,01
Prata	mg L ⁻¹	0,001	0,05	0,001
Selênio	mg L ⁻¹	<LD	0,01	0,001
Sódio	mg L ⁻¹	150	200	0,1
Sulfatos	mg L ⁻¹	65	250	1
Surfactantes	mg L ⁻¹	0,1	0,5	0,1
Zinco	mg L ⁻¹	0,023	5	0,02
pH do solubilizado	-	10,65		

LEGENDA: LMP - limite máximo permitido pela NBR 10004; LD - limite de detecção do aparelho. Em vermelho os elementos que ultrapassaram o limite máximo permitido.

Conforme referências existentes, o resíduo irá variar sua classificação entre as Classes IIA e IIB. Esta variação deve estar relacionada à composição químico-mineralógica das rochas serradas e/ou às propriedades dos insumos utilizados no processo de beneficiamento, convergindo com dados da literatura (MANHÃES, HOLANDA, 2008; CAMPOS et al., 2009; BRAGA et al., 2010). Deve ser levado em conta ainda a dureza de cada rocha, sendo que materiais mais duros levam mais tempo para serem serrados nos teares multilâmina, refletindo em maior consumo de lâminas e abrasivo (granalha de aço) e, conseqüentemente, em um resíduo com maior concentração de metais.

4.2. Caracterização química e mineralógica

A composição química da granalha e das lâminas de aço foram cedidas pelas empresas fabricantes é apresentada na Tabela 22.

Tabela 22 – Composição química da granalha e lâminas de aço utilizadas no desdobramento.

Elemento	Porcentagem do elemento (%)	
	Granalha	Lâminas do tear
Carbono	0,80 a 1,20	0,67 a 0,73
Cobre	-	≤ 0,30
Cromo	-	0,10 a 0,25
Enxofre	≤ 0,05	≤ 0,020
Estanho	-	≤ 0,30
Fósforo	≤ 0,05	≤ 0,025
Manganês	0,35 a 1,20	1,00 a 1,20
Molibdênio	-	0,020 a 0,050
Níquel	-	0,08 a 0,15
Silício	≥ 0,40	0,25 a 0,40
Ferro	≅ 98	≅ 97

A Figura 26 apresenta o difratograma de raios X da amostra do resíduo estudado. Verifica-se que é composto por quartzo, albita, microclina, anortita, biotita e ferrosilita, além da inexistência de argilominerais, o que confere com a baixa expansão e contração do resíduo. Esses resultados condizem com a mineralogia dos gnaisses, granitos e sienitos, que são formados basicamente por feldspatos, quartzo e minerais máficos (mica e piroxênio).

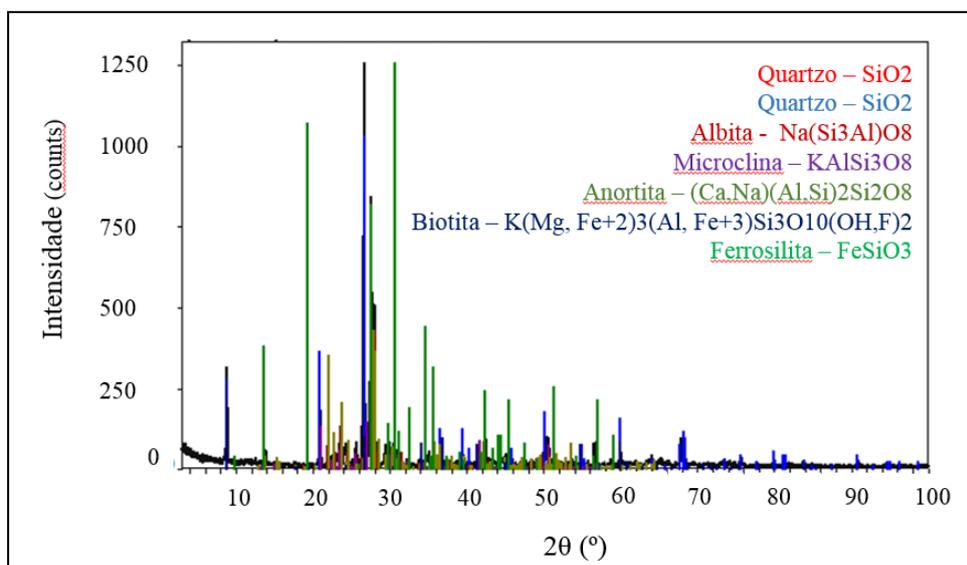


Figura 26 – Minerais encontrados na amostra do resíduo.

No ensaio de fluorescência de raio X foi possível identificar a composição química com a porcentagem referente a cada elemento na forma de óxido, como mostrado na Tabela 23. A tabela também mostra alguns resultados encontrados na literatura para resíduos de serragem provenientes de diferentes tipos de rochas.

Tabela 23 – Composição química do resíduo de serragem realizada pelo ensaio de fluorescência de raios X e comparação com a composição de outros tipos de resíduos estudados.

Óxidos	Tipos de resíduos										
	Resíduo de sienito, granito e gnaisse	Marcon, Vidal, Castro (2014): resíduo AAMOL	Bacarji et al. (2013): resíduo de mármore e granito			Mármol et al. (2010): diferentes tipos de granitos					Vieira et al. (2004): resíduo de granito
			EM 1	EM 2	EM 3	GR 1	GR 2	GR 3	GR 4	GR 5	
Na ₂ O	4,04	3,6	2,74	2,15	2,84	2,35	2,56	2,54	2,41	2,02	2,93
MgO	2,4	1,7	2,96	3,22	1,72	1,87	1,01	0,73	0,59	0,58	0,73
Al ₂ O ₃	12,5	16	11,26	9,7	10,28	13,38	13,53	12,8	12,01	10,5	14,92
SiO ₂	58	63,3	58,67	54,62	54,1	61,76	61,52	61,93	58,57	51,98	67,14
P ₂ O ₃	0,308	0,35	-	-	-	0,16	0,18	0,18	0,16	0,15	-
SO ₃	0,052	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cl	0,018	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K ₂ O	5,25	4	2,9	0,35	3,94	3,45	3,18	3,59	3,29	2,99	5,18
CaO	4,96	3,8	6,13	12,99	11,27	5,9	5,73	4,59	5,68	3,44	1,91
TiO ₂	0,535	0,57	-	-	-	0,5	0,46	0,31	0,31	0,27	0,73
Cr ₂ O ₃	0,031	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MnO	0,13	-	-	-	-	0,08	0,08	0,11	0,14	0,22	-
Fe ₂ O ₃	11,3	5	7,59	5,86	7,26	6,85	8,75	12,41	16,36	27,89	4,4
CuO	0,008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZnO	0,016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rb ₂ O	0,015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SrO	0,137	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZrO ₂	0,029	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BaO	0,307	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PF	gf	1,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-

LEGENDA: EM – Empresa; GR – Granito.

A composição química mostrou uma grande predominância de SiO₂ (58%), Al₂O₃ (12,5%), Fe₂O₃ (11,3%), K₂O (5,25%) e CaO (4,96%). O trabalho de Marcon, Vidal, Castro (2014) caracterizou o resíduo proveniente da AAMOL, sem investigar quais rochas haviam no resíduo. Os dados fornecidos por esse estudo mostraram grande proximidade com os obtidos para o resíduo estudado, a não ser pela menor concentração de óxido de ferro que também justifica a diferença no ensaio de perda ao fogo. Já no estudo de Bacarji et al. (2013) o resíduo era uma mistura de granito e mármore, sendo assim a porcentagem de óxido de cálcio foi bem maior, sendo o teor diferente para os resíduos de diferentes empresas. No estudo de Mármol et

al. (2010) estudou-se resíduos provenientes de cinco diferentes tipos de granitos, obtendo resultados bem parecidos com os do resíduo do trabalho. O mesmo foi notado ao se comparar os resultados com os obtidos no estudo de Vieira et al. (2004), que também estudou resíduo de granito.

Resumidamente, tanto para o resíduo estudado nesta pesquisa quanto para os trabalhos analisados, nota-se a predominância da sílica (SiO₂) em todos. Essa informação faz com que haja cuidados quanto a utilização e manejo desse material visto que a sílica (SiO₂) está associada a silicose, doença pulmonar obstrutiva crônica, câncer de pulmão, insuficiência renal e aumento no risco de tuberculose pulmonar e de doenças do colágeno (TERRA FILHO e SANTOS, 2006). A forma cristalina é mais tóxica que a amorfa, e é encontrada na areia e diversas rochas, como arenito, granito e sílex. A inalação da poeira contendo o dióxido de sílica pode ocorrer em diversas situações, sendo uma delas na extração e beneficiamento de rochas como granito e pedras em geral. Uma alternativa a esse problema é a utilização de máscaras e respiradores.

Quanto à análise da perda ao fogo, o ensaio resultou em um ganho de massa ao se aumentar a temperatura. Essa variação da massa decorre da mineralogia contida na amostra, caso haja presença de elementos voláteis, como enxofre e argilominerais há perda de massa e caso exista elementos metálicos como é o caso do resíduo ocorre oxidação do Fe⁺² para Fe⁺³, ocorrendo aumento da massa residual ao fogo.

4.3. Caracterização geotécnica

4.3.1. Granulometria conjunta

Os percentuais de cada fração granulométrica são mostrados na Tabela 24 e a curva granulométrica obtida é mostrada na Figura 27.

Tabela 24 – Porcentagens das frações granulométricas do resíduo obtidas no ensaio de granulometria conjunta.

Amostra	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)			Pedregulho (%)
			Fina	Média	Grossa	
Resíduo	18	62	15	3	2	-

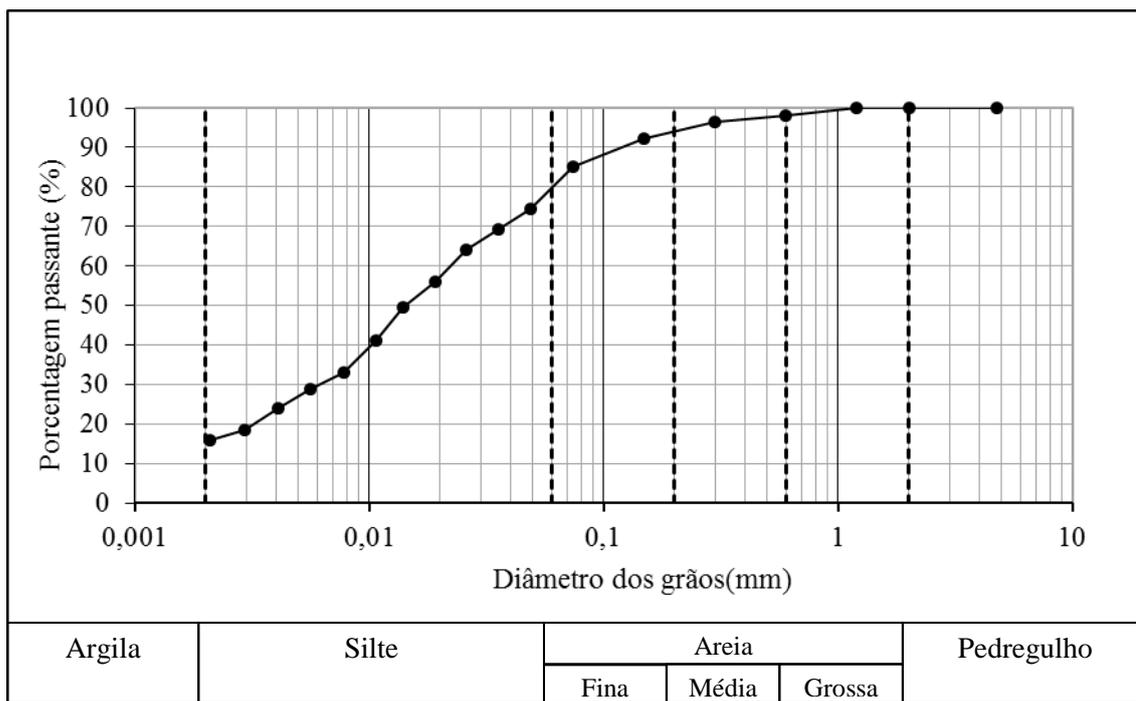


Figura 27 – Curva granulométrica do resíduo.

A análise granulométrica mostrou um material muito fino (cerca de 80%), com predominância da fração silte (62%) para o resíduo. Conforme a NBR 6502 (ABNT, 1995) o silte é um solo que apresenta baixa ou nenhuma plasticidade e que exibe baixa resistência quando seco o ar. A Tabela 25 compara as faixas granulométricas do DNIT para base estabilizada granulometricamente em função de N, número de repetições (ou operações) dos eixos dos veículos, equivalentes às solicitações do eixo padrão rodoviário de 8,2 tf durante o período considerado de vida útil do pavimento:

Tabela 25 – Faixas granulométricas do DNIT (Modificado de DNIT, 2010) e a composição do resíduo.

Tráfego	Para $N > 10^6$				Para $N < 5 \times 10^6$		Resíduo	Variação da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F		
Peneiras	Porcentagem passante (%) em massa							
2"	100	100	-	-	-	-	100	± 7
1"	-	75-90	100	100	100	100	100	± 7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	100	± 7
n° 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	100	± 5
n° 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	100	± 5
n° 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	96	± 2
n° 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	85	± 2

Observando-se a Tabela 25 nota-se que o resíduo, devido ao seu alto teor de finos não se adequa em nenhuma das faixas especificadas, que permite o máximo de 72% passante na #40 e 27% na #200 para a faixa F. Analisando-se apenas a granulometria para que esse resíduo se encaixe nas faixas ele deve ser misturado a um solo grosso, lembrando que outras propriedades devem ser checadas, como por exemplo a coesão, visto que a fração argila não é constituída por argilominerais, portanto a coesão é afetada.

4.3.2. Massa específica dos sólidos

A massa específica dos sólidos encontrada para o resíduo foi de 2,823 g/cm³. Essa propriedade varia em função dos tipos de partículas presentes e suas quantidades, é então justificada pelos valores das massas específicas e porcentagens de ocorrência dos seus principais constituintes, Tabela 26.

Tabela 26 – Massas específicas dos constituintes do resíduo e sua ocorrência em porcentagem (Compilação de dados da internet).

Óxido	Ocorrência	Massa específica (g/cm ³)
SiO ₂	58,00%	2,65
Al ₂ O ₃	12,50%	3,95
Fe ₂ O ₃	11,30%	5,24
K ₂ O	5,25%	2,35
CaO	4,96%	3,35
Na ₂ O	4,04%	2,27
MgO	2,40%	3,58
Outros	1,55%	-

4.3.3. Limites de consistência

Tomando-se o valor da umidade referente a 25 golpes na Figura 28, tem-se que o limite de liquidez é 29%.

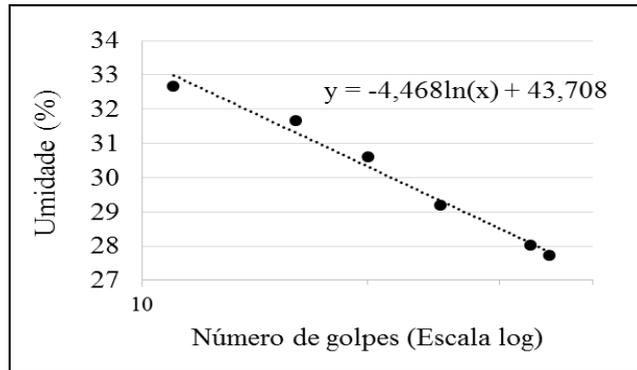


Figura 28 – Gráfico do ensaio de limite de liquidez pelo método de Casagrande.

O limite de plasticidade encontrado foi 24% e o de contração 21%. Sabendo que o índice de plasticidade é dado pela diferença entre o limite de liquidez e limite de plasticidade, temos para o resíduo um índice de 5%.

O baixo valor do índice de plasticidade é típico de matéria com baixa ou nenhuma coesão. Esse resultado é devido à falta de argilominerais no resíduo. Colocando-se os valores do limite e liquidez e do índice de plasticidade na carta de plasticidade de Casagrande, Figura 29, o resíduo é classificado como ML – Silte de baixa plasticidade, que está de acordo com a classificação granulométrica e a MCT.

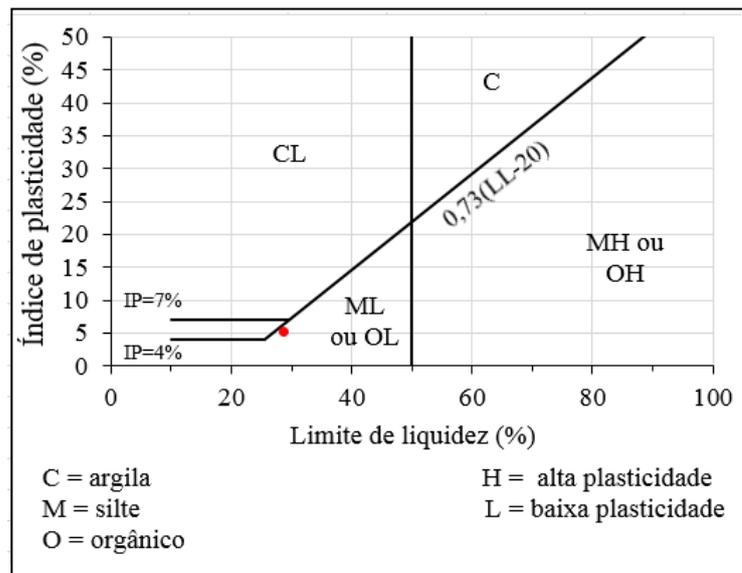


Figura 29 – Carta de plasticidade de Casagrande (Modificado de PINTO, 2006).

