



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

TIAGO FEITOSA GONDIM

**APLICAÇÃO GEOTÉCNICA DE RESÍDUO DE MINERAÇÃO EM SISTEMAS DE
COBERTURA FINAL DE ATERROS SANITÁRIOS**

NATAL/RN

2020

TIAGO FEITOSA GONDIM

APLICAÇÃO GEOTÉCNICA DE RESÍDUO DE MINERAÇÃO EM SISTEMAS DE
COBERTURA FINAL DE ATERROS SANITÁRIOS

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito final à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Profa. Dra. Maria del Pilar Durante Ingunza.
Coorientador: Prof. Dr. Osvaldo de Freitas Neto.

NATAL/RN

2020

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Gondim, Tiago Feitosa.

Aplicação geotécnica de resíduo de mineração em sistemas de cobertura final de aterros sanitários / Tiago Feitosa Gondim. - 2020.

92f.: il.

Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, 2020.

Orientadora: Dra. Maria del Pilar Durante Ingunza.

Coorientador: Dr. Osvaldo de Freitas Neto.

1. Sistema de cobertura - Dissertação. 2. Aterros - Dissertação. 3. Resíduo de Mineração - Dissertação. 4. Condutividade hidráulica - Dissertação. 5. Sustentabilidade - Dissertação. I. Ingunza, Maria del Pilar Durante. II. Freitas Neto, Osvaldo de. III. Título.

TIAGO FEITOSA GONDIM

APLICAÇÃO GEOTÉCNICA DE RESÍDUO DE MINERAÇÃO EM SISTEMAS DE
COBERTURA FINAL DE ATERROS SANITÁRIOS

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito final à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Maria del Pilar Durante Ingunza – Orientador (UFRN)

Prof. Dr. Osvaldo de Freitas Neto – Coorientador (UFRN)

Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior – Examinador Interno (UFRN)

Prof. Dr. Ricardo Nascimento Flores Severo – Examinador Externo (IFRN)

Natal, 19 de março de 2020.

Dedico este trabalho a todas as pessoas que sempre confiaram no meu trabalho e que sempre me apoiaram incentivando meus estudos, em especial aos meus pais Hortência e Gondim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Hortência e Gondim, por serem meus maiores incentivadores na vida, pelo carinho, apoio, por sempre estarem ao meu lado durante toda minha vida, por acreditarem sempre na minha capacidade diante de todas as dificuldades.

Agradeço a toda minha família, em especial aos meus sobrinhos, fonte da minha fortaleza.

Agradeço a minha namorada, amiga e companheira, Hortência Melo pela paciência, carinho, afeito, atenção e cumplicidade, que tanto foram fundamentais para superar todas as dificuldade além das inúmeras horas de laboratório. A ela com todo meu amor.

A professora Pilar, pela a orientação do meu trabalho e sobretudo pela atenção e interesse demonstrado. Sem dúvidas seu profissionalismo, competência e entusiasmo representaram uma influência benéfica no decorrer de jornada, e na minha trajetória profissional.

Agradeço ao meu coorientador, Professor Osvaldo, por estar presente em todos os momentos durante a coorientação desta dissertação, por ter proporcionado grandes ensinamentos durante todo o período do mestrado, pela saberia e confiança no meu trabalho.

Aos meus professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil pelos ensinamentos de suas disciplinas que contribuíram para a minha formação profissional durante todo esse período.

Ao Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Rio Grande do Norte, por ter dado suporte necessário para o desenvolvimento da pesquisa e aos técnicos Valteson e João Batista pela ajuda com os ensaios. Ao ex-técnico Anderson, amigo e colega de mestrado, um agradecimento especial pela ajuda nos ensaios, ensinamentos técnicos e coleguismo durante as incansáveis horas de ensaios.

Aos meus amigos, irmãos de vida, que apoiaram e ajudaram incansavelmente meus esforços durante o mestrado. Pelos momentos de descontração que me proporcionaram e me fizeram superar o desânimo e o cansaço. A João Correia, Carlos Rilke, Cleiton Silva, Ceres Dantas meu obrigado.

Aos funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Viviane, Kerolyne e Sr. Geraldo pela paciência, amizade e presteza.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo fornecimento da bolsa de estudos.

Aos meus colegas de mestrado Rayanderson Saraiva, Juliana Araújo, Paloma Martins e Jemima Thabita e amigos da geotecnia Romário Steffano, Allan Benício, Natália Maria e Bruna Lira pelos momentos de descontração e todos momentos que vivemos juntos. Os levarei no coração para sempre.

Obrigado aos amigos que mesmo de longe me apoiaram e a todos os outros que não pude nominar sua importância nesta conquista.

Muito Obrigado!

Mantenha o foco na jornada, não no destino. A alegria é encontrada não em terminar uma atividade, mas sim em fazê-la.

Greg Anderson

RESUMO

O aproveitamento de resíduos de mineração dentro de cadeias produtivas, como o da construção civil, é uma importante solução ambiental para as atividades de mineração no Brasil. Pesquisadores têm demonstrado que diferentes tipos de resíduos de mineração podem ser incorporados a alguns tipos de obras geotécnicas cumprindo a função de barreira hidráulica. Neste cenário, a utilização do resíduo da scheelita em obras de geotecnia ambiental poderia ser uma solução ambientalmente sustentável para esse material. Este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica de emprego de dois resíduos da mineração da scheelita como revestimento compactado com função de barreira hidráulica em sistemas de cobertura de aterros sanitários. Ensaios de caracterização física, compactação, condutividade hidráulica em permeâmetros de parede rígida e flexível, FRX/DRX e MEV e erodibilidade foram realizados em quatro materiais formados pela mistura de dois resíduos gerados durante o beneficiamento da scheelita na Mina Brejuí em Currais Novos/RN. Nos ensaios foram utilizadas amostras conformadas pelos dois resíduos variando desde o resíduo fino exclusivamente, e partindo para variações de 25% em massa do teor de resíduo grosso (F100, F75G25, F50G50 e F25G75). Os resultados obtidos nos ensaios demonstram a viabilidade técnica no uso pretendido para o material. As amostras F100 e F75G25 demonstram-se viáveis à aplicação pretendida (barreira hidráulica de cobertura de resíduos) atendendo as exigências de normativas internacionais. Os demais compósitos (F50G50 e F25G75) poderiam ser aplicados com outras finalidades dentro de um aterro sanitário: como camadas de regularização e/ou proteção. Observou-se durante os ensaios de condutividade hidráulica que progressivamente as amostras que continham maior porcentagem de partículas finas ($< 0,075$ mm) houve uma diminuição da permeabilidade do material compactado, de $1,76 \times 10^{-6}$ para $2,18 \times 10^{-8}$ m/s, sem que houvesse necessariamente variação significativa da massa específica do material ensaiado ou porosidade, indicando que os finos incorporados preencheram os vazios das partículas maiores aumentando a tortuosidade do fluxo. A diminuição da permeabilidade pode ser explicada por fatores morfológicos próprios do material utilizado.

Palavras-chave: Sistema de Cobertura. Aterros. Resíduo de Mineração. Condutividade Hidráulica. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The use of mining residues within production chains, such as civil construction, is an important environmental solution for mining activities in Brazil. Researchers have shown that different types of mining residues can be incorporated into some types of geotechnical works, fulfilling the function of hydraulic barrier. In this scenario, the use of scheelite residue in environmental geotechnics works could be an environmentally sustainable solution for this material. This work aims to evaluate the technical viability of using two scheelita mining residues as a compacted coating with hydraulic barrier function in waste landfill covering systems. Physical characterization, compacting, hydraulic conductivity on rigid and flexible wall permeameters, XRF/XRD and SEM and erodibility tests were performed on four materials formed by mixing two residues generated during the scheelite processing at the Brejuí Mine in Currais Novos/RN. In the tests, samples were conformed by the two residues used, varying from the fine residue exclusively, and departing for variations of 25% by mass of the coarse residue content (F100, F75G25, F50G50 and F25G75). The obtained results demonstrate the technical viability of the intended use of the material. The F100 and F75G25 samples proved to be viable for the intended application (hydraulic barrier in landfill covering), meeting international normative requirements. The other composites (F50G50 and F25G75) could be applied for other purposes within a waste landfill: as regularization and/or protection layers. During the hydraulic conductivity tests, it was observed that, in the samples that contained a higher percentage of fine particles ($< 0,075$ mm), there was a progressive decrease in the permeability of the compacted material, from $1,76 \times 10^{-6}$ to $2,18 \times 10^{-8}$ m/s, but not necessarily a significant variation in the density or porosity, indicating that the incorporated fines filled the voids of the larger particles increasing the flow tortuosity. The decrease in permeability can be explained by morphological factors specific to the material used.

Keywords: Cover System. Landfill. Mining Residue. Hydraulic Conductivity. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação da minas brasileiras por produção.	22
Figura 2 – Fluxograma simplificado do beneficiamento da scheelita na Mina Brejuí.....	24
Figura 3 – Componentes básicos de revestimento impermeável superior.....	28
Figura 4 – Componentes básicos de revestimento impermeável superior.....	33
Figura 5 – Localização da coleta do Resíduo, na Mina Brejuí em Currais Novos/RN.	50
Figura 6 – Amostras de cada material ensaiado	51
Figura 7 – Equipamentos utilizados para moldagem e corpo. (a) molde; (b) elementos compactadores; (c) amostra compactada.	55
Figura 8 – Aparato constitutivo do ensaio de permeabilidade em câmara triaxial.....	56
Figura 9 – Modelos dos corpos de prova.....	61
Figura 10 – Imagem MEV em resíduos soltos. (a) resíduo grosso 70 x; (b) resíduo fino 240 x.	65
Figura 11 – Resíduos caracterizados por FRX e DRX. (a) Resíduo grosso; (b) Resíduo fino.	72
Figura 12 – MEV das amostras compactadas x500. (a) F100; (b) F75G25; (c) F50G50; (d) F25G75.	75
Figura 13 – MEV das amostras compactadas x1500. (a) F100; (b) F75G25; (c) F50G50; (d) F25G75.	76
Figura 14 – Resultado do ensaio de Crumb Test com torrões úmidos: (a) F100; (b) F75G25; (c) F50G50; (d) F25G75.....	78
Figura 15 – Procedimentos realizados no ensaio de desagregação por imersão total: (a) durante a submersão; (b) durante a submersão e desagregação de amostra F75G25; (c) após 24 horas de submersão.	80
Figura 16 – Procedimentos realizados no ensaio de desagregação por imersão parcial: (a) amostra antes do ensaio; (b) saturação por capilaridade; (c) nível de água em 1/3 da	

altura da amostra; (d) nível de água em $2/3$ da altura da amostra; (e) final do ensaio.

..... 81

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curvas granulométricas dos materiais ensaiados.	63
Gráfico 2 – Curvas de compactação das amostras.	65
Gráfico 3 – Resultados da condutividade hidráulica durante o ensaio.	69
Gráfico 4 – Permeabilidade e porosidade versus tipo de material.	70
Gráfico 5 – Efeito da quantidade de finos na condutividade hidráulica.	71
Gráfico 6 – DRX do resíduo grosso.	73
Gráfico 7 – DRX do resíduo fino.	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação dos resíduos conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004).	24
Quadro 2 – Classificação das reações ocorridas nas amostras.	60
Quadro 3 – Classificação dos resíduos conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004).	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos mínimos para o solos de impermeabilização.	37
Tabela 2 – Valores de condutividade hidráulica dos solos.....	39
Tabela 3 – Valores de gradientes hidráulicos máximos recomendados.	59
Tabela 4 – Parâmetros físicos dos materiais.....	64
Tabela 5 – Índices físicos do material compactado na umidade ótima.	66
Tabela 6 – Valores de k_{20} para os materiais compactados.	67
Tabela 7 – Características das amostras ensaiadas no permeâmetro de parede rígida.	67
Tabela 8 – Propriedades físicas iniciais dos CPs e resultado de k_{20}	69
Tabela 9 – Resultados dos ensaios de FRX para os dois resíduos ensaiados.....	73
Tabela 10 – Classe de poros de acordo com o diâmetro equivalente dos poros.....	76

LISTA DE ABREVIATURAS

cm	centímetros
g	gramas
grav.	gravitacional
k	quilo
m	metros
máx	máximo
mm	milímetros
Pa	pascal
s	segundos
ton.	toneladas

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing Materials
CC	Coefficiente de curvatura
CCL	Camada de Solo Compactado
CP	Corpo de Prova
CNU	Coefficiente de não uniformidade
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DRX	Difratometria de Raios X
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
GC	Grau de compactação
GCL	Geocomposto Argiloso
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
IP	Índice de plasticidade
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira
PEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
RCC	Resíduo de Construção Civil
RN	Rio Grande do Norte
RSU	Resíduo Sólido Urbano
SEMARH	Secretaria do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos
SM	Areia siltosa (<i>silt sand</i>)
SNCE	Simpósios Nacionais de Controle de Erosão
SP	Areia mal graduada (<i>poorly graded sand</i>)
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
USEPA	United States Environmental Protection Agency

LISTA DE SÍMBOLOS

γ_s	peso específico dos sólidos
γ_d	peso específico aparente seco
σ_3	tensão confinante
σ'_3	tensão confinante efetiva
ψ_t	sucção total
θ	umidade volumétrica
h	carga hidráulica
k_j	condutividade hidráulica na direção j
k_{20}	condutividade hidráulica a 20 °C
p_1	contrapressão de base
p_2	contrapressão de topo
u	poropressão
D_{10}	diâmetro efetivo do solo
d_{eq}	diâmetro equivalente do poro
G	gradiente hidráulico
S	grau de saturação
e	índice de vazios
n	porosidade
t	tempo
w	umidade
w_{ot}	umidade ótima
Δw	desvio da umidade
M_t	massa total
V_t	volume total

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
2	REVISÃO DE LITERATURA	22
2.1	Resíduos de mineração	22
2.1.1	Resíduo da mineração da scheelita	23
2.1.2	Características do resíduo da scheelita.....	25
2.2	Requisitos para utilização de materiais como barreira hidráulica	25
2.3	Sistemas de cobertura para aterros de resíduos	27
2.3.1	Cobertura convencional	27
2.3.1.1	<i>Camada de solo de cultivo</i>	28
2.3.1.2	<i>Camada de separação e filtro</i>	29
2.3.1.3	<i>Camada drenante de águas pluviais</i>	29
2.3.1.4	<i>Camada de proteção</i>	30
2.3.1.5	<i>Barreira hidráulica</i>	30
2.3.1.6	<i>Camada drenante de gases</i>	31
2.3.1.7	<i>Camada de regularização</i>	31
2.3.2	Coberturas alternativas.....	32
2.3.2.1	<i>Coberturas monolíticas e evapotranspirativas</i>	33
2.3.2.2	<i>Barreiras capilares</i>	34
2.3.2.3	<i>Geomembranas expostas</i>	35
2.3.2.4	<i>Coberturas com resíduos de papel</i>	35
2.4	Camada de solos compactados	36
2.4.1	Seleção de materiais para camada de solo compactado	37
2.5	Análise sistemática dos tipos de cobertura	38
2.6	Condutividade hidráulica	39
2.6.1	Condutividade hidráulica em solos saturados	40
2.6.2	Condutividade hidráulica em solos não saturados	40

2.6.3	Fatores que influenciam a condutividade hidráulica.....	41
2.6.3.1	Índice de vazios.....	43
2.6.3.2	Grau de saturação	43
2.6.3.3	Textura e forma das partículas	44
2.6.3.4	Temperatura e fluido percolante.....	44
2.6.3.5	Tecido estrutural	45
2.6.3.6	Composição mineralógica	46
2.6.4	Medição da condutividade hidráulica	47
2.7	Processos erosivos	48
2.7.1	A erodibilidade dos solos.....	49
3	MATERIAIS E MÉTODOS	50
3.1	Materiais	50
3.1.1	Misturas ensaiadas	51
3.2	Caracterização física.....	52
3.3	Caracterização química e mineralógica.....	52
3.4	Ensaio de compactação	52
3.5	Ensaio de condutividade hidráulica.....	53
3.5.1	Ensaio de permeâmetro de parede rígida	53
3.5.2	Ensaio de permeâmetro de parede flexível em célula triaxial	54
3.5.2.1	Preparação das amostras	54
3.5.2.2	Procedimentos de ensaio	55
3.5.2.3	Controle do gradiente hidráulico	58
3.6	Ensaio de erodibilidade.....	59
3.6.1	Ensaio de dispersão rápida (<i>crumb test</i>)	59
3.6.2	Ensaio de desagregação	60
4	RESULTADOS	63
4.1	Caracterização geotécnica.....	63

4.1.1	Caracterização física	63
4.1.2	Ensaio de compactação.....	65
4.1.3	Ensaio de condutividade hidráulica em permeâmetro de parede rígida	67
4.1.4	Ensaio de condutividade hidráulica em permeâmetro de parede flexível	68
4.2	Caracterização química e mineralógica	72
4.3	Caracterização morfológica	74
4.4	Ensaio de erodibilidade	77
4.4.1	Ensaio de dispersão rápida (<i>crumb test</i>)	77
4.4.2	Ensaio de desagregação	79
4.4.2.1	<i>Ensaio de desagregação por imersão total</i>	<i>79</i>
4.4.2.2	<i>Ensaio de desagregação por imersão parcial</i>	<i>81</i>
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
5.1	Conclusões	83
5.2	Sugestões para pesquisas futuras	84

1 INTRODUÇÃO

A região nordeste do Brasil contém uma das mais importantes jazidas de scheelita do país. Estima-se que em 2013 as reservas lavráveis totalizaram 25,4 mil toneladas de tungstênio contido, com teores de WO_3 variáveis entre 0,04% e 2,40% (DNPM, 2014). Essa região é a principal exportadora do minério no país. O maior depósito fica situado na cidade de Currais Novos e engloba as quatro principais minas da província: Brejuí, Barra Verde, Boca de Laje e Zangarelhas.

Segundo Machado (2012), estima-se que no entorno da cidade de Currais Novos existam mais de 4,5 milhões de toneladas de resíduo disposto a céu aberto. Nesse contexto, a significativa quantidade de resíduo produzido na região exige uma solução para a utilização desse material em obras de engenharia a fim de garantir o desempenho ambiental a longo prazo desta atividade. Por outro lado, a crescente dificuldade em encontrar materiais naturais de baixa permeabilidade para emprego na construção civil local justifica a busca e estudo de materiais substitutivos aos normalmente empregados, mas que de igual modo garantam a viabilidade técnica de sua utilização, principalmente para uso como barreira hidráulica.

A reutilização de resíduos de mineração vem se tornando uma prática bastante incentivada pelos setores de mineração. Do ponto de vista de gestão deste resíduos, seu armazenamento, normalmente feito em grandes pilhas ou barragens de material, representa um desafio ambiental.

No Brasil e no mundo há uma busca por soluções que visem a aplicação tecnicamente viável e ambientalmente possível desses materiais. Silva *et al.* (2017) destaca as áreas de atividade econômica em que o reuso do resíduo de mineração tem relevância, apresentando em 89% dos estudos analisados no trabalho, que a utilização desse material se destacou na indústria da construção civil.

Paralelamente, pode-se dizer que a depender do tipo de aplicação, a reutilização de um resíduo estará condicionada a fatores econômicos e tipo de obra aplicada. Os custos de mobilização e transporte podem em alguns casos elevar os custos produtivos inviabilizando a utilização do resíduo. Neste sentido, algumas aplicações geotécnicas podem ser privilegiadas como uso em rodovias e materiais de revestimentos de aterros de resíduos sólidos. Especificando-se o caso do resíduo de scheelita, sua proximidade à cidade de Currais Novos pode representar vantagens econômicas associadas à substituição de recursos minerais naturais e redução do custo de transporte se utilizado na própria cidade.

Na geotecnia, a utilização dos resíduos da scheelita ainda é pequena sendo mesmo assim mais comum a utilização dos rejeitos arenosos para aplicações rodoviárias como reforço de subleito, base arenosa impregnada de ligante hidráulico, ou até mesmo como material aplicado em base e sub-base de pavimentos (Andrade *et al.*, 2019, Santos *et al.*, 2019, Silva *et al.*, 2019, Souza *et al.*, 2016).