4.3.4. Compactação

A compactação do resíduo na energia normal resultou um ρ_d máximo de 1,545 g/cm³ com umidade ótima de 25,6%. Na energia intermediária, obteve-se um ρ_d máximo de 1,625 g/cm³ com a umidade ótima de 22%. As curvas geradas são mostradas na Figura 30.

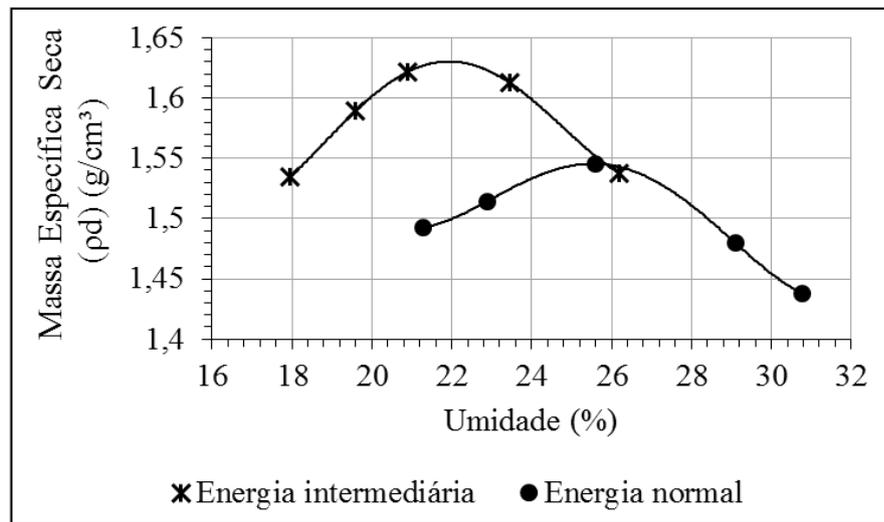


Figura 30 – Curvas de compactação do resíduo nas energias intermediária e normal.

Conforme CETESB (2005), a camada de solo que servirá de base para um aterro sanitário deve possuir granulometria cuja porcentagem passante na peneira n° 200 superior a 30% e limite de liquidez maior que 30% com índice de plasticidade maior ou igual a 15%. Embora o quesito do percentual de finos e o limite de liquidez (29%) estejam em conformidade com o requerido, o índice de plasticidade ficou bem abaixo (5%).

A caracterização geotécnica de um resíduo proveniente de Cachoeiro de Itapemirim, ES, foi realizada por Moreira, Paraguassú, Silveira (2004). O resíduo foi coletado em três diferentes pontos da barragem de resíduo onde é estocado. Obtiveram na granulometria 15% de argila, 65% de silte e 20% de areia. O limite de liquidez foi cerca de 29% e o de plasticidade 24%, sendo o índice de plasticidade 5% e o limite de contração 21%. A massa específica encontrada foi de 2,703 g/cm³. No ensaio de Compactação Proctor na energia normal encontrou-se uma umidade ótima de 31,1% com massa específica seca máxima de 1,448 g/cm³. Comparando-se os resultados com os encontrados no presente trabalho nota-se uma grande proximidade entre esses dois materiais produzidos em diferentes localidades, mostrando que esse resíduo é similar para teares convencionais multilâminas.

4.4. Resistência

4.4.1. Compressão simples

O controle da moldagem e umidade de ruptura dos CPs estão nos Apêndices A, B e C e o controle do coeficiente de variação (5%) no Apêndice E. Os CPs em vermelho foram os excluídos da média a fim de satisfazer essa condição.

Resíduo puro

A Tabela 27 mostra os resultados para o resíduo puro.

Tabela 27 - Resultados obtidos nos ensaios de Resistência à Compressão Simples para o resíduo puro.

Período de cura	Condição de ruptura	Identificação	Força máxima (N)		Tensão na força máxima (MPa)	
			Valores	Média	Valores	Média
0 dias	Sem imersão	CP1	711,4	717,0	0,3423	0,3479
		CP2	712,7		0,3477	
		CP3	726,8		0,3536	
	Com imersão	CP4	Não suportou imersão	-	Não suportou imersão	-
		CP5				
		CP6				
7 dias	Sem imersão	CP7	899	822,3	0,4371	0,3994
		CP8	821,9		0,3994	
		CP9	822,6		0,3994	
	Com imersão	CP10	Não suportou imersão	-	Não suportou imersão	-
		CP11				
		CP12				
14 dias	Sem imersão	CP13	692	769,7	0,3365	0,3742
		CP14	775		0,3766	
		CP15	764,3		0,3718	
	Com imersão	CP16	Não suportou imersão	-	Não suportou imersão	-
		CP17				
		CP18				
28 dias	Sem imersão	CP19	915,7	727,2	0,4469	0,3544
		CP20	684,6		0,3341	
		CP21	769,7		0,3747	
	Com imersão	CP22	Não suportou imersão	-	Não suportou imersão	-
		CP23				
		CP24				

Resíduo com 2% de cimento

Os resultados do resíduo com adição de 2% de cimento são mostrados na Tabela 28.

Tabela 28 – Resultados obtidos nos ensaios de Resistência à Compressão Simples para a mistura do resíduo com 2% de cimento.

Período de cura	Condição de ruptura	Identificação	Força máxima (N)		Tensão na força máxima (MPa)	
			Valores	Média	Valores	Média
7 dias	Sem imersão	CP1	1996	2030	0,9667	0,9839
		CP2	1823		0,8843	
		CP3	2064		1,0010	
	Com imersão	CP4	1505	1475	0,7303	0,7143
		CP5	1444		0,6983	
		CP6	1184		0,5742	
14 dias	Sem imersão	CP7	2524	2234	1,2250	1,0820
		CP8	2259		1,0940	
		CP9	2208		1,0700	
	Com imersão	CP10	1605	1558	0,7805	0,7573
		CP11	1511		0,734	
		CP12	959,9		0,465	
28 dias	Sem imersão	CP13	1917	2414	0,9308	1,1735
		CP14	2347		1,1410	
		CP15	2480		1,2060	
	Com imersão	CP16	1820	1797	0,8857	0,8730
		CP17	1773		0,8602	
		CP18	1546		0,7506	

Resíduo com 5% de cimento

A adição de 5% de cimento forneceu os resultados mostrados na Tabela 29.

Tabela 29 - Resultados dos ensaios de Compressão Simples para o resíduo com 5% de cimento.

Período de cura	Condição de ruptura	Identificação	Força máxima (N)		Tensão na força máxima (MPa)	
			Valores	Média	Valores	Média
7 dias	Sem imersão	CP1	4062	3640	1,9760	1,7700
		CP2	3637		1,7700	
		CP3	3642		1,7700	
	Com imersão	CP4	2622	2759	1,274	1,3425
		CP5	2896		1,411	
		CP6	2099		1,021	
14 dias	Sem imersão	CP13	4178	3716	2,0220	1,8010
		CP14	3746		1,8190	
		CP15	3686		1,7830	
	Com imersão	CP16	3155	2893	1,533	1,4055
		CP17	2631		1,278	
		CP18	2236		1,086	
28 dias	Sem imersão	CP19	4747	4717	2,3080	2,2940
		CP20	4687		2,2800	
		CP21	4177		2,0320	
	Com imersão	CP22	3965	3385	1,93	1,6475
		CP23	3535		1,721	
		CP24	3235		1,574	

Após o término dos ensaios, notam-se três tipos principais de ruptura, como mostrado na Figura 31.

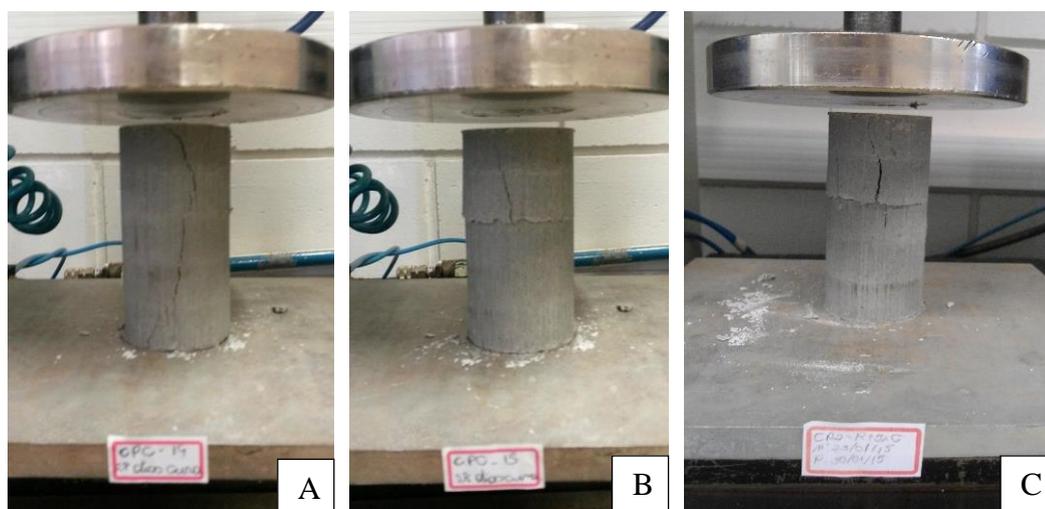


Figura 31 – CPs após finalização do ensaio: (A) Ruptura próxima a vertical, (B) Ruptura próximo a horizontal e localizada no contato entre camada e (C) Ruptura com deslocamento de partes do CP e abatimento do topo com paralização do ensaio (Arquivo do autor).

A Figura 32 mostra um gráfico comparativo das tensões de ruptura obtidas, tanto na condição com imersão quanto sem imersão para os períodos de cura propostos.

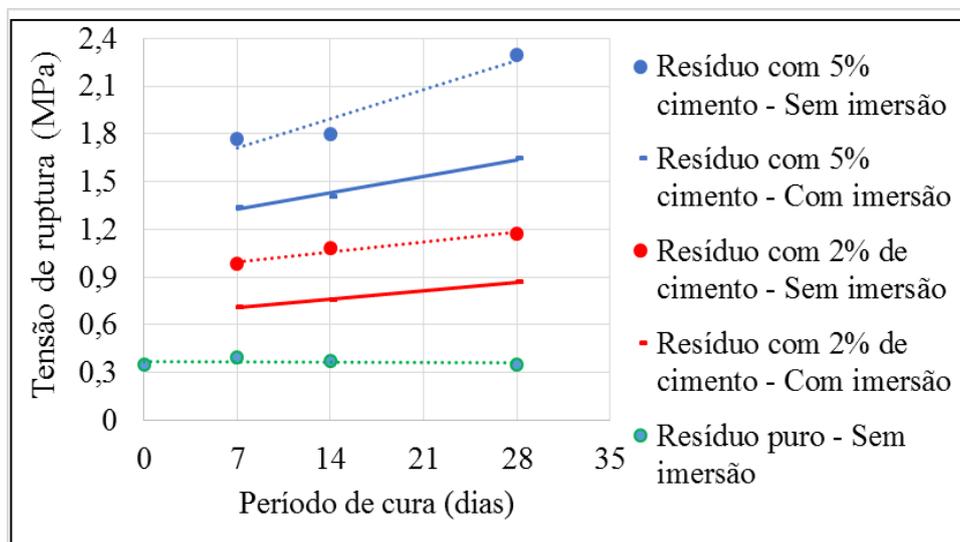


Figura 32 - Resultados de resistência à compressão simples para o resíduo puro, com incremento de 2% e de 5% de cimento.

A tensão de ruptura pouco variou com o passar do tempo da cura nos CPs de resíduo puro, já os com cimento a resistência aumentou. Comparando-se o período de cura de 28 dias nos três casos, obteve-se os valores de 0,354 MPa para o resíduo puro, 1,174 MPa para o resíduo com 2% de cimento e 2,294 MPa para resíduo com 5% de cimento. Como dito anteriormente, o resíduo sem cimento não suportou imersão em água o que condiz com a ausência de argilominerais no resíduo, confirmada pelo ensaio de difração de raios X. A adição de cimento além de aumentar a resistência do resíduo também tornou o CP resistente a imersão em água, porém esse incremento deve ser avaliado pois há um custo envolvido para a melhoria das propriedades com adição de cimento.

Conforme CETESB (2005), a camada de solo que servirá de base para um aterro sanitário deve possuir resistência à compressão simples entre 0,05 e 0,4 MPa, valor bem abaixo ao encontrado para o resíduo.

Quanto a dosagem de solo-cimento para emprego como camada de pavimento NBR 12253 (ABNT, 1992) estabelece uma variação de 5 a 10% de cimento dependendo do tipo de solo utilizado. Essa norma estipula que o teor de cimento adotado deve ser o menor teor que forneça uma tensão de ruptura igual ou superior a 2,1 MPa aos sete dias de cura com CPs imersos previamente por 4 horas. Usando os teores de 2 e 5% de cimento obteve-se para essas condições os valores de 0,7143 MPa e 1,3425 MPa respectivamente, valores muito abaixo do

necessário. Uma alternativa seria aumentar esses teores até o teor máximo e checar se alcança a resistência mínima, porém deve-se considerar o aumento do custo.

4.4.2. Cisalhamento direto

O controle da moldagem dos CPs e os parâmetros do ensaio são mostrados no Apêndice D. O ensaio foi realizado em três tensões normais diferentes, 50, 100 e 200 kPa. Os diagramas tensão cisalhante x deformação obtidos para as três tensões são mostrados na Figura 33. A envoltória de ruptura, é dada por pontos de tensão normal conhecidos e suas tensões cisalhantes de ruptura. Em posse desses pontos faz a adequação por meio de uma linha reta que contenha esses pontos ou se aproxime bastante, Figura 34.

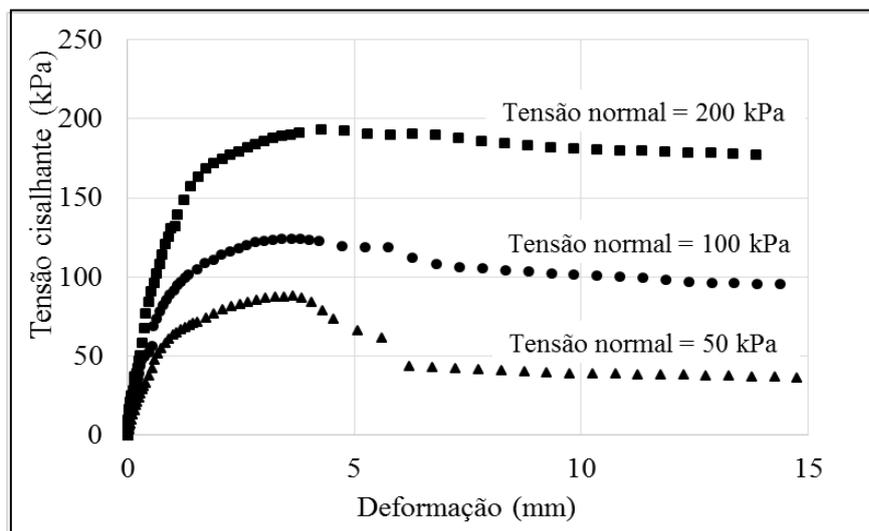


Figura 33 – Diagramas tensão cisalhante x deformação para as tensões normais de 50, 100 e 200 kPa.

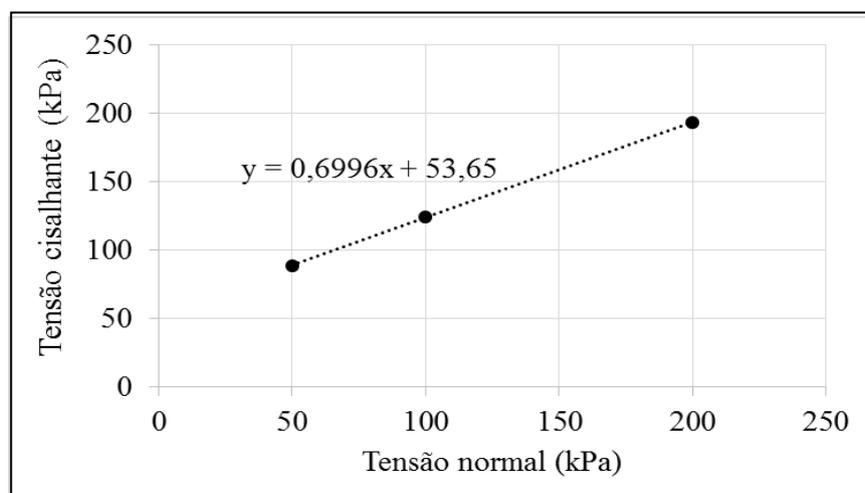


Figura 34 – Envoltória de ruptura.

A equação geral da tensão cisalhante é dada pela Equação 9:

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \emptyset \quad \text{..... (9)}$$

Onde:

τ = Tensão cisalhante (kPa);

c = Coesão (kPa);

σ = Tensão normal (kPa);

\emptyset = Ângulo de atrito ($^{\circ}$).

Com base na equação da envoltória obteve-se por meio da Equação (10) os valores de coesão (c) de aproximadamente 54 kPa, e por meio da Equação (11) o valor de cerca de 35° para o ângulo de atrito interno (\emptyset):

$$c = 53,65 \text{ kPa} \approx 54 \text{ kPa} \quad \text{..... (10)}$$

$$\operatorname{tg} \emptyset = \frac{(0,6996 \times 200 + 53,65) - (0,6996 \times 50 + 53,65)}{200 - 50} \therefore \emptyset = 34,98 \approx 35^{\circ} \quad \text{..... (11)}$$

Como dito anteriormente a resistência ao cisalhamento depende do ângulo de atrito e da coesão. O primeiro é dependente do contato entre os grãos e da tensão normal, o segundo é resultado do efeito de agentes cimentantes, como teor de óxidos e de argilas bem como o resultado da atração entre partículas próximas por forças eletrostáticas (PINTO, 2006). Conforme a análise química os óxidos que ocorrem em maior presença são SiO_2 (58%), Al_2O_3 (12,5%) e Fe_2O_3 (11,3%), podendo ser estes os responsáveis pela coesão do resíduo.