Na geotecnia ambiental a utilização de resíduos de mineração na execução de revestimentos para aterros de resíduos é mais comum para materiais de granulometria fina, pois tendem a apresentar baixa permeabilidade quando compactados. Diversos autores vêm estudando a aplicação de resíduos da mineração (Rakotonimaro *et al.*, 2017, Mbonimpa *et al.*, 2016, Mudd *et al.*, 2007, Benzaazoua *et al.*, 2006) com a finalidade de barreira hidráulica. Essas pesquisas sugerem que a inserção de um material de granulometria fina, em que pelo menos 10% das partículas tenham tamanho inferior a 0,002 mm, pode contribuir para um material compósito em que a condutividade hidráulica seja reduzida.

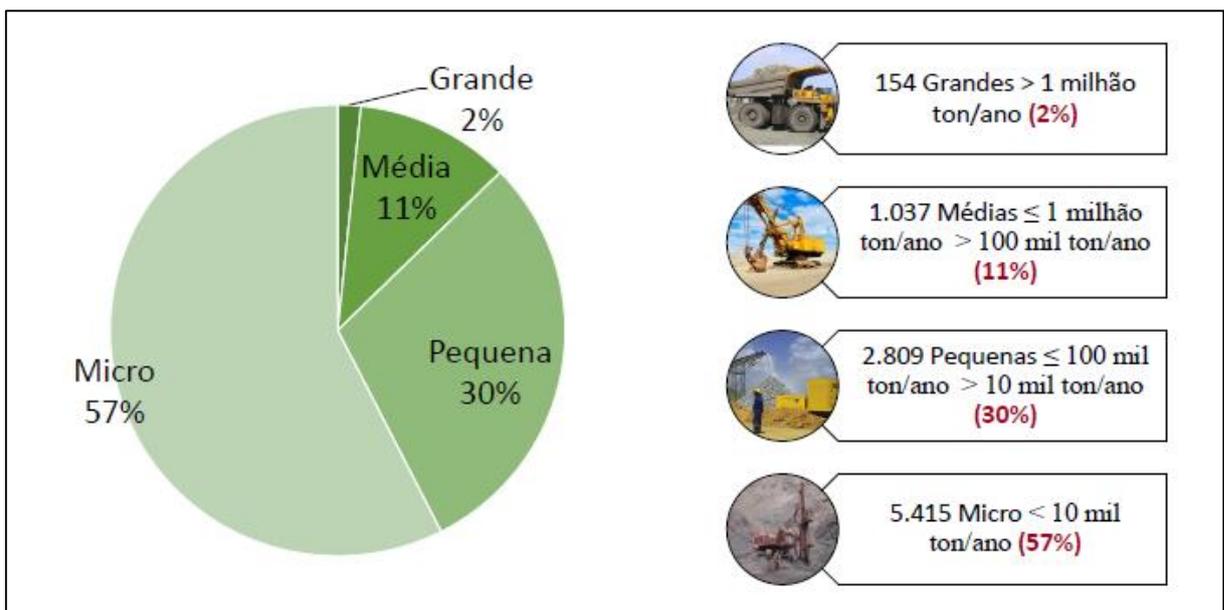
Dentro dessa perspectiva, não foi possível encontrar um grande número de trabalhos analisando a substituição integral de material natural normalmente empregado em aterros de resíduos por um resíduo de mineração com finalidade de barreira (solos de comportamento argiloso). Assim, o presente trabalho objetiva avaliar a viabilidade técnica de emprego de dois resíduos da mineração da scheelita como material com finalidade de barreira hidráulica em coberturas monolíticas de aterros de resíduos, avaliando requisitos geotécnicos, mineralógicos e de erodibilidade para este tipo de aplicação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Resíduos de mineração

A mineração no Brasil é uma das principais atividades econômicas do país, responsável por uma produção de mais de 2 bilhões de toneladas por ano, o que representou um faturamento superior 32 bilhões de reais em 2017. Essa produção foi produzida por aproximadamente 9.415 minas em atividade no país, em que a grande maioria eram formadas por micro e pequenas minas (IBRAM, 2018). A Figura 1 exemplifica o montante produzido por equivalência do porte das minas produtoras.

Figura 1 – Classificação da minas brasileiras por produção.



Fonte: IBRAM (2018, p.5).

No cenário global, o Brasil ganha destaque como grande exportador global de Nióbio, Minério de Ferro, Vermiculita, Grafita, Bauxita e Caulim. Outros tipos de minérios bastante exportados pela indústria mineral brasileira são o Estanho, Níquel, Magnesita, Manganês, Cromo, Ouro e Rochas Ornamentais (IBRAM, 2018).

Dentro do universo do consumo interno, o Brasil é auto suficiente na produção de Calcário, Diamante Industrial, talco e Tungstênio. No Rio Grande do Norte o Tungstênio tem uma importância histórica, sendo esse estado o pioneiro desta atividade no Brasil, permanecendo ainda como maior produtor nacional de scheelita.

O tungstênio é um minério normalmente encontrado em minerais de depósitos de veios de quartzo e em granitoides como os depósitos de scheelita (CaWO_4) formados em escarnitos. A formação da scheelita deve-se ao metamorfismo de contato de rochas carbonáticas, ricos em mineralizações metálicas, podendo ser considerados como rocha silicática rica em Ca, Fe, Mg (Mn) formado em contato mútuo com as rochas carbonáticas (Bucher e Grapes, 2011).

A scheelita pertence à classe dos tungstatos, tratando-se especificamente de um tungstato de cálcio – CaWO_4 (CaO – 19,4% e WO_3 – 80%), sendo encontrado em quatro cores: branca, amarela, verde e marrom. Emite luz por interferência de outro tipo de radiação (raios X, alfa, luz ultravioleta, etc.) (Machado, 2012).

Em 2013, as reservas lavráveis de scheelita localizadas no Estado do Rio Grande do Norte totalizaram 25,4 mil toneladas de tungstênio contido, com teores de WO_3 contido variáveis entre 0,04% e 2,4%. As reservas lavráveis de wolframita situadas no Estado do Pará, com teor contido de WO_3 equivalente a 0,6%, não atingiram mil toneladas. Além dos estados citados, o minério também pode ser encontrado na Paraíba, em Rondônia, Santa Catarina e São Paulo. Contudo, a participação das reservas de minério de tungstênio do Brasil no mundo é pouco expressiva, pois representa menos de 1% do total (DNPM, 2014).

As minas produtoras de scheelita no nordeste são: Mina Brejuí, Mina Boca de Lage e Mina Mineração Barra Verde, localizadas no município de Currais Novos/RN; Mina Bodó, no município de Bodó/RN; Minas Bonfim I e II, em Lages/RN e Mina Quixaba no município de Várzea/PB. Neste contexto, a Mina Brejuí é o maior produtor de scheelita e detém uma reserva de aproximadamente 9.130 toneladas de tungstênio a ser explorado (DNPM, 2014).

2.1.1 Resíduo da mineração da scheelita

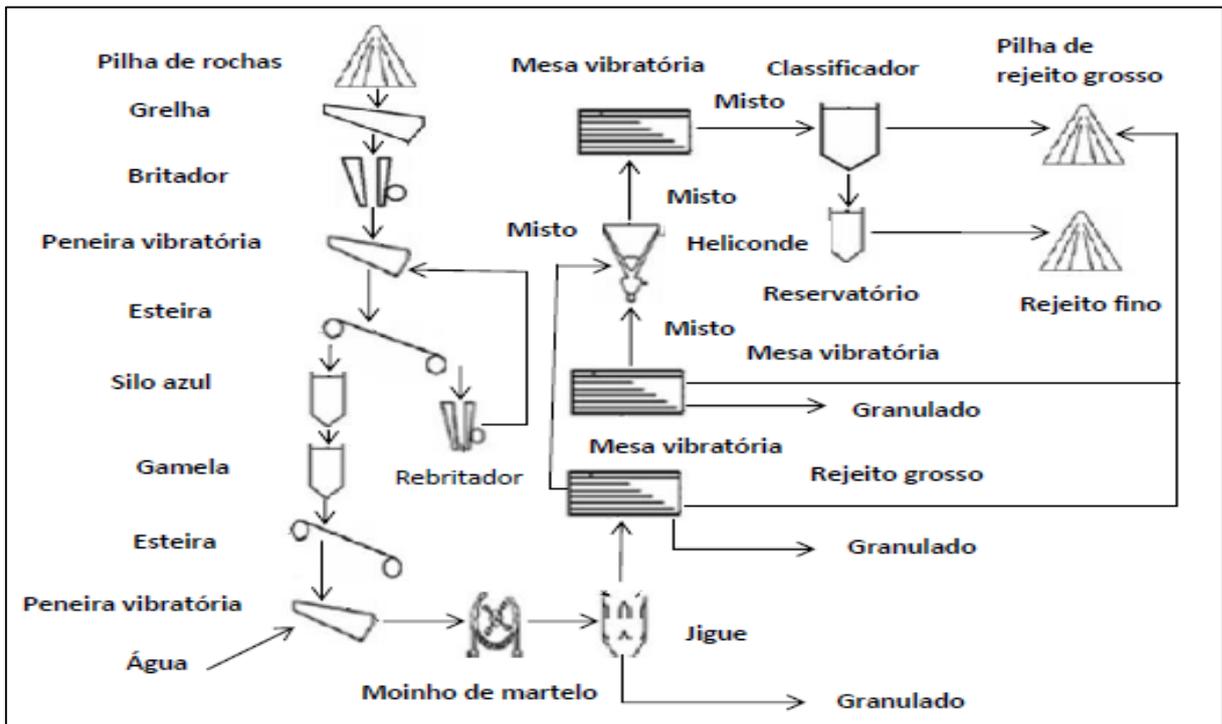
No caso da Mina Brejuí, estão concentradas em seu entorno as atividades de lavra e beneficiamento apenas da scheelita, visando a preparação granulométrica, concentração e purificação do produto de interesse.

Carvalho *et al.* (2002) caracterizando os rejeitos provenientes da usina de beneficiamento da Mina Brejuí, estimou que da produção total, cerca de 80% corresponda ao descarte de rejeito grosso e 20% corresponde ao descarte do rejeito fino sendo disposto no local do antigo lago de lama.