Após finalização do ensaio os corpos-de-prova estavam rompidos conforme mostrado na Figura 35.

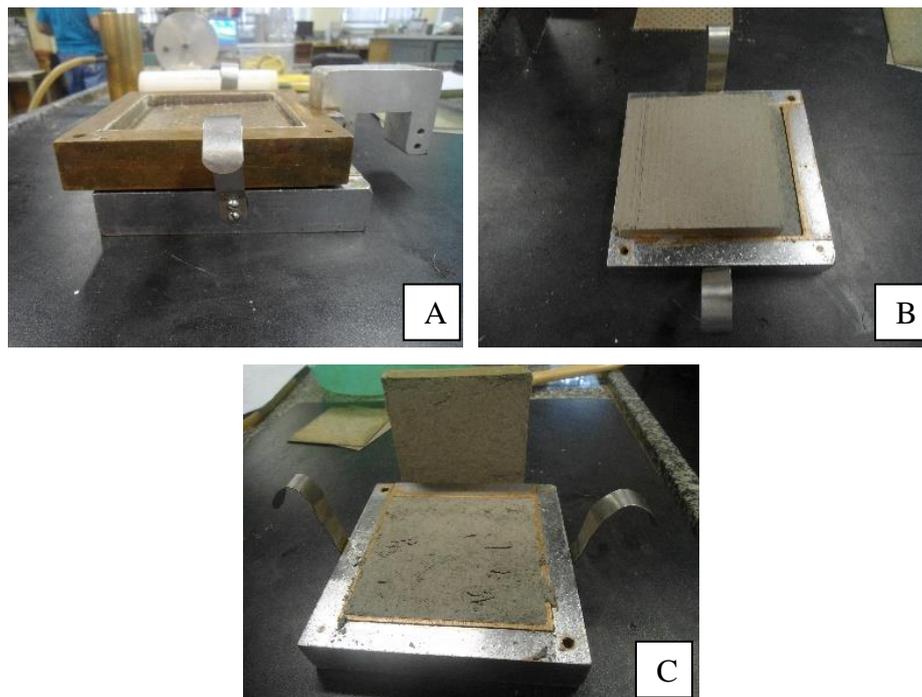


Figura 35 – CPs pós ensaio: (A) Deslocamento das formas após finalização do ensaio; (B) Retirada da forma superior; (C) Superfície de ruptura ao cisalhamento (Arquivo do autor).

4.5. Metodologia MCT

4.5.1. Compactação Mini-Proctor, Mini CBR e Expansão e Contração

Os ensaios foram reunidos para facilitar a avaliação das relações entre as propriedades. Os resultados dos ensaios de Compactação Mini-Proctor, Mini-CBR e Expansão e Contração são mostrados na Figura 36 e Figura 37.

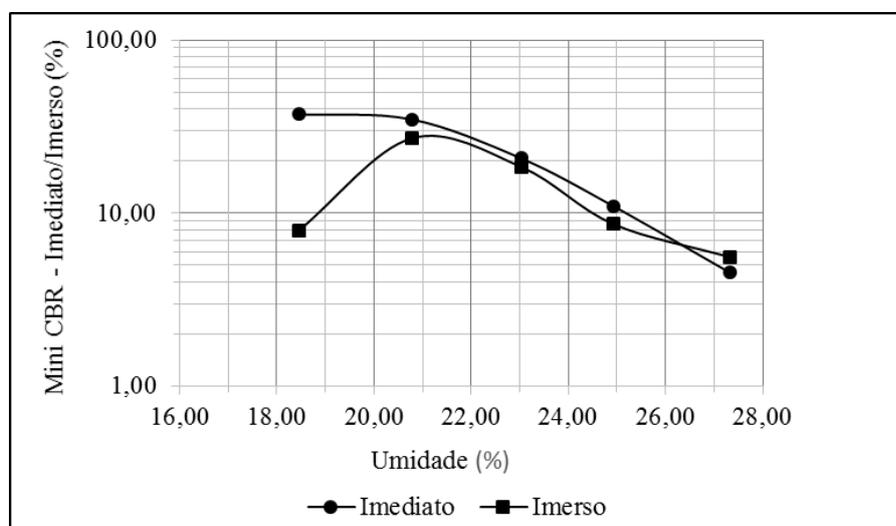


Figura 36 – Resultados Mini CBR imediato e imerso.

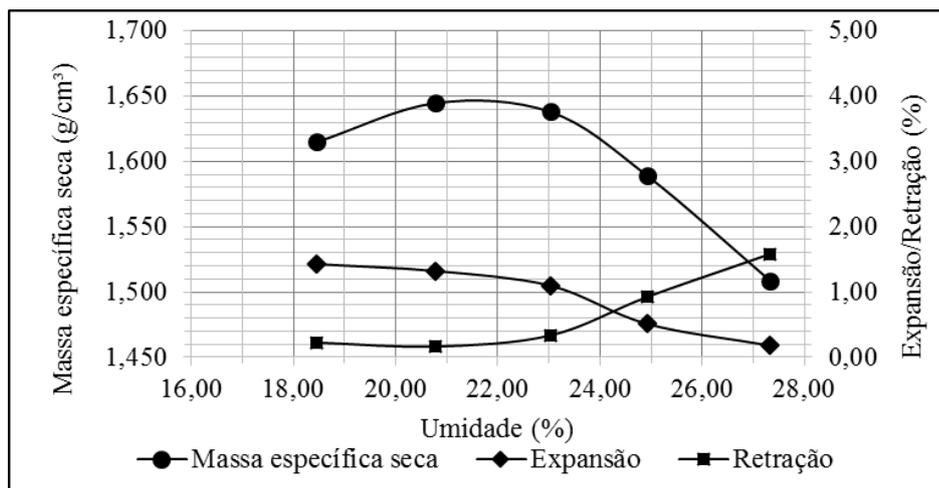


Figura 37 – Resultados dos ensaios de Mini-Proctor – Energia intermediária, Expansão e Retração.

A Tabela 30 mostra um resumo dos ensaios analisados, mostrando seus valores na umidade ótima na energia intermediária. As tabelas as quais deram origem aos gráficos encontram-se no Apêndice F:

Tabela 30 – Resumo dos resultados de Mini-Proctor na energia intermediária, Mini CBR, Retração e Expansão.

Mini-Proctor (energia intermediária)		Mini CBR (%)		Perda de suporte (%)	Retração (%)	Expansão (%)
Umidade ótima (%)	Massa específica dos sólidos máxima (g/cm³)	Imediato	Imerso			
21,5	1,645	30	27	10	0,2	1,3

4.5.2. Permeabilidade

Os coeficientes de permeabilidade foram encontrados para cada leitura, por meio da Equação (12), em um total de 14 leituras para cada CP:

$$K = 2,3 \times \left(\frac{A_t \times H_{CP}}{A_{CP} \times t} \right) \times \log \left(\frac{h_0}{h_1} \right) \quad \dots\dots (12)$$

Onde:

K = Coeficiente de condutividade hidráulica (cm/s);

A_t = Área do tubo de carga (cm²);

H_{CP} = Altura do corpo-de-prova (cm);

A_{CP} = Área do corpo-de-prova (cm²);

t = Tempo entre h₀ e h₁ (s);

h₀ = Carga hidráulica inicial (cm);

h₁ = Carga hidráulica final (cm);

Os valores de k encontrados foram multiplicados por um coeficiente de correção para se obter k referente a 20 °C. O valor de c é dado pela Equação (13):

$$C = \frac{17,756 \times 10^{-4}}{\frac{1+0,0337 \times T+0,00021 \times T^2}{0,001005}} \quad \dots\dots (13)$$

Onde:

C = Coeficiente de correção;

T = Temperatura em que foram realizadas as medições de h₀ e h₁.

Feita a correção, foi realizada uma média simples dos 14 valores obtidos para se chegar ao coeficiente de condutividade hidráulica correspondente a 20 °C. Os resultados para os três tipos de CPs são mostrados na Tabela 31:

Tabela 31 – Coeficiente de condutividade hidráulica para os três tipos de CPs.

Amostra	Coeficiente de condutividade hidráulica a 20°C (cm/s)
Resíduo puro	4,60x10 ⁻⁶
Resíduo + 2% de cimento	1,13x10 ⁻⁵
Resíduo + 5% de cimento	1,29x10 ⁻⁴

Nota-se que o aumento da porcentagem de cimento aumentou o coeficiente de condutividade hidráulica. Uma explicação para o fato seria que no resíduo puro as partículas poderiam se mover em favor de criar barreiras a água, já após estarem cimentadas não teriam essa característica, o que aumentaria a permeabilidade.

4.5.3. Compactação Mini-MCV, Perda de Massa por imersão e Classificação Geotécnica MCT

Os ensaios foram colocados em conjunto devido a ligação que tem para se chegar a classificação MCT.

Os resultados de afundamento devido ao número de golpes, as unidades de moldagem e os resultados do ensaio de perda de massa por imersão são mostrados no Apêndice G.

Cálculo do Mini-MCV

Os valores de Mini-MCV são dados em função das curvas de afundamento. Dispondo uma escala de Mini-MCV abaixo do gráfico de Afundamento (mm) x N° de golpes, o valor de Mini-MCV foi dado na interseção de cada curva com o afundamento=2mm. A partir das interseções traçaram-se verticais para definição do valor do Mini-MCV para cada unidade avaliada, como se vê na Figura 38:

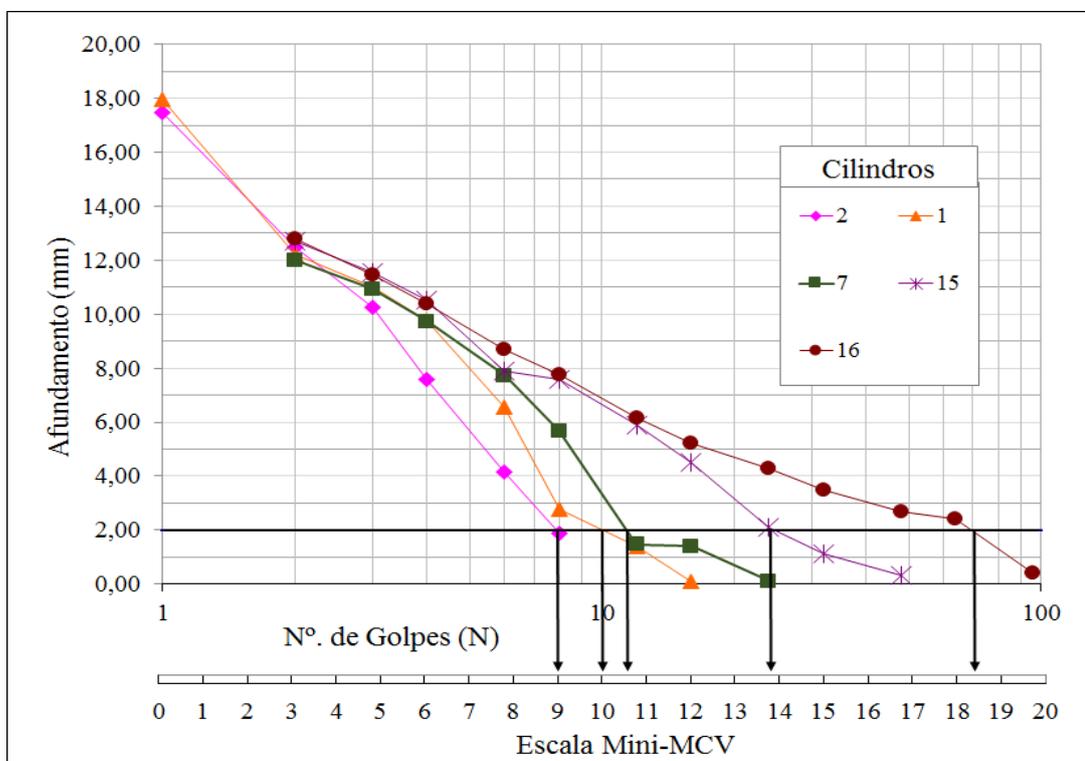


Figura 38 – Mini –MCV em função das curvas de afundamento.

Sendo assim os valores de Mini-MCV são mostrados na Tabela 32:

Tabela 32 – Resultados do Mini-MCV retirados da Figura 38:

Cilindro (#)	2	1	7	15	16
Umidade (%)	29,23	26,62	25,48	22,89	21,09
Mini-MCV	9	10	10,7	13,9	18,5

Cálculo do coeficiente c'

Após tomadas os deslocamentos em função do número de golpes, foram traçadas as curvas de afundamento em função do nº de golpes. No gráfico afundamento x nº de golpes, identifica-se o ponto de intersecção do Mini-MCV=10 com a linha de Afundamento=2 mm. Acompanhando a inclinação da parte retilínea da curva mais próxima deste ponto, cuidando para não pegar curvas depois do Mini-MCV=10 e as curvas acima de 10 mm de deformação, traça-se uma reta que corta o eixo das ordenadas obtendo-se um valor de afundamento. Figura 39.

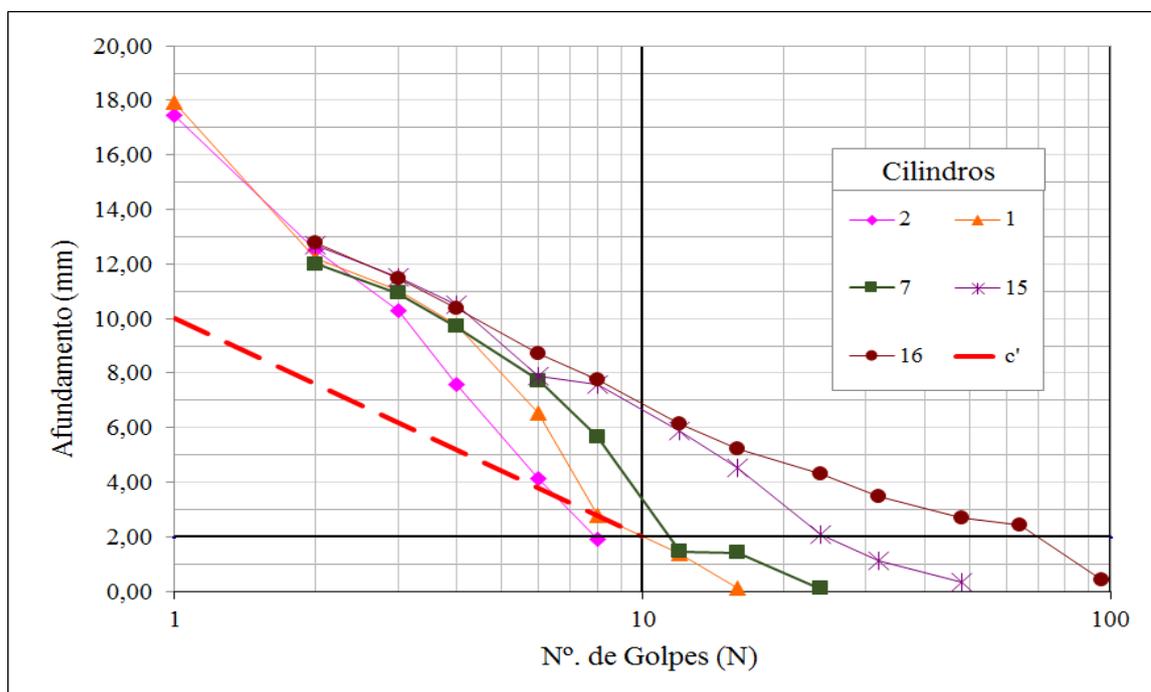


Figura 39 – Curvas geradas do afundamento em função do número de golpes para os cinco CPs.

O valor de c' é dado pela tangente do ângulo formado entre a reta c' e a horizontal afundamento=2mm e foi definido pela Equação (14)

$$c' = \text{tg}\alpha \therefore c' = \frac{\Delta \text{afundamento (mm)}}{\Delta \text{n.º de golpes (N)}} \quad \text{..... (14)}$$

Onde:

Δ = variação

Observando a Figura 39, tem-se que c' é dada pela Equação (15):

$$c' = \frac{10-2}{10} \therefore c' = 0,8 \text{ mm} \quad \dots\dots (15)$$

Cálculo do coeficiente d'

O primeiro passo é traçar as curvas de compactação representando em abcissas os valores de umidade e em ordenadas os valores de massa específica seca. O parâmetro d' é dado pelo coeficiente angular da parte mais retilínea (ou assimilável a uma reta) correspondente a 12 golpes, como mostra a Figura 40.