Paiva (2013) detalhando as etapas de lavra e beneficiamento da scheelita na Mina Brejuí, apresenta que são produzidos mais de 50 m³ diários de resíduos durante o

beneficiamento (britagem, moagem, hidratação, peneiramento e concentração). A Figura 2 detalha o processo de beneficiamento da scheelita na mina Brejuí.

Figura 2 – Fluxograma simplificado do beneficiamento da scheelita na Mina Brejuí.



Fonte: Gerab (2014, p.17).

Para efeitos de classificação, segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), o resíduo é classificado como resíduo sólido Classe II, conforme Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação dos resíduos conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004).

Classificação de resíduos	Definição
Classe I – Perigosos	São aqueles que apresentam periculosidade ou uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidades
Classe II – Não perigosos, não inertes	São aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos de classe I ou de classe III, nos termos dessa norma. Os resíduos de classe II podem ter propriedades: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.
Classe III – Não perigosos, inertes	Quaisquer resíduos que, quando amostrados de forma representativa, segundo a NBR 10007 – amostragem de resíduos, e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme teste de solubilização, segundo a NBR 10006 – solubilização de resíduos, não tiver nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, executando-se os padrões de aspectos, cor, turbidez e sabor. Como exemplos desses materiais, têm-se: rochas, tijolos, vidros e certos plásticos e borrachas que não são decompostas prontamente.

Fonte: ABNT (2004, p.3).

2.1.2 Características do resíduo da scheelita

As características físicas dos resíduos estão diretamente ligadas ao processo de beneficiamento ao qual foram submetidos, bem como as características químicas estão fundamentalmente ligadas ao tipo de minério.

Como o mineral da scheelita (CaWO_4) está ligado a uma jazida de calcário, espera-se que o resíduo seja rico em calcita (CaCO_3) que é o principal constituinte mineralógico de depósitos cálcicos como a rocha mãe, bem como a calcários e mármore com elevada pureza, além de elevado teor de sílica (SiO_2). Outros elementos silicáticos em menores proporções podem ser esperados. Segundo Bucher e Grapes (2011) os minerais escarníticos típicos incluem wollastonita, diopsídio, grossulária, zoisita, anortita, escapolita, margarita em escarnitos calcíferos (Ca skarns); hedenbergite, andradita, ilvaita em escarnitos ferro-calcífero (Ca-Fe skarns).

Em geral, é difícil determinar uma curva granulométrica característica para um grande número de resíduos de mineração, sendo muito empregado a ideia de faixas de variações da mesma. Machado (2012), em sua avaliação física do material observou que o resíduo da scheelita apresentou um percentual de aproximadamente 90% de partículas com diâmetro de até 46,65 μm e diâmetro médio de 21,07 μm .

2.2 Requisitos para utilização de materiais como barreira hidráulica

Na construção de revestimentos e cobertura de aterros de resíduos urbanos são normalmente aplicados o mesmo tipo de material, mas que podem ser exigidas diferentes propriedades geotécnicas. Os materiais mais empregados são aqueles que apresentam baixa permeabilidade quando compactados e baixa retração volumétrica, alcançado, por exemplo, pela mistura de solos arenosos e argilosos (Yamusa *et al.*, 2018).

A migração de lixiviado dentro da célula do aterro para a o solo contaminando-o é impedida por *liners* de baixa permeabilidade (Guyonnet *et al.*, 2005, Touze-Foltz *et al.*, 2006). Nesse sentido, a opinião geralmente aceita era de que camadas de argila eram boas barreiras geológicas evitando a migração da poluição para camadas inferiores quando em contato com água livre. No entanto, pesquisas sobre poluição observada nos orifícios de poços subterrâneos mostraram que fraturas naturais e macroporos controlam o fluxo da água e, em alguns casos, isso implica em condutividade hidráulica muito alta (Fredericia e Jørgensen, 1992).

Foged e Baumann (1999) relatam que a aplicação de materiais de alta plasticidade não é a melhor solução para aplicação como barreira impermeável já que essas matérias apresentam elevada retração e mostram um estrutura porosa visível e quebradiça após compactação. Por isso, opta-se por um material que atenda diferentes faixas granulométricas de areia, silte e argila.

Com relação aos requisitos mínimos, explicita-se que não há uma normativa no Brasil que regulamente os parâmetros geotécnicos mínimos que o material deva atender, de modo que a prática nacional utiliza as recomendações baseadas em pesquisas científicas e regulamentos internacionais.

Segundo Shackelford (1997) *apud* Ciríaco Dias (2014), para que uma camada de solo argiloso compactado tenha um bom funcionamento como barreira hidráulica em coberturas de aterros, ou seja, dificultando fluxo de água para dentro do depósito, o ideal é que esta camada tenha uma condutividade hidráulica igual ou inferior a 1×10^{-7} cm/s.

Para Kuokkanen *et al.* (2008) os padrões legais estabelecidos pela União Europeia definem que para barreira hidráulica em subleitos e coberturas de aterros de resíduos, sejam atendidos os seguintes parâmetros:

- a) $\leq 10^{-7}$ m/s para aterro de resíduos não perigosos;
- b) $\leq 10^{-9}$ m/s para aterro de resíduos perigosos.

Para camadas de revestimento de células de acondicionamento (*liners* de fundo) a exigência é ainda maior como pode-se perceber:

[..] uma camada de solo argiloso compactado com coeficiente de permeabilidade saturado de 10^{-9} m/s tem sido a especificação mais frequente utilizada em aterros de resíduos. A Alemanha é mais restritiva, exigindo coeficiente de permeabilidade menor ou igual a 10^{-10} m/s, enquanto que a França aceita como *liner* um terreno natural com espessura mínima de 5 m de solo não saturado com coeficiente de permeabilidade saturado máximo de 10^{-6} m/s para aterros de RSU e 10^{-9} m/s para aterros de resíduos perigosos [...] (BOSCOV, 2008, 126).

Outro exemplo é a recomendação dinamarquesa DS/R466 (1999) para a construção de revestimentos para aterros sanitários que especifica uma espessura de camada de 0,5 m compactada, de preferência em dois turnos com equipamentos de construção pesada, a fim de atingir mais de 95% do Proctor padrão com um teor de água ligeiramente superior do que o teor ótimo. Foged e Baumann (1999) mostraram que em aterros sanitários em que a condutividade hidráulica saturada da camada de revestimento seja de 1×10^{-9} m/s, implica uma retenção do

lixiviado de 70 a 95%. Em casos específicos deve-se projetar barreiras hidráulicas em termos da porcentagem de retenção de lixiviado e não da condutividade hidráulica.

2.3 Sistemas de cobertura para aterros de resíduos

Em qualquer tipo de área destinada a recebimento de resíduos urbanos, uma vez atingida a capacidade útil do aterro de resíduos é indicada a execução de uma série de ações para manutenção ambiental da área, uma delas é a execução de um revestimento impermeável superior, também chamado de cobertura final. Esta camada segundo Bsocov (2008) tem quatro funções principais:

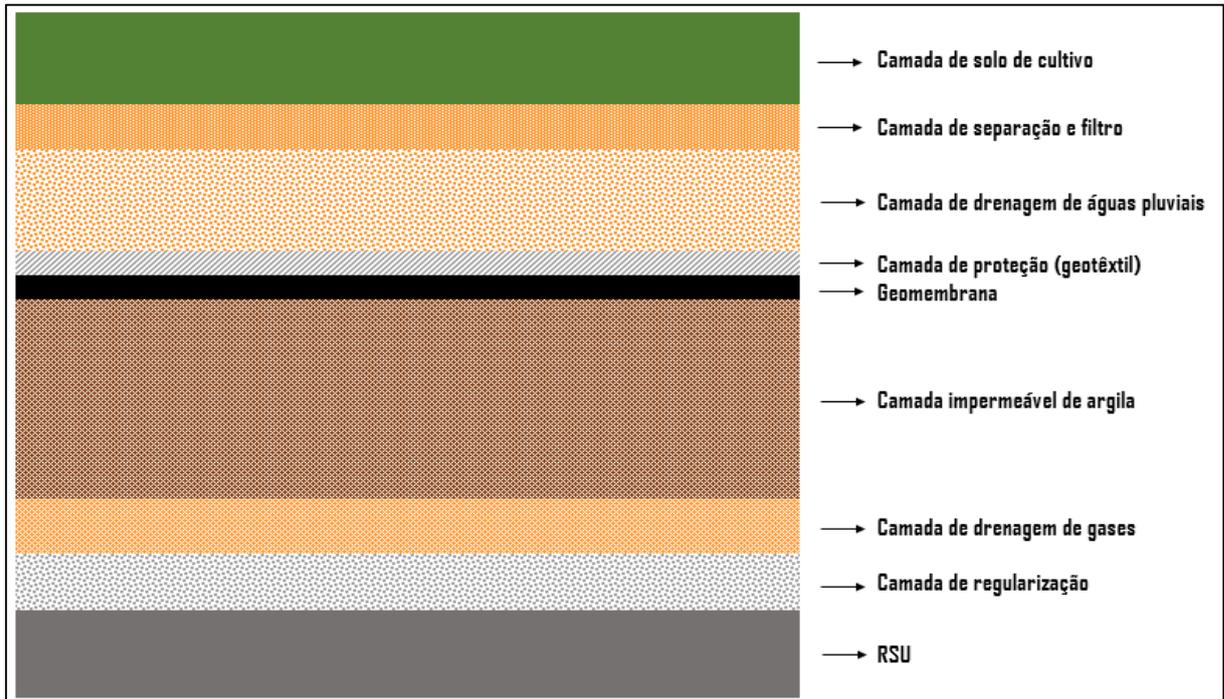
- a) Promover isolamento físico entre os resíduos acumulados e o meio ambiente local;
- b) Controlar a migração de gases entre a superfície e o interior do aterro (entrada de gás oxigênio a partir da superfície e saída de gases de decomposição orgânica do RSU);
- c) Impedir a infiltração de água precipitada para o interior da massa de resíduos produzindo um percolado orgânico (lixiviado); e,
- d) Possibilitar o emprego de revestimentos visualmente agradáveis e ambientalmente aceitáveis.

Várias são as técnicas empregadas para composição da cobertura final, mas normalmente a determinação das camadas que compõe essa cobertura e sua espessura sofre direta influência do tipo de resíduos a cobrir, de aspectos locais como o balanço hídrico e clima, e estabilidade da massa de resíduo. Estas condicionantes têm incentivado frequentemente a utilização de sistemas alternativos, bem como diferentes números e tipos de camadas em relação à cobertura convencional apresentada a seguir.

2.3.1 Cobertura convencional

Hoje, são empregadas diversas metodologias de construção de uma cobertura final, sendo geralmente executadas coberturas de aterros de resíduos compostas pelas seguintes camadas ilustradas na Figura 3.

Figura 3 – Componentes básicos de revestimento impermeável superior.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Nesta composição, a contenção ou atenuação da infiltração é alcançada pela combinação entre a camada argilosa e a geomembrana. As camadas de drenagem controlam o fluxo de fluidos ao qual a barreira hidráulica será exposta e cada uma das demais camadas tem função complementar específica contribuindo no desempenho das camadas já citadas.

2.3.1.1 Camada de solo de cultivo

Sendo esta, a camada mais superficial de todas, uma de suas finalidades é fazer a separação entre o meio ambiente e os demais componentes da cobertura. Normalmente é destinada à revegetação, e para isso são empregados solos naturais que favoreçam o plantio de grama.

A importância da revegetação previne a ocorrência de erosão protegendo as camadas inferiores, reduzindo a perda de material e formação de trincas superficiais. Recomenda-se nesses casos a utilização de um solo rico em nutrientes composto por argila, silte e areia, pois solos de granulometria média têm as melhores características de fixação de raízes, além dos solos de granulometria fina serem normalmente mais férteis.

A espessura desta camada normalmente é determinada de acordo com a seleção de variedade da planta (grama) escolhida, profundidade de suas raízes e capacidade de retenção de

água. Barros (2005) recomenda como valor de referência uma camada de espessura de 150 mm. No entanto, se na camada forem adotados outros tipos de materiais como cascalhos, concreto asfáltico, RCC, entre outros materiais, a espessura pode ser ainda menor.

2.3.1.2 Camada de separação e filtro

A camada de separação e filtração encontra-se imediatamente abaixo da camada de cultivo, normalmente aplicada para proteger as camadas inferiores a ela. Esta camada normalmente evita a perda de finos durante a infiltração entre a camada de solo de cultivo e a camada drenante, e por isso emprega-se uma camada de granulometria intermediária entre elas.

A depender da granulometria da camada superior, a camada de separação e filtração juntamente com a camada de solo de cultivo podem ser combinadas, devendo esta camada única armazenar a água que percola através da camada de superfície.

2.3.1.3 Camada drenante de águas pluviais

A camada drenante de pluviais fica disposta sobre a camada de impermeabilização com o fim de interceptar e desviar a infiltração interna originária das precipitações, reduzindo a carga hidráulica sobre a barreira, dissipando as pressões neutras na massa de resíduos e conferindo maior estabilidade ao aterro. Como a camada deve ser permeável são normalmente aplicados materiais granulares com condutividade hidráulica inferior a 1×10^{-2} cm/s.

Detalhes construtivos são especificados por Koener e Daniel (1997) referendando a execução de espessuras mínimas de 300 mm e seção inclinada (talude) com o mínimo de 3% de inclinação, no fundo da camada. O controle tecnológico do material deve ser rigoroso, evitando que o material contenha detritos que possam causar danos excessivos à geomembrana, nem conter finos que possam obstruir excessivamente ou migrar para dentro da camada e obstruir a área de saída.

Em alguns casos recomenda-se fortemente a instalação de filtros de solo ou geotêxtil superiormente a camada de drenagem, pois a estabilidade do talude depende fundamentalmente de um bom sistema de drenagem.

Em regiões áridas, a necessidade e o projeto de uma camada de drenagem devem ser baseados na frequência e intensidade da precipitação e na capacidade de retenção das outras camadas do sistema de cobertura. Para estes locais pode ser possível a construção de uma camada de superfície e de proteção que absorverá a maioria, se não toda a precipitação que

infiltra nestas camadas, eliminando assim a necessidade da construção de uma camada de drenagem (Barros, 2005).

2.3.1.4 Camada de proteção

A camada de proteção é utilizada normalmente como proteção mecânica da geomembrana, e por isso localiza-se imediatamente acima dela. Devido a esforços solicitantes na superfície e/ou recalques totais e diferenciais na massa de sólidos, é provável haver solicitações desse material a esforços de tração e/ou punção que em contato direto com a geomembrana poderia comprometer a integridade da impermeabilização. Para esse fim, normalmente são empregados geotêxtis, sendo dada a preferência ao geotêxtil não tecido já que este apresenta maior ângulo de atrito na interface entre a geomembrana e o solo.

2.3.1.5 Barreira hidráulica

Esta camada deve impedir com eficiência a passagem de água e gases, reduzindo a permeabilidade a padrões considerados satisfatórios para que não haja exposição excessiva do meio ambiente a elementos tóxicos provenientes do acúmulo de resíduos.

Sistemas de coberturas mais modernos são construídos com revestimentos compostos (geomembrana sobre uma camada de solo de baixa condutividade), podendo ser empregados nesta camada materiais naturais e materiais geossintéticos: geomembranas, *liner* de geocomposto argiloso (GCL) e camada de solo compactado (CCL).

Os produtos geossintéticos têm bastante aceitação, principalmente por se tratarem de um composto industrial com rigoroso padrão de fabricação, proporcionando soluções de baixíssima permeabilidade (inferiores as recomendadas) e baixo coeficiente de difusão. Por outro lado, o despenho deste material ainda está intimamente relacionado com a qualidade de instalação e operação. Problemas com furos, dobras e pregas, ancoragem, estabilidade dimensional e resistência ao cisalhamento ainda são recorrentes a este tipo de produto.

Como normalmente são utilizadas camadas de solos compactados, costume-se empregar materiais argilosos, pois estes normalmente apresentam baixa permeabilidade. Embora seja a solução mais aplicada no contexto brasileiro, cuidados com a formação de trincas e espessura desta camada devem ser cuidadosamente avaliados.

Para a USEPA (1992), o perfil de cobertura final convencional correspondente inclui, no mínimo, uma camada de solo de baixa condutividade coberta por uma geomembrana e uma

camada superficial com vegetação de pelo menos 150 mm de espessura. O componente de condutividade hidráulica saturada considerada como barreira deve ter condutividade hidráulica entre 10^{-5} a 10^{-7} cm/s dependendo das propriedades do revestimento no aterro.

Boscov (2008) defende que embora sistemas compostos por camada de solo compactado e geomembrana limitem significativamente a percolação de água, há nestes casos um custo adicional além do problema de baixa resistência na interface solo-membrana. O autor também defende que embora os geocompostos apresentem baixa permeabilidade, estes devem ser completamente hidratados para que apresentem a eficiência esperada.

Como a resistência de *liners* é dominada pela resistência não drenada e apresentam melhor compactação na umidade ótima, a melhor alternativa para um *liner* com elevado teor de argila é a compactação em alto nível de energia, correspondente à energia Proctor modificada (Foged e Baumann, 1999).

2.3.1.6 Camada drenante de gases

A camada drenante de gases está disposta sob a camada de impermeabilização e tem função de direcionar os gases formados pela massa de RSU, evitando seu aprisionamento ou dispersão na atmosfera.

Embora seja normalmente empregada uma camada padronizada sem estudo prévio detalhado, Maciel e Jucá (2011) mostra que muitos projetos superestimam a quantidade de gás existente nos aterros, levando a previsões imprecisas e prevendo maus resultados econômicos. O clima local, a composição dos RSU e as características da camada de cobertura final precisam ser considerados nos projetos brasileiros, já que nossas condições são bastante diferentes das condições dos países desenvolvidos.

2.3.1.7 Camada de regularização

A camada de regularização fica disposta imediatamente sobre os resíduos e é importante para prover a regularidade da superfície, além de garantir aderência para recebimento das camadas subsequentes.

Nesta camada podem ser empregados vários tipos de solos, e normalmente é dada a preferência a solos menos nobres devido a sua finalidade. Porém quando é executada essa camada, usa-se solos granulares com espessura superior a 300 mm. Essa poderá também atuar como camada coletora de gás.

2.3.2 Coberturas alternativas

Nem sempre todas as camadas são necessárias em todos os tipos de cobertura, sendo possível suprimir e/ou combinar algumas delas. De modo que, tem-se verificado que a camada de superfície pode ser combinada com a camada de proteção. Da mesma forma, a camada de coleta de gás é frequentemente combinada com a camada de base. Vale ressaltar que para a construção dessas camadas, além dos solos naturais, podem ser utilizados também os materiais geossintéticos (Koerner e Daniel, 1997).

Apesar da prevalência de coberturas compostas por geomembranas e CCL, em muitos casos, as condições hidrogeológicas não são devidamente consideradas. Neste sentido, é possível inferir que dependendo das condições ambientais exista uma superestima quanto a esta tipologia selecionada, podendo ser consideradas outras alternativas mais naturais e efetivas.

Benson *et al.* (2003) incentiva que o projeto de coberturas de aterros de resíduos tenda equilibrar a capacidade que solos finamente texturizados têm de armazenar a precipitação infiltrada, considerando também a capacidade das plantas e da atmosfera para remover esta água armazenada por processos de evapotranspiração.

As pesquisas de Albright *et al.* (2013) descreveram o balanço hídrico de coberturas de aterros sanitários em sete (07) distintas localidades dos Estados Unidos. Entre elas, as condições apresentadas para os climas variaram de frio e úmido e de quente a árido. Nestes casos, eles observaram que a percolação correspondia apenas a um alto armazenamento de água no solo na camada superficial e ao fluxo lateral na camada de drenagem sobre a geomembrana. Pouca percolação (<1 mm/ano) foi observada quando a precipitação anual foi menor que 400 mm/ano. Para maiores taxas anuais de precipitação, a taxa de percolação aumentou aproximadamente de maneira linear com aumento da precipitação anual.

As pesquisas de Blight e Fourie (1999) *apud* Barros (2005) evidenciam pesquisas em dois aterros sanitários em regiões semi-áridas, uma em Joanesburgo (África do Sul) e outra em Regina (Canadá) que mostraram que o balanço hídrico nessas áreas foram deficitários e contribuíram para a baixa percolação na cobertura.