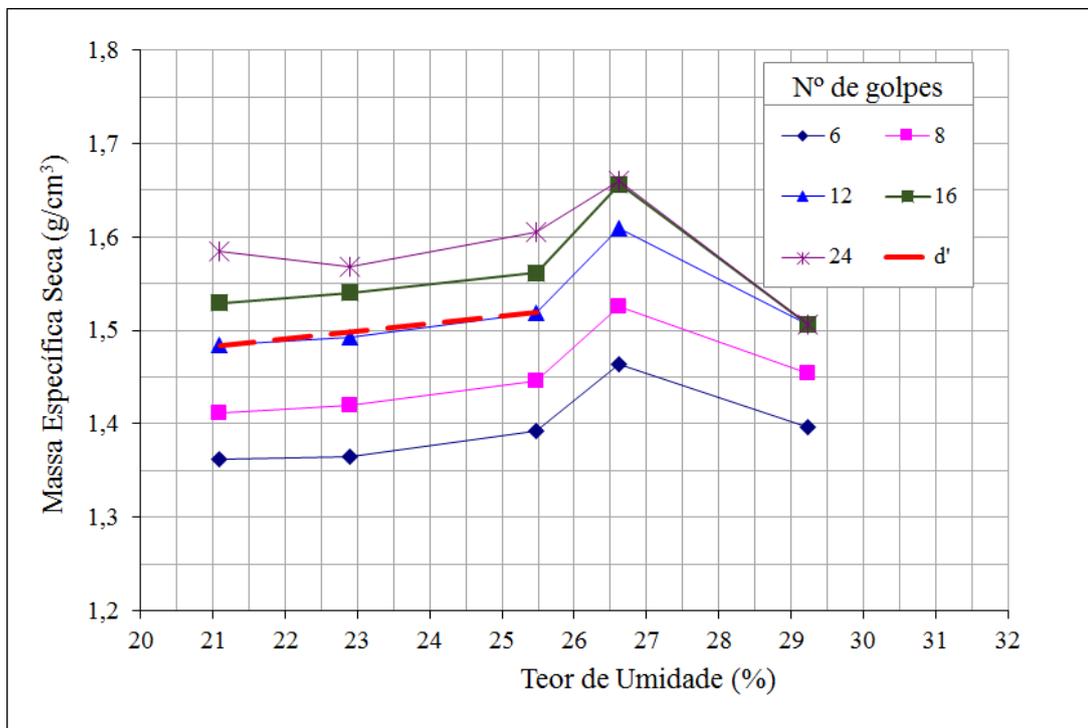


Figura 40 – Curvas de compactação em função do teor de umidade.

O valor de d' foi definido pela Equação (16):

$$d' = 1000 \times \frac{\Delta \text{ massa específica seca } (\frac{g}{cm^3})}{\Delta \text{ teor de umidade } (\%)} \quad \dots\dots (16)$$

Onde:

Δ = variação

Olhando a Figura 40 tem-se que d' é dado segundo a Equação (17):

$$d' = 1000 \times \frac{1,519 - 1,484}{25,48 - 21,09} \therefore d' = 8 \text{ Kg/m}^3 \quad \dots\dots (17)$$

Cálculo do coeficiente e'

Primeiro foi traçado o gráfico de perda de massa por imersão (PI) em função do Mini-MCV. O cálculo do índice PI é definido da seguinte maneira:

- Utiliza a interseção da curva com a reta Mini-MCV=10 caso o CP no ensaio de compactação Mini-MCV tenha altura superior a 48 mm no final do ensaio.
- Utiliza a interseção da curva com a reta Mini-MCV=15 caso o CP no ensaio de compactação Mini-MCV tenha altura inferior a 48 mm no final do ensaio.

Como ao final do ensaio quatro dos cinco CPs mediam mais de 48 cm (Apêndice I), o resíduo se encaixa na primeira situação, logo o índice PI resultou em 287%, como mostra a Figura 41.

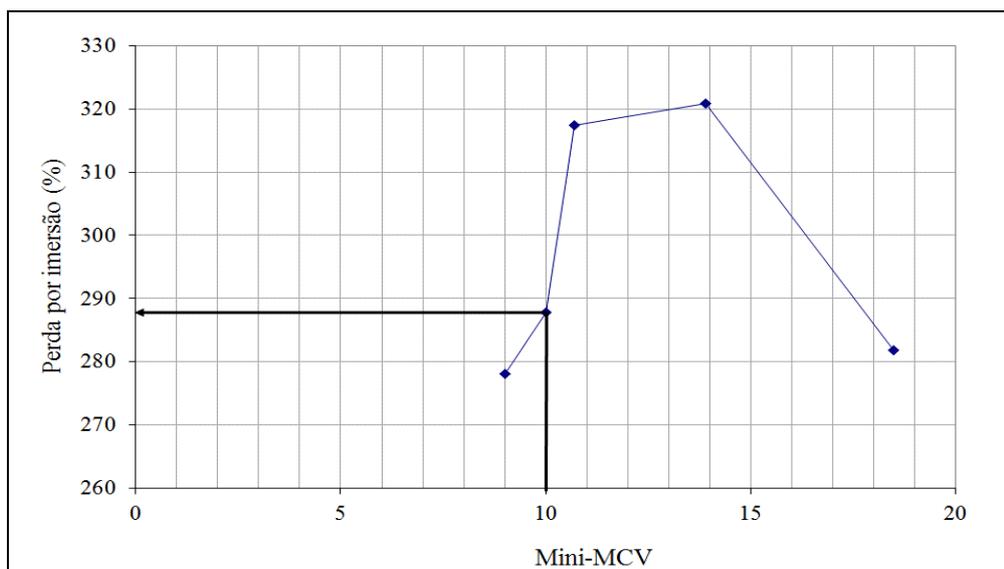


Figura 41 – Gráfico da perda de imersão (PI) em função do Mini-MCV.

O coeficiente é definido pela Equação (18):

$$e' = \left(\frac{PI'}{100} + \frac{20}{d'} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \dots\dots (18)$$

Onde:

PI' = Índice PI (%);

d' = Coeficiente d';

Sendo assim tem-se que e' é calculado segundo a Equação (19):

$$e' = \left(\frac{PI'}{100} + \frac{20}{d_r} \right)^{\frac{1}{3}} \therefore e' = \left(\frac{287}{100} + \frac{20}{8} \right)^{\frac{1}{3}} \therefore e' = 1,75 \quad \dots\dots (19)$$

Classificação MCT

A classificação MCT do resíduo é mostrada na Figura 42 e levou a um NS' – Solo de comportamento não laterítico – Siltes, siltes arenosos.

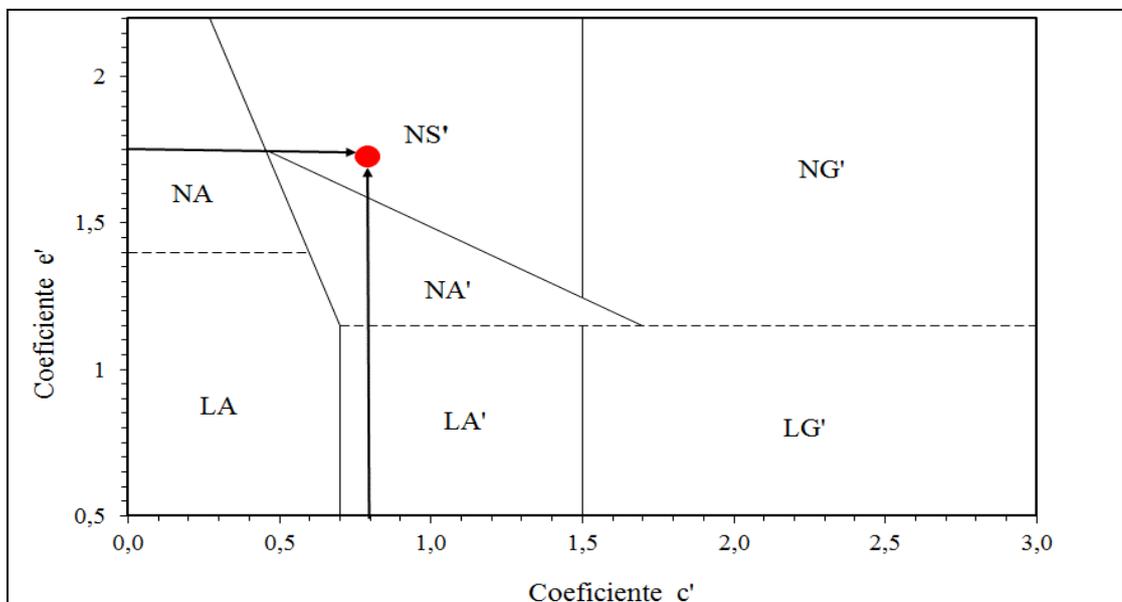


Figura 42 – Classificação MCT do resíduo.

A Tabela 18 mostra as características intrínsecas a cada tipo de solo. Quanto a granulometria o material se encaixou como um silte arenoso, conforme classificação granulométrica realizada anteriormente.

O CBR analisado e ensaios de contração e expansão mostrados na Tabela 18 são provenientes de CPs moldados na energia normal. Os CPs utilizados neste trabalho foram moldados na energia intermediária. Sendo assim, o CBR encontrado foi de 30, o que o classifica na interface alto/muito alto e a perda de suporte quando imerso foi de 10%, considerada baixa. Os valores de expansão e retração (1,3% e 0,2%, respectivamente) foram considerados médio e baixo, respectivamente.

O ensaio de permeabilidade foi realizado usando-se três tipos de CPs: resíduo puro ($4,6 \times 10^{-6}$ cm/s), resíduo com 2% de cimento ($1,13 \times 10^{-5}$ cm/s) e resíduo com 5% de cimento ($1,29 \times 10^{-4}$ cm/s), apresentando de acordo com a Tabela 18 permeabilidades de baixa a média. Sendo assim constata-se que quanto maior o incremento de cimento maior a permeabilidade do resíduo. Conforme CETESB (2005), a camada de solo que servirá de base para um aterro sanitário deve ter permeabilidade em torno de 10^{-7} cm/s, como os depósitos de argilas, siltes e suas misturas. Conforme a legislação que rege os aterros de resíduos não perigosos, NBR 13896 (ABNT, 1997), o coeficiente de permeabilidade aceito é 10^{-5} cm/s caso haja uma distância mínima de 1,5 m de solo insaturado ente a base do aterro e o nível d'água, podendo ser inferior a 10^{-4} cm/s dependendo do tipo de resíduo e das demais condições hidrogeológicas do aterro. A NBR 10157 (ABNT, 1987), que fornece os critérios para aterros de resíduos perigosos requer coeficiente de permeabilidade da base menor que $5,0 \times 10^{-5}$ cm/s também com uma camada mínima de solo insaturado de 1,5 m. Sendo assim nota-se que quanto a permeabilidade o resíduo poderia ser utilizado como base de aterros perigosos e não perigosos.

A plasticidade do resíduo foi classificada como baixa, o que contrastou com o esperado de acordo com a Tabela 18, que previa para o solo uma plasticidade variando de média a alta.

Vale lembrar que o resíduo é um material artificial e que está sendo classificado e comparado a parâmetros encontrados para solos. Uma das maiores diferenças entre os dois se dá pelo fato de que o percentual de argila no resíduo, 18%, é formada por grãos tamanho argila e não argilominerais.

Observando a Tabela 19 constata-se que o resíduo puro tem pouca aplicação, podendo ser utilizado não prioritariamente somente como subleito e corpo de aterro compactado.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

A classificação ambiental do resíduo foi realizada conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004a), que classifica o solo primeiramente em duas vertentes: perigoso e não perigoso. Verificando a bibliografia existente e o resultado encontrado, esse resíduo é sempre classificado como não perigoso, variando conforme a rocha serrada entre inerte e não inerte. Isso irá depender da mineralogia da rocha e da sua dureza, pois quanto maior haverá um aumento no desgaste de granalha e das lâminas de aço, material este que será incorporado ao resíduo.

Quanto as características geotécnicas principais, o resíduo é um silte arenoso com argila, cujo teor de finos é cerca de 85% de baixa plasticidade com massa específica dos sólidos de 2,823 g/cm³. Os ensaios de compactação forneceram os valores de umidade ótima de 25,6% e massa específica seca máxima de 1,545 g/cm³ e para energia intermediária 22% e 1,625 g/cm³.

Quanto a aplicação em camadas de pavimentos notamos que o resíduo é muito fino para se enquadrar nas faixas granulométricas do DNIT. Para adequação esse material deveria ser utilizado em misturas com materiais mais grossos. Outro ponto a se considerar seria o acréscimo de material argiloso para melhorar a plasticidade.

O resíduo é formado basicamente de SiO₂ (58%), Al₂O₃ (12,5%), Fe₂O₃ (11,3%), K₂O (5,25%), CaO (4,96%), Na₂O (4,04%) e MgO (2,4%). O ensaio de difração de raios-X mostrou que estão presentes os minerais quartzo, albita, microclina, anortita, biotita e ferrosilita. O alto teor de sílica alertou sobre os cuidados quanto a sua utilização e manejo, havendo necessidade de uso de máscara para evitar inalação, visto que esse composto pode causar doenças pulmonares.

A resistência à compressão simples foi realizada com CPs de resíduo puro, com 2% e 5% de cimento. Nos primeiros atingiu-se uma resistência de 0,354 MPa, que pouco variou com o decorrer do período de cura e sem imersão. Os que foram imersos em água se desfizeram completamente poucos minutos após a imersão. Os corpos-de-prova em que adicionou-se 2% de cimento alcançaram resistência de 1,174 MPa quando não imerso e 0,873 MPa imerso. Já com adição de 5% de cimento 2,294 MPa e 1,648 MPa nas condições anteriores respectivamente. O período de cura para atingir esses valores foi 28 dias. Os valores de resistência encontrados para o resíduo puro estão favoráveis ao aproveitamento como impermeabilização de aterro sanitário (recomenda-se entre 0,05 e 0,4 MPa). Porém os

valores para resistência do resíduo-cimento imersos estão bem abaixo do recomendado para solo-cimento (2,1 MPa). A coesão encontrada foi de 54 kPa e o ângulo de atrito de 35°.

Para adequação ao uso em solo-cimento pode-se aumentar o teor de cimento, visto que a NBR 12253 (ABNT, 1992) estabelece uma variação de 5 a 10% de cimento, até que se atinja a resistência de 2,1 MPa aos sete dias de cura sendo a ruptura feita após 4 horas de imersão. É importante também avaliar o custo de se utilizar o cimento para aumentar a resistência do resíduo.

A classificação MCT resultou em um NS' - Solo de comportamento não laterítico – Siltes, siltes arenosos. Sua aplicação como camadas de pavimentos é bem restrita, sendo recomendado estudar misturas desse material com diferentes solos. O mini-CBR foi considerado alto de baixa perda de suporte quando imerso. A permeabilidade nas três condições resíduo puro ($4,60 \times 10^{-6}$ cm/s), resíduo com 2% ($1,13 \times 10^{-5}$ cm/s) e resíduo com 5% de cimento ($1,29 \times 10^{-4}$ cm/s) forneceram valores baixos e que possibilitam o uso desse resíduo em alguns tipos de aterros. A expansão e contração do resíduo foram baixos.

Os resultados dos ensaios de permeabilidade mostraram que o resíduo pode ser utilizado como camadas de base de aterro. Todavia, outras propriedades necessárias à esta finalidade devem ser investigadas.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

O trabalho realizado deve ser considerado um estudo inicial que abrangeu a caracterização ambiental, geotécnica, química/mineralógica, resistência e a metodologia MCT do resíduo de serragem. Com base em alguns resultados foram levantadas possíveis utilizações para esse material.

Para melhor investigar o aproveitamento desse resíduo sugere-se:

- Realizar um mapeamento dos locais em que esse material é produzido relacionando aos principais tipos de solos presentes na região, visando avaliar quais seriam os benefícios em se realizar misturas entre os dois materiais;
- Avaliação a fundo da origem da coesão do resíduo, visto que este apresentou uma alta coesão identificada pelo ensaio de cisalhamento direto e não suportou imersão quando puro porém manteve-se intacto quando misturado ao cimento;
- Realizar misturas com diferentes tipos de solo estudando quais os parâmetros seriam melhorados, e, aliado ao mapeamento acima sugerido, avaliar as melhores

aplicações nas diferentes regiões de geração desses resíduos visando ao menor custo dos materiais e a sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Solo-Cimento**. São Paulo, 2009. Disponível em :< <http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/aplicacoes/solo-cimento>>. Acesso em 10 jul. 2015.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986. 9 p.

_____. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984a, 6p.

_____. **NBR 6502**: Rochas e Solo. Rio de Janeiro, 1995, 18p.

_____. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984b, 8p.

_____. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1988a, 3 p.

_____. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1988b, 13 p.

_____. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 1988c, 10 p.

_____. **NBR 7183**: Determinação do limite de relação de contração de solos. Rio de Janeiro, 1982, 3 p.

_____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004a. 71 p.

_____. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b. 16 p.

_____. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004c. 3 p.

_____. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004d. 21 p.

_____. **NBR 10157**: Aterros de resíduos perigosos – Critérios para projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, 1987. 13 p.

_____. **NBR 10836**: Bloco vazado de solos cimento sem função estrutural – Determinação da resistência a compressão e da absorção de água. Rio de Janeiro, 1994. 2 p.

_____. **NBR 12025**: Solo-cimento – Ensaio de Compressão Simples de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1990, 2p.

_____. **NBR 12253**: Solo cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento. Rio de Janeiro, 2012, 3 p.

_____. **NBR 12770**: Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada. Rio de Janeiro, 1992. 4 p.

_____. **NBR 13896**: Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997. 12 p.

_____. **NBR 15012**: Rochas para revestimento de edificações – Terminologia. Rio de Janeiro, 2013. 32 p.

ABIROCHAS - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. **Dimension Stone Sector: Brazil in numbers 2012 – Associação brasileira da indústria de rochas ornamentais**. São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://www.brasiloriginalstones.com/assets/img/noticias/Brazil%20in%20Numbers%202012.pdf>>. Acesso em 16 jul. 2014.