Portanto, em regiões de clima árido ou semi-árido em que há condições hidrogeológicas e climáticas favoráveis com nível d'água profundo, baixa pluviometria e elevada incidência de vento, podem ser aplicáveis diferentes tipos de cobertura para aterros de resíduos, sendo os seguintes tipos de cobertura alternativas mais aplicadas:

- a) Coberturas monolíticas ou evapotranspirativas;
- b) Barreiras capilares;

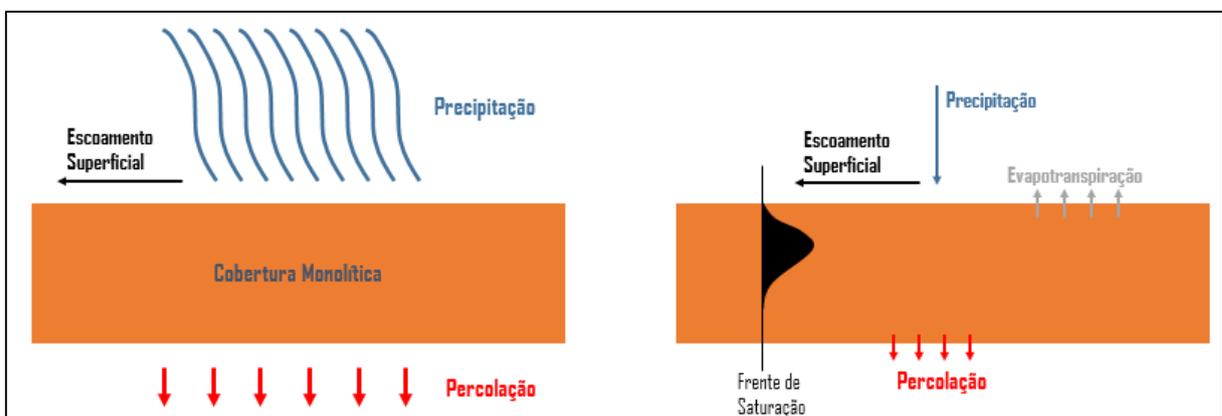
- c) Geomembranas expostas;
- d) Coberturas de resíduo de papel.

Em relação a realidade nacional, o tipo de cobertura mais comum nos aterros brasileiros é uma cobertura monolítica compactada do solo com vegetação superficial. Entretanto, na maioria dos locais de despejo aberto, não existe sequer um sistema de cobertura para minimizar poluição ambiental. Desse modo, a composição do RSU e as características geotécnicas da camada final de cobertura são muito diferentes das dos aterros de outros países desenvolvidos (Maciel e Jucá, 2011).

2.3.2.1 Coberturas monolíticas e evapotranspirativas

Este tipo de cobertura se caracteriza por serem compostas por uma única camada de solo de alta capacidade de armazenamento de água em seu interior, sendo normalmente utilizada uma camada de solo argiloso compactado. Seu princípio de funcionamento está baseado na retenção da água (espécie de efeito esponja) durante a precipitação seguido da perda de água por processos de evapotranspiração. Por isso, cuidados especiais são dados a espessura da camada a ser empregada, pois ela dependerá tanto da espessura da camada quanto da porosidade do material empregado, do tipo de vegetação empregado na superfície, além da profundidade das raízes. Nesta tipologia o balanço hídrico local deve favorecer a manutenção da eficiência da cobertura monolítica e limitar a quantidade de água infiltrada pela camada que pode chegar até a massa de sólidos produzindo lixiviado. A Figura 4 esquematiza os fluxos de água sobre uma cobertura monolítica.

Figura 4 – Componentes básicos de revestimento impermeável superior.



Fonte: Adaptado de Boscov (2008, p.196).

Para os casos de uma baixa intensidade de precipitação ou momentos iniciais de um precipitação pronunciada, a água precipitada tende a infiltrar no solo criando uma frente de umedecimento até o momento em que a taxa de precipitação seja superior a capacidade de infiltração da superfície da camada, momento em que observam-se escoamentos superficiais.

Segundo a classificação de Koerner e Daniel (1997) esta cobertura pode ser considerada como de máxima percolação, e a espessura adotada para esta cobertura não deve ser espessa a ponto de comprometer a estabilidade do aterro de resíduos.

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos propõe os valores máximos aceitáveis para a percolação em coberturas para RSU em função do tipo de cobertura prescritiva e do clima local, em que recomenda para regiões de clima úmido uma percolação menor ou igual a 30 mm/ano quando a camada de cobertura é uma camada de solo compactado e de 3 mm/ano quando é aplicada uma cobertura com sistema composto (solo compactado e geomembrana). Para regiões de clima árido, os valores recomendados são de 10 mm/ano para camadas monolíticas e os mesmos 3 mm/ano para sistemas compostos.

2.3.2.2 *Barreiras capilares*

Nesta cobertura são empregados dois tipos de camadas com diferentes granulometrias entre elas, sendo um solo mais fino na camada superior seguido de um solo mais grosso na camada inferior. Esta disposição de solos faz com que a água que infiltra pelo solo mais superficial tenda a aumentar o grau de saturação ao longo da espessura da camada de solo através do efeito da gravidade, formando uma frente de saturação.

Neste contexto, quando a água infiltrada atinge justamente a interface entre os dois tipos de solo, mesmo que o solo mais grosso esteja mais seco, a sucção do solo superior ainda é maior que do solo inferior e apenas uma fração da água é transmitida para o material subjacente. Isto ocorre porque os poros do solo inferior são muito maiores, de modo que a sucção residual decorrente do ar retido nos poros mais finos do solo da camada superior seja maior que a sucção do solo granular com menor grau de saturação (Boscov, 2008).

Neste arranjo, as condições não saturadas e a adequação ao clima são requisitos fundamentais para eficiência da barreira, atenção especial deve ser dada para definição da camada de granulometria mais grossa, devendo esta camada funcionar como filtro da camada superior, evitando a ocorrência de *piping* (Boscov, 2008).

2.3.2.3 Geomembranas expostas

A utilização de geomembranas expostas é uma alternativa bastante vantajosa sob o ponto de vista de eliminação de custo com execução de outras camadas de terra, redução de volume de material empregado, elevação da vida útil do aterro, sem contar na eficiência na retenção de água, além do baixo custo de manutenção. Por outro lado, este é o tipo de cobertura mais vulnerável sob o aspecto de degradação do material e de impacto ambiental (Bosco, 2008).

Como são comumente empregados materiais geossintéticos, cuidados preventivos de instalação (tensionamento, solda, ancoragem, puncionamento, etc.), manutenção, fluência, exposição à radiação solar e efeito do vento podem comprometer sensivelmente a eficiência do material, sem contar no aspecto visual, pois é esteticamente desagradável.

2.3.2.4 Coberturas com resíduos de papel

A quantidade de geração de resíduos em fábricas de papel, aliadas às características físico-químicas desse material tem apresentado enorme aplicabilidade para emprego na construção de coberturas de aterros sanitários. Os Estados Unidos, mas principalmente o Canadá, têm desenvolvido experiências bem sucedidas deste tipo de aplicação. Nesse tipo de resíduo existe a presença importante de fibras orgânicas e minerais inorgânicos que resultam em camadas flexíveis, adequadas aos elevados recalques diferenciais a que estão sujeitas as coberturas de aterros de resíduos (Bosco, 2008).

Vale salientar que neste tipo de cobertura, devido à utilização de um material diferenciado em relação aos materiais geotécnicos convencionais, é importante avaliar a possibilidade de biodegradação e parâmetros hidromecânicos do material (Kuokkanen *et al.*, 2008).

Kuokkanen *et al.* (2008) em seu estudo utilizando lodo de uma fábrica de papel na Finlândia, observou uma condutividade hidráulica $4,4 \times 10^{-10}$ m/s, a uma tensão confinante de 30 kPa. Estes valores satisfazem os valores geralmente exigidos entre $1,0 \times 10^{-7}$ m/s e $1,0 \times 10^{-9}$ m/s para uma barreira hidráulica na cobertura em aterros sanitários na União Europeia.

2.4 Camada de solos compactados

Nos sistemas de cobertura em que são utilizadas geomembranas, o CCL tem a função de ser uma segunda barreira impermeabilizante e servir de suporte para o material geossintético, proporcionando uma superfície lisa e resistente. A prática tem mostrado que mesmo nestes casos, a utilização da camada de solo compactado é fundamental para a eficiência do sistema como um todo. Mesmo a indiscutível qualidade do material industrial no que tange à permeabilidade, esse pode ter sua eficiência comprometida quando exposto a recalques diferenciais ou ao gás originário do processo de digestão de matéria orgânica presente na massa de resíduos.

Neste sentido recalques diferenciais, tão susceptíveis em aterros de resíduos, podem promover rasgos por tração na geomembrana. E a exposição aos gases orgânicos do material pode pronunciar efeitos de degradação química no material. Segundo Boscov (2008), os requisitos da camada de solo compactado são: baixa permeabilidade, compatibilidade química a longo prazo com os poluentes, alta capacidade de retenção de poluentes, baixo coeficiente de difusão, alta capacidade de suporte e baixa compressibilidade.

Como em diferentes sistemas de cobertura superficial (cobertura convencional e monolítica), a camada de solo compactado deve garantir alta qualidade do material como barreira hidráulica, e este requisito é normalmente alcançado com a utilização de materiais argilosos compactados em que a energia de compactação e a macroestrutura do solo tem influência direta na permeabilidade alcançada.

O nível de compactação de qualquer revestimento mecanicamente compactado influencia diretamente na sua capacidade de restringir a percolação de água ou lixiviado. Por isso, sua eficiência depende do tamanho das partículas, índice de vazios, superfície específica, grau de saturação e propriedades do fluido (Vuković e Soro, 1992; Foged e Baumann, 1999). Adicionalmente vários são os fatores a monitorar em coberturas com baixa permeabilidade, pois o emprego desse tipo de material está sujeito a um grande número de solicitações externas fazendo com que haja uma perda de eficiência ao longo do tempo. Neste contexto ressalta-se que a formação de trincas e os processos erosivos são os principais mecanismos que influenciam no aumento de permeabilidade do solo compactados.