_____. **Informe 01/2015 – Balanço das exportações e importações produção e consumo interno brasileiro de rochas ornamentais em 2014**. São Paulo, 2015. Disponível em :<http://www.ivolution.com.br/mais/fotos/6/17/3397/Informe_01_2015.pdf>. Acesso em 06 mar. 2015.

ALECRIM, A. V. **Estudo do resíduo de quartzito foliado para emprego em estruturas de pavimentos**. 2009. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

ALENCAR, C. R. A., CARANASSIOS, A.; CARVALHO, D. **Tecnologias de lavra e beneficiamento de rochas ornamentais**. Fortaleza, 1996.

ALEXANDRE, J. R. et al. Zinco e ferro: de micronutrientes a contaminantes do solo. **Revista Natureza on line**, v. 10, p. 23-28, 2012.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 3080**: Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. West Conshohocken, PA, 2011. 6 p.

BABISK, M. P. **Desenvolvimento de vidros sodo-cálcicos a partir de resíduos de rochas ornamentais**. 2009. 90 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2009.

BACARJI, R. D. et al. Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers. **Construction and Building Materials**, v. 45, 2013, p. 1-10.

BRAGA, F. S. et al. Caracterização ambiental de lamas de beneficiamento de rochas ornamentais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 3, p. 237-244, 2010.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 4ª reimpressão (2010), 2006.

CAMPOS, A. R. et al. Tratamento e aproveitamento de resíduos de rochas ornamentais e de revestimento, visando mitigação de impacto ambiental. **In: VII Seminário de Rochas Ornamentais do Nordeste**, Rio de Janeiro: CETEM/MCT, v.1, p.9-18, 2009.

CAMPOS, A. R. et al. Resíduos: tratamento e aplicações industriais. In: Vidal, W. F. H., AZEVEDO, H. C. A. e CASTRO, N. F. **Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento**. Rio de Janeiro: CETEM (Centro de Tecnologia Mineral) e MCTI (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação), p. 431-492, 2014.

CARPIO, R. C. et al. Estado da arte do processo produtivo da cal na região Centro Oeste de Minas Gerais. **For Science**, v. 1, n. 1, p. 49-60, 2013.

CETESB – Companhia de tecnologia de Saneamento Ambiental. **Procedimentos para implantação de aterro sanitário em valas**, 2005.

COIMBRA FILHO, C. G. **Relação entre processo de corte e qualidade de superfícies serradas de granitos ornamentais**. 2006. 168 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 141: Pavimentos flexíveis – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2010, 9 p.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-CLA259: Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura**. Rio de Janeiro, 1996, 6 p.

DIAS, N.A. et al. Uso de misturas de solo com lama abrasiva estabilizadas quimicamente para reestabilização de taludes. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 2014, Teresina. **Anais...** Teresina, 2014, 4 p.

DINO, G. A.; et al. Residual sludge from dimension stones: characterization for their exploitation in civil and environmental applications. **Energy Procedia**, 40, p. 507-514, 2013.

FRASCÁ, M. H. B. O. Rochas ornamentais e para revestimento: variedades, propriedades, usos e conservação. **A cadeia produtiva de rochas ornamentais e para revestimento no estado de São Paulo**, p. 153-191, 2004.

FREIRE, L. C.; CASTRO, N. F.; VIDAL, F. W. H. Aproveitamento dos resíduos de lavra e beneficiamento de rochas ornamentais. **III Jornada do Programa Capacitação Interna – Centro de Tecnologia Mineral**. Rio de Janeiro, 2013.

GONÇALVES, J. P.; MOURA, W. A.; DAL MOLIN, D. C. C. Avaliação da influência da utilização do resíduo de corte de granito (RCG), como adição, em propriedades mecânicas do concreto. **Ambiente Construído**, v. 2, n. 1, p. 53-68, 2002.

JOAQUIM, D. O. et al. (2014). Emprego de misturas de solo, lama abrasiva e escória de alto forno estabilizada em terraplenagem. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 2014, Teresina. **Anais...** Teresina, 2014, 4 p.

LOPES JÚNIOR, L. S. **Parâmetros de controle da resistência mecânica de solos tratados com cal, cimento e rocha basáltica pulverizada**. 2007. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

LUCENA, L. C. F. L. **Verificação da influência do uso de resíduos industriais como filler em misturas asfálticas sob o efeito da presença d'água**. 2009. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2009.

MACHADO, R. V. et al. Utilização de resíduos oriundos do corte de rochas ornamentais na correção da acidez e adubação de solos tropicais. In: XVI Jornada de Iniciação Científica do Cetem, 2008, Rio de Janeiro. **Anais... CETEM**, 2008, p. 120-126.

MANHÃES, J. P. V. T.; HOLANDA, J.N.F. Caracterização e classificação de resíduo sólido "pó de rocha granítica" gerado na indústria de rochas ornamentais. **Química Nova**, v.31, nº 6. p.1301-1304, 2008.

MARCON, D. B.; VIDAL, F. W. H.; CASTRO, N. F. Estudo do beneficiamento do resíduo de rochas ornamentais. In: XXII Jornada de Iniciação Científica do Cetem, 2014, Rio de Janeiro. **Anais... CETEM**, 2014.

MÁRMOL et al. Use of granite sludge wastes for the production of coloured cement-based mortars. **Cement & Concrete Composites**, 32, 2010, p. 617-622.

MATTA, P. M. **Indústria de Rochas Ornamentais: Rejeitos x Produção Limpa**. Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM/BA. Salvador/BA, 2003.

MENEZES, R. G. **Tecnologias de lavra em maciços rochosos**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

MIRANDA, R. A. C. **Viabilidade técnica da aplicação de resíduo de beneficiamento de mármore e granito em tijolos de solo-cimento**. 2007. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

MORANI, B. M.; CARANASSIOS, A.; RIBEIRO, R. C. C. Utilização do rejeito oriundo do corte de mármore como recarga e recobrimento de papel. In: XVI Jornada de Iniciação Científica do Cetem, 2008, Rio de Janeiro. **Anais... CETEM**, 2008, p. 99-105.

MOREIRA, S.T.F., PARAGUASSÚ, A.B. e SILVEIRA, L.L. Caracterização geotécnica do rejeito de serragem de granitos em teares multilâminas, **1º Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos**, São Carlos, São Paulo, 3 p., 2004.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias**. In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia, 1981, Rio de Janeiro. COPPE/UFRJ, 1981.

_____. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo, 1995.

_____. **Pavimentos econômicos: Tecnologia do uso dos solos finos lateríticos**. São Paulo: Arte e Ciência, 2009.

NOGUEIRA, J. B. **Características dos Solos**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2011, 67 p.

OLIVEIRA, A.G. et al. **Reciclagem de resíduos e cidadania: produção de tijolos ecológicos para construção de casas populares em regime de mutirão – Parte II**. Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2012.

OLIVEIRA, C. N.; QUEIRÓZ, J. P. C.; RIBEIRO, R. C. C. Aplicação de resíduos oriundos do corte de rochas ornamentais na produção de cosméticos. In: XVI Jornada de Iniciação Científica do Cetem, 2009, Rio de Janeiro. **Anais... CETEM**, 2009, p. 123-129.

PICCOLI, R. et. al. A importância da utilização da difração de raios X na caracterização de argilas, **53º Congresso brasileiro de cerâmica**, Guarujá, São Paulo, 8 p., 2009.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos: 16 aulas**. São Paulo: Oficina de textos, 3ª edição, 2ª reimpressão (2011), 2006.

RATTI, G. **Técnicas de Análise Química de Compostos Inorgânicos**. São Paulo, 2015. Disponível em: <http://www.angelfire.com/crazy3/qfl2308/1_multipart_xF8FF_8_Analise_Quimica_PMI-2201.pdf>. Acesso em 27 set. 2015.

RIBEIRO, R. P. **Influência das características petrográficas de granitos no processo industrial de desdobramento de blocos**. 2005. 132 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

ROCHAS DE QUALIDADE. AAMOL desenvolve argamassa com lama abrasiva do setor de rochas ornamentais. **Revista Rochas de Qualidade**, Brasil, ano XLVII, edição 237, julho/agosto de 2014, p. 260-261, 2014.

ROMEIRO, S. B. B. **Química na siderurgia**. Série Química e Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 39 p., 1997.

RUSSO, M. L. C. **Reciclagem de resíduo gerado na extração de quartzito**. 2011. 174 F. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Instituto de Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

SCARPIN, M. A. **Aplicação da difração e fluorescência de raios X (WDXRF): Ensaios em argilominerais**. 2003. 80 F. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear – Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SILVA, A. A. A. Gestão de resíduos na indústria de rochas ornamentais, com enfoque para a lama abrasiva. In: **VII Congresso Nacional de Excelência em Gestão**, 2011.

SILVA, F. D.; OLIVEIRA, F. M. C.; SOUZA, J. C. Aplicabilidade do resíduo industrial de rochas ornamentais na indústria cerâmica. In: XXIII Simpósio de Geologia do Nordeste / VII

Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste, 2009, Fortaleza. **Anais...** CETEM, 2009, p. 53-62.

SILVEIRA, L.L.L.; VIDAL, F. W. H.; SOUZA, J. C. **Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento**. Rio de Janeiro: CETEM (Centro de Tecnologia Mineral) e MCTI (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação), p. 327-398, 2014.

SILVEIRA, P. E. M. **A aplicação do resíduo de construção e demolição reciclado no compósito solo-cimento**. 2005. 132 F. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2005.

SIVRIKAYA, O.; KIYILDI, K. R.; KARACA, Z. Recycling waste from natural stone processing plants to stabilise clayey soil. **Environmental Earth Sciences**, 2013.

SOUZA, D.V.; VIDAL, F.W.H.; CASTRO, N. F. **Estudo comparativo da utilização de teares multilâmina e multifio no beneficiamento de rochas ornamentais**. Anais da XX Jornada de Iniciação Científica – Centro de Tecnologia Mineral, 4 p., Rio de Janeiro, 2012.

SOUZA, L. R.; CARRISSO, R. C. C.; RIBEIRO, R. C. C. Aplicação de rejeitos oriundos do corte de mármore como carga na indústria polimérica. In: XVI Jornada de Iniciação Científica do Cetem, 2008, Rio de Janeiro. **Anais...** CETEM, 2008, p. 92-98.

TERRA FILHO, M.; SANTOS, U. P. Silicose. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, V. 32, P. S41-S47, 2006.

VIDAL, F. W. H, et al. **Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento**. Rio de Janeiro: CETEM (Centro de Tecnologia Mineral) e MCTI (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação), p. 153-258, 2014.

VIEIRA et al. Incorporation of granite waste in red ceramics. **Materials Science and Engineering A**, 373, 2004, p. 115-121.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S. **Pavimentos econômicos – Tecnologia do uso dos solos finos lateríticos**. São Paulo, 291 f., 2009.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Moldagem de CPs para ruptura à compressão simples e teor de umidade pós ensaio para os CPs de resíduo puro

Apêndice A.1 - Resíduo puro com 0 dias de cura (preparação dos CPs para ensaio de compressão simples).

Amostra: Resíduo puro - 0 dias de cura					Moldagem:01/12/14 Ruptura:01/12/14					
Dados curva de compactação na energia normal:										
Umidade ótima (%)					25,6	ρs máxima (g/cm³)				1,545
CP1					CP2					
Propriedades				Média	Propriedades				Média	
h (mm)	101,00	100,90	101,28	101,06	h (mm)	101,56	101,18	101,46	101,40	
Ø (mm)	51,10	51,20	51,20	51,17	Ø (mm)	51,00	51,18	51,10	51,09	
M (g)	398,8				M (g)	398,58				
V (cm³)	207,69				V (cm³)	207,80				
ρs (g/cm³)	1,511				ρs (g/cm³)	1,509				
GC (%)	97,77				GC (%)	97,67				
CP3					CP4					
Propriedades				Média	Propriedades				Média	
h (mm)	101,00	100,60	100,90	100,83	h (mm)					
Ø (mm)	51,20	51,18	51,10	51,16	Ø (mm)					
M (g)	398,28				M (g)					
V (cm³)	207,17				V (cm³)					
ρs (g/cm³)	1,512				ρs (g/cm³)					
GC (%)	97,89				GC (%)					
CP5					CP6					
Propriedades				Média	Propriedades				Média	
h (mm)					h (mm)					
Ø (mm)					Ø (mm)					
M (g)					M (g)					
V (cm³)					V (cm³)					
ρs (g/cm³)					ρs (g/cm³)					
GC (%)					GC (%)					
Umidade										
Cápsula	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w (%)						
3	14,13	19,59	18,41	27,57						
56	10,57	16,17	14,99	26,70						
298	7,46	15,58	13,85	27,07						
w média (%)				27,11						

Apêndice A.2 – Resíduo puro com 0 dias de cura (teor de umidade pós ruptura).

Moldagem: 01/12/14			Ruptura: 01/12/14	
Dados curva de compactação na energia normal:				
Umidade ótima (%)		25,6	ρs máxima (g/cm ³)	
			1,545	
CP1				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
158	11,24	20,22	18,33	26,66
512	10,42	26,16	22,88	26,32
149	11,09	22,47	20,07	26,73
w média (%) após ruptura			26,57	
CP2				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
507	7,60	25,04	21,40	26,38
8	11,08	23,49	20,86	26,89
10	9,55	23,46	20,51	26,92
w média (%) após ruptura			26,73	
CP3				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
38	8,16	25,91	22,19	26,51
136	10,61	24,08	21,30	26,01
196	12,80	27,01	24,07	26,09
w média (%) após ruptura			26,20	
CP4				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
w média (%) após ruptura			#DIV/0!	
CP5				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
w média (%) após ruptura			#DIV/0!	
CP6				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
w média (%) após ruptura			26,50	

Apêndice A.3 – Resíduo puro com 7 dias de cura (preparação dos CPs para ensaios de compressão simples).

Amostra: Resíduo puro - 7 dias de cura					Moldagem:26/11/14 Ruptura:02/12/14				
Dados curva de compactação na energia normal:									
Umidade ótima (%)				25,6	ρs máxima (g/cm³)				1,545
CP1					CP2				
Propriedades				Média	Propriedades				Média
h (mm)	101,40	100,80	101,30	101,17	h (mm)	101,70	101,48	101,20	101,46
Ø (mm)	51,20	51,22	51,10	51,17	Ø (mm)	51,28	51,32	51,10	51,23
M (g)	398,77				M (g)	398,65			
V (cm³)	207,97				V (cm³)	209,06			
ρs (g/cm³)	1,515				ρs (g/cm³)	1,507			
GC (%)	98,06				GC (%)	97,52			
CP3					CP4				
Propriedades				Média	Propriedades				Média
h (mm)	101,10	101,00	100,72	100,94	h (mm)	101,30	101,10	100,70	101,03
Ø (mm)	51,24	51,20	51,20	51,21	Ø (mm)	51,26	51,18	51,10	51,18
M (g)	398,77				M (g)	398,46			
V (cm³)	207,83				V (cm³)	207,75			
ρs (g/cm³)	1,516				ρs (g/cm³)	1,515			
GC (%)	98,13				GC (%)	98,09			
CP5					CP6				
Propriedades				Média	Propriedades				Média
h (mm)	101,90	101,42	101,38	101,57	h (mm)	101,06	101,70	101,40	101,39
Ø (mm)	51,24	51,20	51,18	51,21	Ø (mm)	51,26	51,26	51,16	51,23
M (g)	398,75				M (g)	398,7			
V (cm³)	209,06				V (cm³)	208,85			
ρs (g/cm³)	1,507				ρs (g/cm³)	1,508			
GC (%)	97,54				GC (%)	97,63			
Umidade									
Cápsula	Mc (g)		M + Mc (g)		Ms + Mc (g)		w (%)		
132	11,18		15,86		14,87		26,83		
11	11,83		17,24		16,11		26,40		
221	13,8		18,77		17,73		26,46		
w média (%)					26,56				

Apêndice A.4 – Resíduo puro com 7 dias de cura (teor de umidade pós ruptura).

Moldagem: 26/11/14		Ruptura: 02/12/14		
Dados curva de compactação na energia normal:				
Umidade ótima (%)		25,6	ps máxima (g/cm ³)	1,545
CP1				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
56	10,55	21,87	19,59	25,22
158	11,24	23,94	21,40	25,00
149	11,08	22,93	20,51	25,66
w média (%) após ruptura			25,29	
CP2				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
512	10,44	26,58	23,27	25,80
8	11,10	27,11	23,91	24,98
3	14,13	29,59	26,48	25,18
w média (%) após ruptura			25,32	
CP3				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
10	9,54	21,59	19,13	25,65
151	13,67	27,98	25,10	25,20
298	7,44	26,77	22,81	25,76
w média (%) após ruptura			25,54	
CP4				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
w média (%) após ruptura				
CP5				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
w média (%) após ruptura				
CP6				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
w média (%) após ruptura			25,38	

Apêndice A.5 – Resíduo puro com 14 dias de cura (preparação dos CPs para ensaios de compressão simples).

Amostra: Resíduo puro - 14 dias de cura					Moldagem:24/11/14 Ruptura:08/12/14				
Dados curva de compactação na energia normal:									
Umidade ótima (%)				25,6	ρs máxima (g/cm³)				1,545
CP1					CP2				
Propriedades				Média	Propriedades				Média
h (mm)	102,30	102,10	101,70	102,03	h (mm)	102,60	101,70	102,40	102,23
Ø (mm)	51,20	51,20	51,10	51,17	Ø (mm)	51,24	51,20	51,14	51,19
M (g)	397,79				M (g)	397,06			
V (cm³)	209,69				V (cm³)	210,32			
ρs (g/cm³)	1,498				ρs (g/cm³)	1,491			
GC (%)	96,98				GC (%)	96,51			
CP3					CP4				
Propriedades				Média	Propriedades				Média
h (mm)	101,80	102,30	102,20	102,10	h (mm)	101,40	101,60	101,80	101,60
Ø (mm)	51,20	51,18	51,10	51,16	Ø (mm)	51,20	51,18	51,12	51,17
M (g)	397,93				M (g)	397,3			
V (cm³)	209,78				V (cm³)	208,80			
ρs (g/cm³)	1,498				ρs (g/cm³)	1,503			
GC (%)	96,97				GC (%)	97,27			
CP5					CP6				
Propriedades				Média	Propriedades				Média
h (mm)	101,60	102,10	101,30	101,67	h (mm)	101,90	102,30	101,90	102,03
Ø (mm)	51,20	51,18	51,12	51,17	Ø (mm)	51,20	51,18	51,10	51,16
M (g)	398,12				M (g)	397,94			
V (cm³)	208,94				V (cm³)	209,64			
ρs (g/cm³)	1,505				ρs (g/cm³)	1,499			
GC (%)	97,41				GC (%)	97,04			
Umidade									
Cápsula	Mc (g)	M + Mc (g)		Ms + Mc (g)	w (%)				
57	9,13	15,69		14,33	26,15				
177	9,88	19,56		17,55	26,21				
67	13,56	25,9		23,24	27,48				
w média (%)					26,61				

Apêndice A.6 – Resíduo puro com 14 dias de cura (teor de umidade pós ruptura).

Moldagem: 24/11/14			Ruptura: 08/12/14	
Dados curva de compactação na energia normal:				
Umidade ótima (%)		25,6	ρs máxima (g/cm ³)	
			1,545	
CP1				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
56	10,55	21,60	19,31	26,14
8	11,09	24,80	21,95	26,24
151	13,68	32,60	28,75	25,55
w média (%) após ruptura			25,98	
CP2				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
3	14,12	30,04	26,75	26,05
298	7,45	30,12	25,46	25,87
223	9,54	23,79	20,84	26,11
w média (%) após ruptura			26,01	
CP3				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
145	11,08	26,03	22,96	25,84
158	11,24	24,84	22,01	26,28
512	10,42	25,83	22,67	25,80
w média (%) após ruptura			25,97	
CP4				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
w média (%) após ruptura				
CP5				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
w média (%) após ruptura				
CP6				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
w média (%) após ruptura				

Apêndice A.7 – Resíduo puro com 28 dias de cura (preparação dos CPs para ensaios de compressão simples).

Amostra: Resíduo puro - 28 dias de cura					Moldagem:10/12/14 Ruptura:07/01/15				
Dados curva de compactação na energia normal:									
Umidade ótima (%)				25,6	ρs máxima (g/cm³)				1,545
CP1					CP2				
Propriedades				Média	Propriedades				Média
h (mm)	101,08	101,70	101,00	101,26	h (mm)	100,40	101,40	100,74	100,85
Ø (mm)	51,20	51,20	51,04	51,15	Ø (mm)	51,24	51,22	51,20	51,22
M (g)	398,47				M (g)	398,68			
V (cm³)	207,94				V (cm³)	207,69			
ρs (g/cm³)	1,512				ρs (g/cm³)	1,515			
GC (%)	97,86				GC (%)	98,03			
CP3					CP4				
Propriedades				Média	Propriedades				Média
h (mm)	101,18	102,30	101,40	101,63	h (mm)	101,22	101,60	100,90	101,24
Ø (mm)	51,20	51,18	51,18	51,19	Ø (mm)	51,20	51,20	51,10	51,17
M (g)	398,71				M (g)	398,64			
V (cm³)	209,02				V (cm³)	208,06			
ρs (g/cm³)	1,505				ρs (g/cm³)	1,512			
GC (%)	97,41				GC (%)	97,84			
CP5					CP6				
Propriedades				Média	Propriedades				Média
h (mm)	101,60	102,10	101,30	101,67	h (mm)	101,90	102,30	101,90	102,03
Ø (mm)	51,20	51,18	51,12	51,17	Ø (mm)	51,20	51,18	51,10	51,16
M (g)	398,12				M (g)	397,94			
V (cm³)	208,94				V (cm³)	209,64			
ρs (g/cm³)	1,503				ρs (g/cm³)	1,498			
GC (%)	97,31				GC (%)	96,94			
Umidade									
Cápsula	Mc (g)		M + Mc (g)		Ms + Mc (g)		w (%)		
56	10,56		16,88		15,52		27,42		
136	10,62		19,33		17,53		26,05		
3	9,62		15,02		13,88		26,76		
w média (%)					26,74				

Apêndice A.8 – Resíduo puro com 28 dias de cura (teor de umidade pós ruptura).

Moldagem: 10/12/14		Ruptura: 07/01/15		
Dados curva de compactação na energia normal:				
Umidade ótima (%)	25,6	ρs máxima (g/cm³)	1,545	
CP1				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
3	14,13	27,74	25,06	24,52
233	15,41	26,55	24,36	24,47
196	11,89	22,23	20,18	24,73
w média (%) após ruptura			24,57	
CP2				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
202	9,12	17,63	15,90	25,52
507	7,61	23,78	20,58	24,67
4	7,53	22,39	19,39	25,30
w média (%) após ruptura			25,16	
CP3				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
298	7,47	22,88	19,85	24,47
8	11,09	25,33	22,47	25,13
38	8,18	29,32	25,16	24,50
w média (%) após ruptura			24,70	
CP4				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
w média (%) após ruptura				
CP5				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
w média (%) após ruptura				
CP6				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
w média (%) após ruptura				

APÊNDICE B

Moldagem de CPs para ruptura à compressão simples e teor de umidade pós ensaio para os CPs de resíduo com 2% de cimento

Apêndice B.1 – Resíduo com 2% de cimento com 7 dias de cura (preparação dos CPs para ensaios de compressão simples).

Amostra: Res. + 2% cim. - 7 dias de cura					Moldagem:27/11/14 Ruptura:03/12/14						
Dados curva de compactação na energia normal:											
Umidade ótima (%)					25,6	ρs máxima (g/cm³)					1,545
CP1					CP2						
Propriedades				Média	Propriedades				Média		
h (mm)	101,18	101,25	101,20	101,21	h (mm)	101,50	101,55	101,45	101,50		
Ø (mm)	51,28	51,30	51,30	51,29	Ø (mm)	51,30	51,22	51,22	51,25		
M (g)	398,27				M (g)	398,73					
V (cm³)	209,03				V (cm³)	209,25					
ρs (g/cm³)	1,513				ρs (g/cm³)	1,513					
GC (%)	97,90				GC (%)	97,91					
CP3					CP4						
Propriedades				Média	Propriedades				Média		
h (mm)	101,35	101,52	101,60	101,49	h (mm)	101,08	101,36	101,18	101,21		
Ø (mm)	51,24	51,30	51,22	51,25	Ø (mm)	51,20	51,20	51,28	51,23		
M (g)	398,7				M (g)	398,92					
V (cm³)	209,28				V (cm³)	208,48					
ρs (g/cm³)	1,512				ρs (g/cm³)	1,519					
GC (%)	97,89				GC (%)	98,32					
CP5					CP6						
Propriedades				Média	Propriedades				Média		
h (mm)	101,20	101,10	101,25	101,18	h (mm)	101,60	101,48	101,40	101,49		
Ø (mm)	51,32	51,36	51,30	51,33	Ø (mm)	51,20	51,28	51,30	51,26		
M (g)	398,76				M (g)	398,84					
V (cm³)	209,25				V (cm³)	209,35					
ρs (g/cm³)	1,513				ρs (g/cm³)	1,513					
GC (%)	97,92				GC (%)	97,90					
Umidade											
Cápsula	Mc (g)	M + Mc (g)		Ms + Mc (g)	w (%)						
202	9,13	15,28		14,03	25,51						
4	7,51	19,3		16,88	25,83						
3	9,61	17,19		15,6	26,54						
w média (%)					25,96						

Apêndice B.2 – Resíduo com 2% de cimento com 7 dias de cura (teor de umidade pós ruptura).

Moldagem: 27/11/14			Ruptura: 03/12/14	
Dados curva de compactação na energia normal:				
Umidade ótima (%)	25,6		ρ_s máxima (g/cm ³)	1,545
CP1				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
151	13,67	28,44	25,51	24,75
298	7,45	24,79	21,36	24,66
223	9,54	24,42	21,45	24,94
w média (%) após ruptura			24,78	
CP2				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
8	11,09	24,33	21,71	24,67
512	10,44	24,20	21,44	25,09
3	14,14	26,81	24,31	24,58
w média (%) após ruptura			24,78	
CP3				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
158	11,24	28,82	25,31	24,95
149	11,09	24,90	22,16	24,75
56	10,56	25,41	22,45	24,89
w média (%) após ruptura			24,86	
CP4				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
48	10,78	26,14	22,71	28,75
212	10,84	25,04	21,8	29,56
1	11,91	26,44	23,21	28,58
w média (%) após ruptura			28,97	
CP5				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
193	8,29	26,87	22,69	29,03
233	15,45	32,55	28,67	29,35
45	11,88	29,11	25,18	29,55
w média (%) após ruptura			29,31	
CP6				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
11	11,85	30,13	25,92	29,92
172	10,34	23,78	20,76	28,98
198	13,82	28,92	25,48	29,50

Apêndice B.3 – Resíduo com 2% de cimento com 14 dias de cura (preparação dos CPs para ensaios de compressão simples).

Amostra: Res. + 2% cim. - 14 dias de cura					Moldagem:25/11/14 Ruptura:09/12/14					
Dados curva de compactação na energia normal:										
Umidade ótima (%)					25,6	ρs máxima (g/cm³)				1,545
CP1					CP2					
Propriedades				Média	Propriedades				Média	
h (mm)	101,40	101,18	101,58	101,39	h (mm)	101,90	101,60	101,70	101,73	
Ø (mm)	51,30	51,22	51,10	51,21	Ø (mm)	51,30	51,30	51,20	51,27	
M (g)	397,34				M (g)	397,82				
V (cm³)	208,69				V (cm³)	209,90				
ρs (g/cm³)	1,508				ρs (g/cm³)	1,501				
GC (%)	97,60				GC (%)	97,16				
CP3					CP4					
Propriedades				Média	Propriedades				Média	
h (mm)	101,40	101,20	101,70	101,43	h (mm)	101,60	101,46	101,62	101,56	
Ø (mm)	51,30	51,30	51,18	51,26	Ø (mm)	51,12	51,18	51,20	51,17	
M (g)	397,79				M (g)	398,62				
V (cm³)	209,22				V (cm³)	208,72				
ρs (g/cm³)	1,506				ρs (g/cm³)	1,513				
GC (%)	97,47				GC (%)	97,90				
CP5					CP6					
Propriedades				Média	Propriedades				Média	
h (mm)	102,00	101,86	101,58	101,81	h (mm)	101,78	102,26	102,20	102,08	
Ø (mm)	51,28	51,20	51,10	51,19	Ø (mm)	51,20	51,30	51,30	51,27	
M (g)	398,66				M (g)	398,75				
V (cm³)	209,46				V (cm³)	210,61				
ρs (g/cm³)	1,507				ρs (g/cm³)	1,500				
GC (%)	97,57				GC (%)	97,06				
Umidade										
Cápsula	Mc (g)		M + Mc (g)		Ms + Mc (g)		w (%)			
132	11,18		16,03		15,01		26,63			
221	13,8		21,29		19,74		26,09			
11	11,82		16,9		15,85		26,05			
w média (%)					26,26					

Apêndice B.4 – Resíduo com 2% de cimento com 14 dias de cura (teor de umidade pós ruptura)

Moldagem: 25/11/14			Ruptura: 09/12/14	
Dados curva de compactação na energia normal:				
Umidade ótima (%)		25,6	ρs máxima (g/cm³)	
			1,545	
CP1				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
136	10,62	25,38	22,40	25,30
196	12,82	26,89	24,03	25,51
38	8,17	23,01	19,98	25,66
w média (%) após ruptura			25,49	
CP2				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
132	11,18	24,89	22,08	25,78
221	13,82	28,94	25,89	25,27
3	9,62	21,80	19,33	25,44
w média (%) após ruptura			25,50	
CP3				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
8	11,09	26,17	23,16	24,94
151	13,68	31,70	28,05	25,40
56	10,55	24,17	21,40	25,53
w média (%) após ruptura			25,29	
CP4				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
223	9,54	25,98	22,24	29,45
149	11,09	25,64	22,38	28,88
512	10,43	26,46	22,83	29,27
w média (%) após ruptura			29,20	
CP5				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
3	14,12	28,06	24,83	30,16
298	7,45	22,65	19,28	28,49
172	10,31	22,71	19,88	29,57
w média (%) após ruptura			29,41	
CP6				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
212	10,84	24,44	21,28	30,27
202	9,13	26	22,16	29,47
4	7,52	26,17	21,96	29,16

Apêndice B.5 – Resíduo com 2% de cimento com 28 dias de cura (preparação dos CPs para ensaios de compressão simples).

Amostra: Res. + 2% cim. - 28 dias de cura					Moldagem:11/12/14 Ruptura:08/01/14				
Dados curva de compactação na energia normal:									
Umidade ótima (%)				25,6	ρs máxima (g/cm³)				1,545
CP1					CP2				
Propriedades				Média	Propriedades				Média
h (mm)	100,90	100,90	101,08	100,96	h (mm)	100,54	101,40	101,10	101,01
Ø (mm)	51,20	51,24	51,20	51,21	Ø (mm)	51,24	51,20	51,10	51,18
M (g)	398,46				M (g)	398,66			
V (cm³)	207,87				V (cm³)	207,71			
ρs (g/cm³)	1,527				ρs (g/cm³)	1,529			
GC (%)	98,81				GC (%)	98,93			
CP3					CP4				
Propriedades				Média	Propriedades				Média
h (mm)	100,90	100,08	100,70	100,56	h (mm)	101,30	101,80	101,40	101,50
Ø (mm)	51,24	51,20	51,08	51,17	Ø (mm)	51,18	51,18	51,10	51,15
M (g)	398,5				M (g)	398,73			
V (cm³)	206,72				V (cm³)	208,49			
ρs (g/cm³)	1,535				ρs (g/cm³)	1,523			
GC (%)	99,37				GC (%)	98,58			
CP5					CP6				
Propriedades				Média	Propriedades				Média
h (mm)	101,40	101,10	101,48	101,33	h (mm)	101,90	101,40	101,38	101,56
Ø (mm)	51,28	51,18	51,24	51,23	Ø (mm)	51,16	51,20	51,28	51,21
M (g)	398,56				M (g)	398,45			
V (cm³)	208,78				V (cm³)	209,10			
ρs (g/cm³)	1,520				ρs (g/cm³)	1,518			
GC (%)	98,40				GC (%)	98,22			
Umidade									
Cápsula	Mc (g)	M + Mc (g)		Ms + Mc (g)	w (%)				
132	11,17	20,75		18,8	25,56				
151	13,67	25,03		22,7	25,80				
221	13,81	22,81		20,99	25,35				
w média (%)					25,57				

Apêndice B.6 – Resíduo com 2% de cimento com 28 dias de cura (teor de umidade pós ruptura).

Moldagem: 11/12/14			Ruptura: 08/01/15	
Dados curva de compactação na energia normal:				
Umidade ótima (%)		25,6	ρs máxima (g/cm ³)	1,545
CP1				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
507	7,60	17,46	15,56	23,87
4	7,52	21,07	18,48	23,63
8	11,08	20,20	18,43	24,08
w média (%) após ruptura			23,86	
CP2				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
196	11,85	27,69	24,65	23,75
298	7,50	20,19	17,76	23,68
202	9,14	21,61	19,21	23,83
w média (%) após ruptura			23,76	
CP3				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
3	14,14	26,43	24,08	23,64
133	15,42	27,40	25,12	23,51
38	8,17	25,59	22,27	23,55
w média (%) após ruptura			23,56	
CP4				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
45	11,83	25,76	22,58	29,58
512	9,15	18,85	16,64	29,51
67	13,54	30,12	26,44	28,53
w média (%) após ruptura			29,20	
CP5				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
193	8,28	23,96	20,57	27,58
10	9,55	20,03	17,66	29,22
56	10,56	22,19	19,58	28,94
w média (%) após ruptura			28,58	
CP6				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
16	11,86	25,81	22,85	26,93
198	13,8	29,91	26,48	27,05
213	13,43	24,45	21,92	29,80

APÊNDICE C

Moldagem de CPs para ruptura à compressão simples e teor de umidade pós ensaio para os CPs de resíduo com 5% de cimento

Apêndice C.1 – Resíduo com 5% de cimento com 7 dias de cura (preparação dos CPs para ensaios de compressão simples).