As trincas podem ser consequência de variações de temperatura, ciclos de molhagem e secagem, penetração de raízes, recalques diferenciais e totais na massa interna de resíduos, além da erosão por ação do vento ou água. Essas trincas quando dispersas espacialmente sobre a cobertura elevam a vazão que atravessa um solo. Embora seja possível controlar a condição

do revestimento mais superficial por ações rotineiras de recomposição periódica do material. A depender do grau de controle e da espessura da camada compactada, os problemas relativos à erosão interna são danosos, não sendo suficientes os trabalhos de manutenção, quando são usados na cobertura, finos pouco plásticos.

Quando o material compactado apresenta alta plasticidade, as variações volumétricas (contração/expansão) relacionadas à plasticidade devem ser monitoradas. Uma solução simples pode ser uso do solo em associação com materiais alternativos (por exemplo, compósitos).

Os argilominerais mais plásticos quando compactados normalmente estão mais susceptíveis a formação de trincas em ciclos de molhagem e secagem devido a suas características de ligações eletroquímicas (Boscov, 2008).

2.4.1 Seleção de materiais para camada de solo compactado

A seleção de materiais empregados em camadas de solo compactado deve ser pautada no estudo do material de acordo com a geologia local, prática construtiva a ser empregada, disponibilidade de jazidas próximas e homogeneidade do material.

Usualmente vem sendo bastante aplicada uma metodologia baseada na porcentagem de argila ou finos, no limite de liquidez e índice de plasticidade e na condutividade hidráulica medida em laboratório, além do teor de umidade. A Tabela 1 exemplifica os requisitos para um material poder ser utilizado na impermeabilização de aterro de resíduos.

Tabela 1 – Requisitos mínimos para o solos de impermeabilização.

Fonte	LL (%)	IP (%)	d≤0,075mm (%)	d≤0,002mm (%)	0,075<d≤4,8 mm (%)	d>4,8mm (%)	k (m/s)
Omafra (2003)	30≤LL≤60	11≤IP≤30	≥ 50	≥ 20	≤ 45	≤ 50	≤10 ⁻⁹
EPA (1989)	-	≥ 10	≥ 20	-	-	≤ 10	≤10 ⁻⁹
Cetesb (1993)	≥ 30	≥ 15	≥ 30	-	-	-	≤10 ⁻⁹

Fonte: Ferrari (2005) *apud* Boscov (2008, p.144).

Tais especificações de distribuição granulométrica e limites de consistência embora sirvam de orientação não garantem uma condutividade abaixo da desejada. Portanto, a especificação dos materiais geotécnicos aplicáveis deve também ser fundamentada no comportamento mineralógico dos mesmos. A realidade brasileira tem mostrado que mais novas proposições baseadas em nossos solos são necessárias, pois é possível encontrar alguns tipos

de solos lateríticos que estão fora dos limites de consistência e granulometria apresentados mas são materiais tecnicamente viáveis.

Para Yamusa *et al.* (2018), normalmente são aplicadas espessas camadas mistura de solos arenosos e argilosos como barreira em coberturas convencionais ou alternativas, pois estes a depender da porcentagem de cada material, atingirão os preceitos de baixa permeabilidade quando compactados e baixa retração volumétrica antes estabelecidos. Porém, soluções alternativas com misturas de bentonita e solos com frações de areias podem ser aplicáveis, pois a premissa é que a fração de areia na mistura controle o encolhimento, enquanto que a fração de bentonita controle permeabilidade.

Neste sentido não só a Bentonita é utilizada como material de mistura, muitos outros tipos de finos vêm sendo sistematicamente aplicados em coberturas como por exemplo RCC (Ciríaco Dias, 2014; Barros, 2005); lodo de ETE (Benson *et al.* 1993); reciclado de materiais (Hermsmeyer *et al.*, 2002); entre outros.

2.5 Análise sistemática dos tipos de cobertura

Com a análise das diversas configurações de coberturas, é possível inferir que pode-se empregar um número razoável de camadas em diferentes arranjos e materiais constituintes, tanto para o caso de coberturas convencionais como alternativas. Mesmo assim, o objetivo principal de qualquer tipologia de cobertura é impedir a entrada da água da chuva no material confinado, o escape de gases para a atmosfera e, o acesso de seres vivos e o contato com águas subterrâneas (Bosco, 2008). Desta forma, podemos sistematizar as seguintes afirmações:

- a) As diferentes características de camadas selecionadas para uma cobertura cumprem funções específicas, mas a depender das necessidades locais determinadas camadas podem se rearranjadas ou suprimidas.
- b) A permeabilidade abaixo de 10^{-7} m/s é o requisito geotécnico primordial para um *liner* ser considerado como barreira hidráulica na cobertura.
- c) As espessuras de todas as camadas ditas complementares (solo superficial, separação, proteção e regularização) são normalmente determinadas pelos requisitos construtivos ou empíricos.
- d) As espessuras das camadas de drenagem e barreira devem ser devidamente projetadas, embora seja corriqueiramente praticada uma padronização das mesmas.
- e) Os fenômenos de erosão são efeitos danosos para a manutenção da integridade da cobertura, devendo este ser monitorado e minimizado quando necessário.

- f) Um mesmo tipo de material geotécnico pode ser empregado em diferentes camadas com funções distintas. A escolha de cada um deve ser embasada em suas características geotécnicas e mineralógicas.
- g) Solos granulares são normalmente utilizados quando se deseja camadas mais permeáveis, mais resistentes e em regularização de superfícies.
- h) Solos argilosos são os mais comumente empregados como barreira hidráulica.
- i) Outros tipos de frações de finos não argilosos podem ser incorporados para a mesma finalidade da CCL.
- j) A utilização de geomembranas não exclui a necessidade de uma camada de solo compactado.
- k) A utilização de geocompostos não substitui a aplicação da camada de solo compactado.

2.6 Condutividade hidráulica

Pode-se definir como condutividade a taxa de infiltração de um fluido no solo, expressando a facilidade ou dificuldade com que esse percola em seus poros a partir da existência de um gradiente hidráulico proporcionado por um determinado regime de precipitação, desnível geométrico ou lâmina d'água em sua superfície. A existência da percolação da água através dos vazios do solo está condicionada à diferença de pressão (carga hidráulica) durante a trajetória do fluxo. A velocidade com que essa massa fluida é transmitida de um ponto a outro do solo é denominado coeficiente de condutividade hidráulica, ou coeficiente de permeabilidade.

Os solos podem ser divididos em permeáveis ou com drenagem livre ($k > 10^{-3}$ m/s) e impermeáveis ou com drenagem impedida. Na Tabela 2 apresentam-se exemplos de valores de permeabilidade dos solos.

Tabela 2 – Valores de condutividade hidráulica dos solos.

Solos	Grau de permeabilidade	Tipos de solos	k (cm/s)
Permeáveis	Alta	Pedregulho	$> 10^{-1}$
	Média	Areias	10^{-1} a 10^{-3}
	Baixa	Siltes e Argilas	10^{-3} a 10^{-5}
Impermeáveis	Muito baixa	Argilas	10^{-5} a 10^{-7}
	Baixíssima	Argilas	$< 10^{-7}$

Fonte: Vargos *apud* Costa (2016, p.8).

Neste sentido, a percolação pode acontecer em condições do solo saturado, quando os poros do solo encontram-se cheios de água durante a percolação, ou em condição não saturada, quando apenas parte dos poros estão preenchidos havendo relativo volume de ar aprisionado em seu interior.

2.6.1 Condutividade hidráulica em solos saturados

O escoamento de água em um solo saturado é governado pela Lei de Darcy, de modo que o fluxo de água aconteça na direção do gradiente hidráulico. Esta formulação tem validade para escoamentos do tipo laminar, em que as trajetórias das partículas d'água não se cortam.

A equação diferencial de fluxo é a base de cálculo da percolação tridimensional, em que assumindo a validade da lei de Darcy para um solo homogêneo, o solo e a água são incompressíveis. Então a Equação [01] representa a formulação matemática para o fluxo em solos saturados:

$$k_x \cdot \frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + k_y \cdot \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} + k_z \cdot \frac{\delta^2 h}{\delta z^2} = \frac{1}{e+1} \cdot \left(e \cdot \frac{\delta s}{\delta t} + S \cdot \frac{\delta e}{\delta t} \right) \quad [01]$$

Em que:

k_j : permeabilidade na direção j ;

h : carga hidráulica total;

S : grau de saturação;

e : índice de vazios;

t : tempo.

2.6.2 Condutividade hidráulica em solos não saturados

Para a condição não saturada do solo, o fluxo é governado pela equação de Richards, esta última é uma combinação da Lei de Darcy e as equações diferenciais de continuidade. A equação de Richards é resolvida numericamente pelo Método de Elementos Finitos. A Equação 02 representa a formulação matemática para o fluxo em solos não saturados

$$\frac{\delta \theta}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} \left(k_x \frac{\delta \psi}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(k_y \frac{\delta \psi}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(k_z \frac{\delta \psi}{\delta z} \right) + \frac{\delta k_z}{\delta z} \quad [02]$$

Em que:

θ : umidade volumétrica;

ψ : sucção total (carga hidráulica);

x, y, z : direções no espaço;

k_x, k_y, k_z : condutividade hidráulica na direção indicada;

t : tempo.

De maneira geral, a condutividade hidráulica saturada representa o limite para a taxa de infiltração quando ocorre a estabilização do fluxo. No início da precipitação, a infiltração é influenciada pelo gradiente hidráulico, que pode ocasionar taxas de infiltração superiores à condutividade hidráulica saturada, como reportado por Ng e Shi (1998) *apud* Santos (2004).

Alguns fatores executivos como a natureza da camada vegetal do solo e a geometria da cobertura influenciam nas condições de infiltração, alterando o comportamento e magnitude do escoamento superficial.

2.6.3 Fatores que influenciam a condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica de um material tende a ser influenciada por variáveis que podem ser classificadas como mecânicas ou físico-químicas, tais como: microestrutura do material, a forma dos grãos, rugosidade da superfície dos grãos e mineralogia (Çellek, 2019, Zięba, 2017, Cabalar e Akbulut, 2016, Heineck *et al.*, 2010). Por isso, para qualquer que seja o material, as condições de compactação, o confinamento, o teor de água, mas principalmente a energia de compactação condicionarão a percolação em um material (Daniel e Benson, 1990, Mitchell *et al.*, 1965). Neste sentido, percebe-se nestas variáveis a ação de diferentes fatores, principalmente relativos as condições morfológicas e mineralógicos. Esses vêm sendo estudados no intuito de relacionar sua influência à condutividade hidráulica dos materiais.