Amostra: Res. + 5% cim. - 7 dias de cura					Moldagem:12/02/15 Ruptura:19/02/15					
Dados curva de compactação na energia normal:										
Umidade ótima (%)					25,6		ρs máxima (g/cm³)			1,545
CP1					CP2					
Propriedades				Média	Propriedades				Média	
h (mm)	101,70	101,10	101,78	101,53	h (mm)	101,10	101,70	101,68	101,49	
Ø (mm)	51,10	51,18	51,20	51,16	Ø (mm)	51,20	51,12	51,10	51,14	
M (g)	407,72				M (g)	398,22				
V (cm³)	208,60				V (cm³)	208,37				
ρs (g/cm³)	1,570				ρs (g/cm³)	1,535				
GC (%)	101,59				GC (%)	99,34				
CP3					CP4					
Propriedades				Média	Propriedades				Média	
h (mm)	101,44	101,50	101,50	101,48	h (mm)	101,30	101,80	101,60	101,57	
Ø (mm)	51,20	51,20	51,18	51,19	Ø (mm)	51,20	51,28	51,10	51,19	
M (g)	397,5				M (g)	397,71				
V (cm³)	208,77				V (cm³)	208,95				
ρs (g/cm³)	1,529				ρs (g/cm³)	1,528				
GC (%)	98,96				GC (%)	98,93				
CP5					CP6					
Propriedades				Média	Propriedades				Média	
h (mm)	101,80	101,88	102,20	101,96	h (mm)	100,80	101,10	101,50	101,13	
Ø (mm)	51,00	51,20	51,16	51,12	Ø (mm)	51,20	51,18	51,10	51,16	
M (g)	398,29				M (g)	398,84				
V (cm³)	209,16				V (cm³)	207,79				
ρs (g/cm³)	1,529				ρs (g/cm³)	1,541				
GC (%)	98,98				GC (%)	99,77				
Umidade										
Cápsula	Mc (g)		M + Mc (g)		Ms + Mc (g)		w (%)			
15	9,1		17,87		16,14		24,57			
7	7,96		18,29		16,26		24,46			
8	11,91		20,08		18,47		24,54			
w média (%)					24,52					

Apêndice C.2 – Resíduo com 5% de cimento com 7 dias de cura (teor de umidade pós ruptura).

Moldagem: 12/02/14			Ruptura: 19/02/14	
Dados curva de compactação na energia normal:				
Umidade ótima (%)		25,6	ρs máxima (g/cm³)	
			1,545	
CP1				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
133	9,03	24,44	21,55	23,08
3	8,18	24,58	21,47	23,40
257	9,40	23,87	21,14	23,25
w média (%) após ruptura			23,25	
CP2				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
105	13,89	25,84	23,57	23,45
158	13,38	28,73	25,79	23,69
298	7,45	21,22	18,63	23,17
w média (%) após ruptura			23,44	
CP3				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
193	9,40	20,80	18,64	23,38
603	13,26	25,96	23,58	23,06
8	7,50	22,28	19,47	23,48
w média (%) após ruptura			23,30	
CP4				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
551	11,3	25,81	22,65	27,84
6	7,52	24,82	21,05	27,86
95	10,25	26,46	22,97	27,44
w média (%) após ruptura			27,71	
CP5				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
197	13,04	26,29	23,34	28,64
140	11,35	21,54	19,28	28,50
200	13,95	23,17	21,12	28,59
w média (%) após ruptura			28,58	
CP6				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
188	12,95	28,37	24,97	28,29
67	12,42	30,55	26,63	27,59
45	11,86	25,23	22,25	28,68

Apêndice C.3 – Resíduo com 5% de cimento com 14 dias de cura (preparação dos CPs para ensaios de compressão simples).

Amostra: Res. + 5% cim. - 14 dias de cura					Moldagem:20/01/15 Ruptura:03/02/15					
Dados curva de compactação na energia normal:										
Umidade ótima (%)					25,6	ρs máxima (g/cm³)				1,545
CP1					CP2					
Propriedades				Média	Propriedades				Média	
h (mm)	101,68	101,50	100,00	101,06	h (mm)	100,80	100,52	101,00	100,77	
Ø (mm)	51,30	51,38	51,20	51,29	Ø (mm)	51,24	51,18	51,18	51,20	
M (g)	398,2				M (g)	397,93				
V (cm³)	208,72				V (cm³)	207,37				
ρs (g/cm³)	1,524				ρs (g/cm³)	1,533				
GC (%)	98,62				GC (%)	99,20				
CP3					CP4					
Propriedades				Média	Propriedades				Média	
h (mm)	100,80	101,60	100,90	101,10	h (mm)	101,80	102,00	101,80	101,87	
Ø (mm)	51,40	51,20	51,30	51,30	Ø (mm)	51,20	51,20	51,18	51,19	
M (g)	397,47				M (g)	397,87				
V (cm³)	208,86				V (cm³)	209,57				
ρs (g/cm³)	1,520				ρs (g/cm³)	1,516				
GC (%)	98,38				GC (%)	98,14				
CP5					CP6					
Propriedades				Média	Propriedades				Média	
h (mm)	101,78	101,60	101,30	101,56	h (mm)	101,00	101,18	101,50	101,23	
Ø (mm)	51,20	51,20	51,20	51,20	Ø (mm)	51,18	51,18	51,20	51,19	
M (g)	398,38				M (g)	398,02				
V (cm³)	208,99				V (cm³)	208,20				
ρs (g/cm³)	1,522				ρs (g/cm³)	1,527				
GC (%)	98,54				GC (%)	98,83				
Umidade										
Cápsula	Mc (g)	M + Mc (g)		Ms + Mc (g)	w (%)					
213	13,44	21,29		19,72	25,00					
4	7,53	15,01		13,52	24,87					
196	11,85	16,05		15,19	25,75					
w média (%)					25,21					

Apêndice C.4 – Resíduo com 5% de cimento com 14 dias de cura (teor de umidade pós ruptura).

Moldagem: 20/01/14			Ruptura: 03/02/14	
Dados curva de compactação na energia normal:				
Umidade ótima (%)		25,6	ρs máxima (g/cm ³)	1,545
CP1				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
197	13,05	26,32	23,90	22,30
216	12,77	24,22	22,08	22,99
18	12,06	21,61	19,82	23,07
w média (%) após ruptura			22,79	
CP2				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
193	9,42	19,23	17,40	22,93
551	11,33	19,92	18,30	23,24
8	7,52	25,45	22,13	22,72
w média (%) após ruptura			22,97	
CP3				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
45	11,88	24,15	21,88	22,70
298	7,46	19,06	16,88	23,14
84	11,13	20,13	18,44	23,12
w média (%) após ruptura			22,99	
CP4				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
158	13,41	29,98	26,3	28,55
527	9,44	22,38	19,55	27,99
15	9,13	19,82	17,46	28,33
w média (%) após ruptura			28,29	
CP5				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
95	10,3	25,45	22,19	27,42
8	11,93	23,05	20,66	27,38
38	8,22	24,35	20,94	26,81
w média (%) após ruptura			27,20	
CP6				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
67	12,41	31,26	27,33	26,34
4	7,5	22,79	19,59	26,47
105	13,87	26,58	23,94	26,22

Apêndice C.5 – Resíduo com 5% de cimento com 28 dias de cura (preparação dos CPs para ensaios de compressão simples).

Amostra: Res. + 5% cim. - 28 dias de cura					Moldagem:22/01/14 Ruptura:19/02/14					
Dados curva de compactação na energia normal:										
Umidade ótima (%)					25,6	ρs máxima (g/cm³)				1,545
CP1					CP2					
Propriedades				Média	Propriedades				Média	
h (mm)	101,78	100,70	100,90	101,13	h (mm)	101,50	101,80	101,70	101,67	
Ø (mm)	51,10	51,10	51,18	51,13	Ø (mm)	51,20	51,20	51,10	51,17	
M (g)	397,61				M (g)	398,04				
V (cm³)	207,51				V (cm³)	208,94				
ρs (g/cm³)	1,526				ρs (g/cm³)	1,517				
GC (%)	98,74				GC (%)	98,17				
CP3					CP4					
Propriedades				Média	Propriedades				Média	
h (mm)	101,70	102,10	102,10	101,97	h (mm)	101,24	101,28	102,00	101,51	
Ø (mm)	51,20	51,18	51,10	51,16	Ø (mm)	51,10	51,18	51,16	51,15	
M (g)	398,26				M (g)	398,59				
V (cm³)	209,50				V (cm³)	208,45				
ρs (g/cm³)	1,513				ρs (g/cm³)	1,522				
GC (%)	97,96				GC (%)	98,54				
CP5					CP6					
Propriedades				Média	Propriedades				Média	
h (mm)	101,40	102,00	101,50	101,63	h (mm)	101,90	101,90	101,80	101,87	
Ø (mm)	51,10	51,20	51,10	51,13	Ø (mm)	51,20	51,14	51,10	51,15	
M (g)	398,33				M (g)	398,71				
V (cm³)	208,60				V (cm³)	209,19				
ρs (g/cm³)	1,520				ρs (g/cm³)	1,517				
GC (%)	98,40				GC (%)	98,22				
Umidade										
Cápsula	Mc (g)		M + Mc (g)		Ms + Mc (g)		w (%)			
507	7,61		12,02		11,13		25,28			
193	8,27		13,05		12,08		25,46			
198	13,78		17,6		16,81		26,07			
w média (%)					25,61					

Apêndice C.6 – Resíduo com 5% de cimento com 28 dias de cura (teor de umidade pós ruptura).

Moldagem: 22/01/14			Ruptura: 19/02/15	
Dados curva de compactação na energia normal:				
Umidade ótima (%)		25,6	ρ_s máxima (g/cm ³)	1,545
CP1				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
120	12,41	25,83	23,31	23,12
125	7,78	21,88	19,25	22,93
7	11,66	23,37	21,20	22,75
w média (%) após ruptura			22,93	
CP2				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
18	12,06	25,44	22,86	23,89
221	13,81	27,98	25,29	23,43
198	13,81	25,41	23,16	24,06
w média (%) após ruptura			23,80	
CP3				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
5	14,18	29,45	26,54	23,54
157	9,51	28,87	25,18	23,55
185	7,52	21,06	18,44	23,99
w média (%) após ruptura			23,69	
CP4				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
2	7,86	22,61	19,35	28,37
9	11,49	21,5	19,25	28,99
132	11,25	21,22	18,94	29,65
w média (%) após ruptura			29,01	
CP5				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
151	13,67	25,67	23,03	28,21
162	12,96	25,72	23,01	26,97
56	9,15	24,87	21,39	28,43
w média (%) após ruptura			27,87	
CP6				
cap.	Mc (g)	M + Mc (g)	Ms + Mc (g)	w(%)
19	7,55	20,21	17,52	26,98
128	10,94	24,65	21,67	27,77
88	8,47	25,17	21,46	28,56

APÊNDICE D – Controle da moldagem dos CPs para o ensaio de cisalhamento direto.

Determinação do teor de umidade (%)				
Cápsula n°:		27	9	10
M + M (c)	g	21,6	15,55	17,08
M _S +M (c)	g	19,4	14,42	16,29
M (c)	g	10,69	9,93	13,21
M _w	g	2,20	1,13	0,79
M _S	g	8,71	4,49	3,08
w	%	25,26	25,17	25,65
w (médio)	%	25,36		

Dados do anel	
Identificação:	1,00
Massa (g):	2149,35
Altura (cm):	2,54
Largura (cm):	10,10
Volume (cm ³):	259,719

Características do corpo de prova			
Cargas normais (kpa)	50	100	200
Massa (Anel + CP):	2651,74	2652,52	2652,33
Massa (CP):	502,39	503,17	502,98
Massa Específica (g/cm ³):	1,934	1,937	1,937
Massa Espec. Seca (g/cm ³):	1,543	1,545	1,545
Grau de compactação (%):	99,87	100,03	99,99

APÊNDICE E

Coeficientes de variação no ensaio de Resistência à Compressão Simples

Apêndice E.1 – Coeficientes de variação no ensaio de resistência à compressão simples do resíduo puro (condição de ruptura sem imersão).

Período de cura	CP	Força máxima (N)					Tensão na força máxima (Mpa)				
		X	X ₁		X ₂		X	X ₁		X ₂	
			\bar{X}	δ	\bar{X}	δ		\bar{X}	δ	\bar{X}	δ
0 dias	CP1	711,4	717	1,19	717	1,19	0,3423	0,3479	1,62	0,3479	1,62
	CP2	712,7					0,3477				
	CP3	726,8					0,3536				
7 dias	CP7	899	848	5,23	822	0,06	0,4371	0,4120	5,28	0,3994	0,00
	CP8	821,9					0,3994				
	CP9	822,6					0,3994				
14 dias	CP13	692	744	6,07	770	0,98	0,3365	0,3742	5,85	0,3742	0,91
	CP14	775					0,3766				
	CP15	764,3					0,3718				
28 dias	CP19	915,7	790	14,79	727	8,28	0,4469	0,3544	16,12	0,3544	8,10
	CP20	684,6					0,3341				
	CP21	769,7					0,3747				

LEGENDA: X – Valores observados; X₁ – Todos os valores; X₂ – Valores adotados; \bar{X} – média aritmética dos resultados; δ – coeficiente de variação (%)

Apêndice E.2 – Coeficientes de variação no ensaio de resistência à compressão simples do resíduo puro (condição de ruptura com imersão).

Período de cura	CP	Força máxima (N)				Tensão na força máxima (Mpa)					
		X	X ₁		X ₂		X	X ₁		X ₂	
			\bar{X}	δ	\bar{X}	δ		\bar{X}	δ	\bar{X}	δ
0 dias	CP4	Não suportaram imersão									
	CP5										
	CP6										
7 dias	CP10										
	CP11										
	CP12										
14 dias	CP16										
	CP17										
	CP18										
28 dias	CP22										
	CP23										
	CP24										

LEGENDA: X – Valores observados; X₁ – Todos os valores; X₂ – Valores adotados; \bar{X} – média aritmética dos resultados; δ – coeficiente de variação (%)

Apêndice E.3 – Coeficiente de variação no ensaio de resistência à compressão simples da mistura entre resíduo e 2% de cimento (condição de ruptura sem imersão).

Período de cura	CP	Força máxima (N)				Tensão na força máxima (Mpa)					
		X	X ₁		X ₂		X	X ₁		X ₂	
			\bar{x}	δ	\bar{x}	δ		\bar{x}	δ	\bar{x}	δ
7 dias	CP1	1996					0,9667				
	CP2	1823	1961	6,34	2030	2,37	0,8843	0,9507	6,31	0,9839	2,47
	CP3	2064					1,0010				
14 dias	CP7	2524					1,2250				
	CP8	2259	2330	7,28	2234	1,61	1,0940	1,1297	7,39	1,0820	1,57
	CP9	2208					1,0700				
28 dias	CP13	1917					0,9308				
	CP14	2347	2248	13,09	2414	3,90	1,1410	1,1735	12,26	1,1735	3,92
	CP15	2480					1,2060				

LEGENDA: X – Valores observados; X₁ – Todos os valores; X₂ – Valores adotados; \bar{x} – média aritmética dos resultados; δ – coeficiente de variação (%)

Apêndice E.4 – Coeficiente de variação no ensaio de Resistência à Compressão Simples da mistura entre resíduo e 2% de cimento (condição de ruptura com imersão).

Período de cura	CP	Força máxima (N)				Tensão na força máxima (Mpa)					
		X	X ₁		X ₂		Valores	X ₁		X ₂	
			\bar{X}	δ	\bar{X}	δ		\bar{X}	δ	\bar{X}	δ
7 dias	CP4	1505					0,7303				
	CP5	1444	1378	12,37	1475	2,93	0,6983	0,7143	11,54	0,7143	3,17
	CP6	1184					0,5742				
14 dias	CP10	1605					0,7805				
	CP11	1511	1359	25,65	1558	4,27	0,734	0,6598	25,81	0,7573	4,34
	CP12	959,9					0,465				
28 dias	CP16	1820					0,8857				
	CP17	1773	1713	8,55	1797	1,85	0,8602	0,8322	8,63	0,8730	2,07
	CP18	1546					0,7506				

LEGENDA: X – Valores observados; X₁ – Todos os valores; X₂ – Valores adotados; \bar{X} – média aritmética dos resultados; δ – coeficiente de variação (%)

Apêndice E.5 – Coeficientes de variação no ensaio de resistência à compressão simples da mistura entre resíduo e 5% de cimento (condição de ruptura sem imersão).

Período de cura	CP	Força máxima (N)					Tensão na força máxima (Mpa)				
		X	X ₁		X ₂		X	X ₁		X ₂	
			\bar{X}	δ	\bar{X}	δ		\bar{X}	δ	\bar{X}	δ
7 dias	CP1	4062					1,9760				
	CP2	3637	3780	6,45	3640	0,10	1,7700	1,8387	6,47	1,7700	0,00
	CP3	3642					1,7700				
14 dias	CP13	4178					2,0220				
	CP14	3746	3870	6,94	3716	1,14	1,8190	1,8010	7,15	1,8010	1,41
	CP15	3686					1,7830				
28 dias	CP19	4747					2,3080				
	CP20	4687	4537	6,90	4717	0,90	2,2800	2,1560	7,05	2,2940	0,86
	CP21	4177					2,0320				

LEGENDA: X – Valores observados; X₁ – Todos os valores; X₂ – Valores adotados; \bar{X} – média aritmética dos resultados; δ – coeficiente de variação (%)

Apêndice E.6 – Coeficientes de variação no ensaio de resistência à compressão simples da mistura entre resíduo e 5% de cimento (condição de ruptura com imersão).

Período de cura	CP	Força máxima (N)					Tensão na força máxima (Mpa)				
		X	X ₁		X ₂		X	X ₁		X ₂	
			\bar{x}	δ	\bar{x}	δ		\bar{x}	δ	\bar{x}	δ
7 dias	CP4	2622					1,274				
	CP5	2896	2539	15,95	2759	7,02	1,411	1,3425	14,74	1,3425	7,22
	CP6	2099					1,021				
14 dias	CP16	3155					1,533				
	CP17	2631	2674	17,24	2893	12,81	1,278	1,2990	17,26	1,4055	12,83
	CP18	2236					1,086				
28 dias	CP22	3965					1,93				
	CP23	3535	3578	10,25	3385	6,27	1,721	1,7417	10,27	1,6475	6,31
	CP24	3235					1,574				

LEGENDA: X – Valores observados; X₁ – Todos os valores; X₂ – Valores adotados; \bar{x} – média aritmética dos resultados; δ – coeficiente de variação (%)

APÊNDICE F

Planilhas dos ensaios de Mini-CBR, Expansão e Retração

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - USP
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTE - STT
LABORATÓRIO DE ESTRADAS
ENSAIO DE MINI-CBR

Identificação:						Amostra:			
						Energia: Intermediária			
						1° ponto			
Cilindro número		18		51		EXPANSÃO			
Massa de solo a compactar	g	190,00		190,00		Cilindro número	51		
Altura do corpo de prova	mm	49,25		49,76		Altura do corpo de prova (H)	mm	49,76	
Área do corpo de prova	cm ²	19,56		19,56		Leitura inicial (LI)	mm	6,12	
Massa do corpo de prova + cilindro	g	962,35		965,98		Leitura Final(LF)	mm	6,83	
Massa do cilindro	g	777,70		780,12		L=LI-LF	mm	0,71	
Massa de solo compactado	g	184,65		185,86		Expansão(100 x L/H)	%	1,43	
Volume do corpo de prova	cm ³	96,33		97,33		RETRAÇÃO			
Massa específica	g/cm ³	1,917		1,910					
Massa específica seca	g/cm ³	1,618		1,612					
Média Massa específica seca	g/cm ³	1,615							
Constante do anel:	P E N E T R A Ç Ã O (mm)	Penetração Imediata		Penetração Após 24 horas		Cilindro número	18		
						Altura do corpo de prova (H)	mm	49,25	
			Leitura	Carga	Leitura	Carga	Leitura inicial (LI)	mm	3,52
		0,5		55		2	Leitura Final(LF)	mm	3,41
		1,0		78		5	L=LI-LF	mm	0,11
		1,5		93		8	Retração(100 x L/H)	%	0,22
		2,0		104		14	UMIDADE DA AMOSTRA		
		2,5		114		22	Cápsula número	124	
		3,0		124		28	Massa de solo úmido + tara	g	84,74
		3,5		135		35	Massa de solo seco + tara	g	75,74
4,0		147		42	Massa de água	g	9,00		
4,5		157		49	Tara da cápsula	g	26,99		
5,0		166		56	Massa de solo seco	g	48,75		
MINI CBR		Penetração	Carga	Mini-CBR	Carga	Mini-CBR	Massa de solo seco	g	48,75
		2,0 mm	104	35,75	14	5,93	Teor de umidade	%	18,46
		2,5 mm	114	37,27	22	7,98	Média das umidades		18,46
Data:									

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - USP
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTE - STT
LABORATÓRIO DE ESTRADAS
ENSAIO DE MINI-CBR

Identificação:				Amostra:								
				Energia: intermediária 2º ponto								
Cilindro número		4		20	EXPANSÃO							
Massa de solo a compactar	g	192,00		195,00								
Altura do corpo de prova	mm	49,07		49,97	Cilindro número		20					
Área do corpo de prova	cm ²	19,56		19,56	Altura do corpo de prova (H)	mm	49,97					
Massa do corpo de prova + cilindro	g	975,40		1006,04	Leitura inicial (LI)	mm	5,21					
Massa do cilindro	g	784,71		811,91	Leitura Final(LF)	mm	5,87					
Massa de solo compactado	g	190,69		194,13	L=LF-LI	mm	0,66					
Volume do corpo de prova	cm ³	95,98		97,74	Expansão(100 x L/H)	%	1,32					
Massa específica	g/cm ³	1,987		1,986	RETRAÇÃO							
Massa específica seca	g/cm ³	1,645		1,645								
Média Massa específica seca	g/cm ³	1,645										
Constante do anel:	P E N E T R A Ç Ã O (mm)	Penetração		Penetração		Cilindro número		4				
		Imediata		Após 24 horas		Altura do corpo de prova (H)	mm	49,07				
			Leitura	Carga	Leitura	Carga	Leitura inicial (LI)	mm	5,3			
		0,5		35		28	Leitura Final(LF)	mm	5,22			
		1,0		62		49	L=LI-LF	mm	0,08			
		1,5		81		59	Retração(100 x L/H)	%	0,16			
		2,0		95		70	UMIDADE DA AMOSTRA					
		2,5		106		81						
		3,0		120		89				Cápsula número		27
		3,5		131		98				Massa de solo úmido + tara	g	92,34
4,0		144		111	Massa de solo seco + tara	g				81,95		
4,5		157		121	Massa de água	g	10,39					
5,0		171		134	Tara da cápsula	g	31,94					
MINI CBR		Penetração	Carga	Mini-CBR	Carga	Mini-CBR	Massa de solo seco	g	50,01			
		2,0 mm	95	32,96	70	25,07	Teor de umidade	%	20,78			
		2,5 mm	106	34,81	81	27,06	Média das umidades		20,78			
Data:	Operador:											

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - USP
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTE - STT
LABORATÓRIO DE ESTRADAS
ENSAIO DE MINI-CBR

Identificação:					Amostra:				
					Energia: intermediária				
					4º ponto				
Cilindro número		12		31	EXPANSÃO				
Massa de solo a compactar	g	200,00		198,00					
Altura do corpo de prova	mm	50,95		50,92	Cilindro número		31		
Área do corpo de prova	cm ²	19,56		19,56	Altura do corpo de prova (H)	mm	50,92		
Massa do corpo de prova + cilindro	g	1014,99		995,55	Leitura inicial (LI)	mm	5,26		
Massa do cilindro	g	816,33		798,64	Leitura Final(LF)	mm	5,52		
Massa de solo compactado	g	198,66		196,91	L=LF-LI	mm	0,26		
Volume do corpo de prova	cm ³	99,66		99,60	Expansão(100 x L/H)	%	0,51		
Massa específica	g/cm ³	1,993		1,977	RETRAÇÃO				
Massa específica seca	g/cm ³	1,596		1,583					
Média Massa específica seca	g/cm ³	1,589							
Constante do anel:	P E N E T R A Ç Ã O (mm)	Penetração Imediata		Penetração Após 24 horas		Cilindro número	12		
						Altura do corpo de prova (H)	mm	50,95	
			Leitura	Carga	Leitura	Carga	Leitura inicial (LI)	mm	5,72
		0,5		9		4	Leitura Final(LF)	mm	5,25
		1,0		16		10	L=LI-LF	mm	0,47
		1,5		21		15	Retração(100 x L/H)	%	0,92
		2,0		26		20	UMIDADE DA AMOSTRA		
		2,5		31		24			
		3,0		34		29			
		3,5		39		35			
		4,0		44		41			
4,5		49		48	Massa de solo úmido + tara	g	85,74		
5,0		54		54	Massa de solo seco + tara	g	73,74		
					Massa de água	g	12,00		
					Tara da cápsula	g	25,59		
					Massa de solo seco	g	48,15		
MINI CBR	Penetração	Carga	Mini-CBR	Carga	Mini-CBR	Teor de umidade	%	24,92	
	2,0 mm	26	10,32	20	8,16	Média das umidades		24,92	
	2,5 mm	31	11,00	24	8,65				
Data:	Operador:								

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - USP
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTE - STT
LABORATÓRIO DE ESTRADAS
ENSAIO DE MINI-CBR

Identificação:				Amostra:					
				Energia: intermediária		5º ponto			
Cilindro número		14		41	EXPANSÃO				
Massa de solo a compactar	g	193,00		193,00					
Altura do corpo de prova	mm	50,52		50,49	Cilindro número		41		
Área do corpo de prova	cm²	19,56		19,56	Altura do corpo de prova (H)	mm	50,49		
Massa do corpo de prova + cilindro	g	970,03		1022,26	Leitura inicial (LI)	mm	5,42		
Massa do cilindro	g	780,71		832,07	Leitura Final(LF)	mm	5,51		
Massa de solo compactado	g	189,32		190,19	L=LF-LI	mm	0,09		
Volume do corpo de prova	cm³	98,82		98,76	Expansão(100 x L/H)	%	0,18		
Massa específica	g/cm³	1,916		1,926	RETRAÇÃO				
Massa específica seca	g/cm³	1,505		1,512					
Média Massa específica seca	g/cm³	1,508							
Constante do anel:	P E N E T R A Ç Ã O (mm)	Penetração		Penetração		Cilindro número		14	
		Imediata		Após 24 horas		Altura do corpo de prova (H)	mm	50,52	
			Leitura	Carga	Leitura	Carga	Leitura inicial (LI)	mm	6,29
		N	0,5	2	2	2	Leitura Final(LF)	mm	5,49
		E	1,0	4	5	5	L=LI-LF	mm	0,80
		T	1,5	6	8	8	Retração(100 x L/H)	%	1,58
		R	2,0	9	11	11	UMIDADE DA AMOSTRA		
		A	2,5	12	15	15			
		Ç	3,0	14	18	18	Cápsula número		113
		Ã	3,5	16	22	22	Massa de solo úmido + tara	g	99,15
		O	4,0	19	26	26	Massa de solo seco + tara	g	84,31
			4,5	22	30	30	Massa de água	g	14,84
	5,0	24	33	33	Tara da cápsula	g	30,02		
MINI CBR	Penetração		Carga	Mini-CBR	Carga	Mini-CBR	Massa de solo seco	g	54,29
	2,0 mm		9	3,99	11	4,78	Teor de umidade	%	27,33
	2,5 mm		12	4,52	15	5,57	Média das umidades		27,33
Data:	Operador:								

Os cálculos necessários a confecção dessas planilhas encontram-se abaixo:

Cálculo da massa específica (ρ)

O cálculo de ρ_d é dado pela Equação (20) abaixo:

$$\rho_d = \frac{M}{V} \quad \dots\dots (20)$$

Onde:

ρ = Massa específica (g/cm³);

M = Massa (g);

V = Volume do CP (cm³);

Cálculo da massa específica seca (ρ_d)

O cálculo de ρ_d é dado pela Equação (21):

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} \quad \therefore \quad \rho_d = \frac{\frac{M}{1 + \frac{w}{100}}}{A \times h} \quad \dots\dots (21)$$

Onde:

ρ_d = Massa específica dos sólidos (g/cm³);

M_s = Massa dos sólidos (g);

V = Volume do CP (cm³);

M = Massa do solo (g);

w = Umidade do solo (%);

A = Área do CP (cm²);

h = Altura do CP, definida na primeira medição;

Cálculo do Mini-CBR

Para o cálculo do Mini CBR pode-se usar duas Equações (22 ou 23):

$$\text{Para penetração de 2mm: Mini CBR} = 10^{0,896 \times \log(\text{carga}) - 0,254} \quad \dots\dots (22)$$

$$\text{Para penetração de 2mm: Mini CBR} = 10^{0,937 \times \log(\text{carga}) - 0,356} \quad \dots\dots (23)$$

Onde:

Carga = é a carga necessária para se atingir penetração de 2 ou 2,5 mm.

Expansão/Retração

A expansão e retração são definidas pela Equação (24):

$$\text{Expansão ou Retração} = \frac{L}{H} \times 100 \quad \text{..... (24)}$$

Onde:

Expansão ou retração = Dada em porcentagem (%)

L = Diferença entre a leitura inicial e a final (mm);

H = Altura inicial do corpo-de-prova (mm).

Cálculo do teor de umidade (w)

Pode ser calculado por meio de:

$$w = \frac{M_W}{M_S} \times 100 \quad \text{..... (25)}$$

Onde:

w = Umidade do solo (%);

M_W = Massa de água (g);

M_S = Massa de sólidos (g);

APÊNDICE G

Dados obtidos no ensaio de Mini-MCV e Perda de Massa por imersão

Amostra	Identificação		Resíduo puro de corte de rocha															
	Massa solo (M)	(g)	200,0			200,0			200,0			200,0			200,0			
	Identificação do cilindro	#	2			1			7			15			16			
	Massa do cilindro (M _{CIL})	(g)	855,09			783,89			858,25			856,81			858,69			
	Massa do solo e cilindro (M _S + M _{CIL})	(g)	1055,09			983,89			1058,25			1056,81			1058,69			
	Altura inicial CP (h)	(g)	200,00			200,00			200,00			200,00			200,00			
	Área do Cilindro (A)	cm ²	19,63			19,63			19,63			19,63			19,63			
Golpes / Afundamento [mm]	Observação	n	An	ΔAn	pd	An	ΔAn	pd	An	ΔAn	pd	An	ΔAn	pd	An	ΔAn	pd	
		1	73,93	17,46	1,066	72,95	17,95	1,103	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2	66,73	12,50	1,181	64,94	12,20	1,239	68,18	12,01	1,191	71,08	12,70	1,166	72,42	12,79	1,162	
		3	62,61	10,27	1,259	61,00	11,02	1,319	64,40	10,94	1,261	67,08	11,53	1,236	68,18	11,47	1,234	
		4	59,93	7,59	1,316	58,33	9,75	1,379	61,72	9,72	1,316	64,34	10,51	1,289	65,39	10,37	1,287	
		6	56,47	4,13	1,396	55,00	6,54	1,463	58,31	7,72	1,393	60,77	7,89	1,364	61,80	8,70	1,362	
		8	54,23	1,89	1,454	52,74	2,76	1,526	56,17	5,68	1,446	58,38	7,60	1,420	59,63	7,74	1,411	
		12	52,34	0,00	1,506	49,98	1,40	1,610	53,46	1,46	1,519	55,55	5,90	1,492	56,71	6,14	1,484	
		16	52,34	0,00	1,506	48,58	0,12	1,656	52,00	1,41	1,562	53,83	4,52	1,540	55,02	5,24	1,529	
		24	52,34	0,00	1,506	48,46		1,660	50,59	0,10	1,605	52,88	2,10	1,568	53,10	4,30	1,585	
		32	52,34	0,00	1,506				50,49		1,608	50,78	1,13	1,633	51,89	3,50	1,622	
		48	52,34	0,00	1,506				Exudou			49,65	0,34	1,670	50,57	2,68	1,664	
		64	52,34	0,00	1,506							49,31		1,681	49,78	2,43	1,690	
		96	52,34									Exudou			48,80	0,41	1,724	
		128	52,34												48,39		1,739	
	192	52,34												47,89		1,757		
	256	52,34												47,35		1,777		

Amostra	Identificação		Resíduo puro de corte de rocha				
		Solo para Ensaio	(g)	200,0	200,0	200,0	200,0
	Cilindro	#	2	1	7	15	16
Umidade	Cápsula	#	507	213	157	79	216
	Massa do solo e da cápsula ($M + M_C$)	(g)	13,80	20,64	18,99	17,35	17,83
	Massa dos sólidos e da cápsula ($M_S + M_C$)	(g)	12,40	19,12	17,65	16,02	16,90
	Massa da cápsula (M_C)	(g)	7,61	13,41	12,39	10,21	12,49
	Massa solo seco (M_S)	(g)	4,79	5,71	5,26	5,81	4,41
	Massa de água (M_W)	(g)	1,40	1,52	1,34	1,33	0,93
	Umidade (w)	(%)	29,23	26,62	25,48	22,89	21,09
PI	Massa extrudada (M_E)	(g)	29,57	32,59	31,57	33,00	34,88
	Massa desprendida (M_{SD})	(g)	82,21	93,82	100,21	105,92	98,31
	Fator de Correção (F)	---	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Perda de massa (PI)	(%)	278,02	287,84	317,43	320,93	281,83

Os cálculos realizados estão demonstrados a seguir:

Cálculo da Deformabilidade (afundamento) (ΔA_N)

O cálculo de ΔA_N é definido pela Equação (26):

$$\Delta A_N = A_N - A_{4N} \quad \dots\dots (26)$$

Onde:

ΔA_N = Diferença de altura, expressa em mm;

A_N = Leitura obtida após N golpes, expressa em mm;

A_{4N} = Leitura obtida após 4N golpes, expressa em mm;

Cálculo da massa específica seca (ρ_d)

O cálculo de ρ_d é dado pela Equação (27):

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} \quad \therefore \quad \rho_d = \frac{\frac{M}{1+w}}{A \times h} \quad \dots\dots (27)$$

Onde:

ρ_d = Massa específica dos sólidos (g/cm³);

M_s = Massa dos sólidos (g);

V = Volume do CP (cm³);

M = Massa do solo (g);

w = Umidade do solo (%);

A = Área do CP (cm²);

h = Altura do CP, definida na primeira medição;

Cálculo do teor de umidade (w)

Pode ser calculado por meio da Equação (28):

$$w = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \quad \dots\dots (28)$$

Onde:

w = Umidade do solo (%);

M_W = Massa de água (g);

M_S = Massa de sólidos (g);

Perda de massa por imersão (PI)

Caulculada através da Equação (29):

$$PI = \frac{M_{SD}}{M_E} \times F \times 100 \quad \text{..... (29)}$$

Onde:

PI = Perda de massa por imersão (%)

M_{SD} = Massa de solo desprendida (g). Pesada após secagem do solo retido no reservatório disposto embaixo da parte extrudada do CP.

M_E = Massa de solo extrudada (g). Essa massa foi calculada pela Equação (30):

$$M_E = A \times \rho d_{m\acute{a}x} \quad \text{..... (30)}$$

Onde:

A = Área do CP (cm²);

$\rho d_{m\acute{a}x}$ = Massa específica dos sólidos (g/cm³);

F = Fator de correção. Na execução do ensaio pode ser que a massa extrudada solte por dois tipos de movimento:

- Caso a parte extrudada caia inteira, significa que não houve erosão dessa massa e sim cisalhamento devido a algum argilo mineral que sofreu expansão, nesse caso F=0,5.
- Caso essa parte sofra erosão e o material vá se desprendendo aos poucos, F=1. Esse foi o caso do resíduo.