Para Fuentes *et al.* (2018) e Sivapullaiah *et al.* (2000), em geral, a condutividade hidráulica depende muito do conteúdo de finos, sendo que o aumento do teor de partículas finas tende a diminuir a condutividade hidráulica. Por outro, Boscov (2008) defende que a estrutura é um dos fatores de maior importância no valor da condutividade hidráulica.

De maneira genérica, cada aspecto citado não age isoladamente sobre a condutividade hidráulica se inter-relacionando uns com os outros em um cenário de causa e consequência. Portanto, fica evidente e esperado, por exemplo, que um aumento na quantidade de finos alterará a o tecido estrutural (estrutura) do solo, afetando assim o índice de vazios, quantidade

de macro e microporoso, etc. Assim também, as variáveis de caráter mecânico se correlacionam diretamente com as variáveis físicas.

Pode-se dizer também que a morfologia não se relaciona unicamente com o tecido estrutural. A formação mineral do material também exerce influência morfológica e por isso é controlada pelas partículas finas (Yamusa *et al.*, 2018). Pesquisas indicam que a depender dos minerais que compõe a amostra, a mineralogia exerce relevante influência sendo o indicador mais eficaz do comportamento hidráulico, como no caso de amostras consideradas bastante sensíveis (Benson *et al.*, 2018). Para o caso das argilas o comportamento químico, condiciona as condições físicas relativas a permeabilidade. Significa dizer que a natureza físico-química das partículas de argila e os fenômenos capilares têm influência direta na estrutura do solo, reforçando uma maior interação entre os grãos e a água.

Para Mesri e Olson (1971), as variáveis mecânicas de interesse principal quando trata-se de argilas são o tamanho, a forma e o arranjo geométrico das partículas. Ele observou que a redução do coeficiente de permeabilidade para índices de vazios constantes em diferentes argilominerías (da caulinita para ilita e esmectita), é em grande parte resultado de uma redução no tamanho dos canais de fluxo individuais e um aumento na tortuosidade dos caminhos de fluxo.

Fica evidente que conforme o arranjo das partículas possibilite a formação de macro e microporos, estes se comportarão como canalículos e facilitarão a percolação de água. Por este motivo a permeabilidade em areias e argilas deve ter seu entendimento particularizado. Nas areias as condições mecânicas e físicas ganham destaque impulsionados pela granulometria natural desse tipo de partículas e forma dos grãos. Nas areias a razão entre a área de contato grão a grão comparada com a superfície total do grão é bastante baixa, e este fator tende a dominar a permeabilidade nas areias.

Os argilominerais são minerais secundários com tamanho de partículas extremamente menores que as das areias, pertencentes à família dos filossilicatos com estrutura em folhas podendo conter elementos alcalinos de sódio, potássio, cálcio e magnésio. Os principais grupos de argilominerais são as caulinitas, esmectitas e ilitas.

A caulinita apresenta carga elétrica negativa e em comparação com as esmectitas e ilitas apresenta menor capacidade de retenção de água, sem apresentar quase nenhuma expansividade. As esmectitas montmorilonitas por outro lado são extremamente plásticas, com elevado poder de retenção de água e bastante expansíveis. E as ilitas têm um comportamento intermediário em que são medianamente expansíveis e retém mais água que as caulinitas.

Pelo citado neste item, percebe-se que a previsibilidade da condutividade para determinado tipo de solo sempre estará incompleta, pois é impossível particularizar em formulações matemáticas todos os aspectos que influenciam a condutividade hidráulica de um solo.

Outra questão importante é quanto ao tipo material utilizado, se solo ou qualquer outro material. Os processos de intemperismo e formação de solos condizionarão seu comportamento geológico e geotécnico. Materiais advindo de processamentos industriais ou beneficiamento prévio apresentam componentes minerais e propriedades físicas intrínsecas aos processos aos quais foi submetido, portanto seu comportamento pode diferenciar-se do normalmente esperado para um solo.

2.6.3.1 Índice de vazios

O tamanho e a disposição dos vazios presentes entre as partículas de solo tende a influenciar o caminho da percolação com maior ou menor facilidade. Esta variável é mais representativa quando comparamos materiais de mesma granulometria, significando dizer que quanto maior for o índice de vazios de um solo, criam-se maiores canais de percolação, diminuindo a resistência à passagem do fluido, aumentando o volume percolado.

É interessante refletir que não necessariamente um maior valor de índice de vazios condicionará uma maior permeabilidade ao material. A forma, quantidade e tamanhos dos vazios determinarão diferentes condições de permeabilidade. Por isso, é possível encontrar materiais que embora possuam índices de vazios geralmente superiores a outros, estes podem apresentar menores valores de condutividade hidráulica.

2.6.3.2 Grau de saturação

Em se tratando de solos naturais, o grau de saturação influencia na permeabilidade, pois ele determinará as quantidades de ar no interior do material. Em materiais não saturados normalmente se tem um aprisionamento de ar, que mesmo durante frentes de saturação, esse ar aprisionado não é completamente removido, implicando a formação de pequenos bolsões contidos pela tensão superficial da água. Neste sentido a permeabilidade em solos não saturados tende a ser menor que na sua condição saturada, pois essas bolhas de ar tendem a criar bloqueios e resistência aos canais de percolação.

Conforme Boscov (2008), a permeabilidade de solo compactado para uma dada energia de compactação varia em função do teor de umidade, de modo que no ramo seco a permeabilidade diminui significativamente, e praticamente não varia para teores de umidade no ramo úmido.

Nas areias a ligação entre partículas é bem menos atuante, podendo ser desconsiderada. Por isso, no caso de areias a experiência mostra que o teor de umidade é, em regra, mais reduzido. E em se tratando de areias puras, estas são poucos sensíveis ao teor de umidade sendo preponderantes os processos vibratórios na compactação.

2.6.3.3 Textura e forma das partículas

Sabe-se que a forma do grão influencia em determinadas propriedades geotécnicas do solo (Terzaghi 1925; Gilboy 1928; Olson e Mesri 1970; Clayton et al. 2009). Ela pode criar trajetórias diferenciais de fluxo que influenciam diretamente a permeabilidade (Cedergen, 1989). Grãos mais arredondados tendem a diminuir o comprimento das trajetórias e oferecer menor resistência ao fluxo. Por outro lado, as partículas mais alongadas e irregulares criam trajetórias mais longas e tortuosas, diminuindo a permeabilidade do solo.

Calabar e Akbulut (2016) evidencia tal fato em seu estudo utilizando dois tipos de areias, uma mais arredondada e outra mais angular, em dezesseis gradações diferentes observando que a condutividade hidráulica nas amostras de grãos arredondados foram sempre superiores aos das amostras com grãos muito angulares, o que provavelmente é o resultado de características de forma que levam a diferentes proporções de vazios.

A textura têm efeitos sobre a resistência por atrito do fluxo, de modo que partículas mais ásperas apresentam maior resistência por atrito ao fluxo do que partículas de superfície lisa. Diferentes associações de partículas são criadas durante a compactação gerando estrutura floculada ou dispersa, sendo fator de importância na condutividade hidráulica do solo (Mitchell *et al.*, 1965).

2.6.3.4 Temperatura e fluido percolante

A condutividade hidráulica do solo se verá afetada pela variação de temperatura, pois está influi diretamente na viscosidade do líquido permeante propondo uma maior ou menor dificuldade ou passagem do fluido a depender da temperatura. Com água, a condutividade

hidráulica varia aproximadamente 3% para cada 1°C de mudança na temperatura (Heineck, 2002).

A percolação pode também ser feita por diferentes fluidos (água destilada, água mineralizada, lixividado, etc.) que apresentam diferentes padrões de viscosidade cinemática influenciando a percolação no material. Francisca e Glatstein (2010) mostram que amostras compactadas e percoladas por soluções nutritivas (adição de minerais) durante um tempo superior a 15 meses apresentou reduções notáveis de condutividade hidráulica quando comparadas as amostras compactadas e permeadas com água destilada, que não sofreram alteração com o tempo. Por fim, quando as amostras foram percoladas por um lixividado orgânico, o escoamento do fluido através amostra foi significativamente reduzida devido ao crescimento de microrganismos dentro dos poros.

2.6.3.5 Tecido estrutural

A estrutura formada pela disposição relativa das partículas é fundamental para a facilidade de percolação. A estrutura determinada pelo arranjo das partículas na massa de solo tende a determinar a quantidade e dimensões dos macroporos e microporos. Em via de regra, estruturas bem dispersas tendem a apresentar menor permeabilidade que estruturas floculadas, assim como solos mais compactados tendem a ser menos permeáveis que solos naturais.

Para a classificação dos poros pelo diâmetro equivalente do poro (d_{eq}), a metodologia mais aplicada é proposta por Brewer (1964) que classifica os poros como: macroporos ($> 74 \mu\text{m}$), mesoporos (74 a $30 \mu\text{m}$), microporos (30 a $6 \mu\text{m}$), ultramicroporos (6 a $0.1 \mu\text{m}$), criptoporos ($< 0.1 \mu\text{m}$).

Neste sentido, a quantidade de finos (partículas inferiores a 0,2 mm) e forma com que eles se interconectam definirão tanto a quantidade quanto a classe de poros existentes. Grãos simples de areia tendem, mesmo que sua agregação seja bem compacta, a formar estruturas granulares principalmente macroporosas. A medida que sejam incorporados finos a esta estrutura ela tende a conformar novos tecidos estruturais em que os finos tenderão a preencher os vazios e diminuem a classe dos poros. Quando a existência de finos é dominante, estes podem definir classes de poros ainda menores baseado na forma com que as partículas se interconectam definindo um ambiente de percolação com maior tortuosidade e maior resistência ao fluxo. Nesse sentido, a condutividade hidráulica pareceria estar mais dependente da quantidade e tamanho dos macroporos, já que os efeitos dos microporos são mais limitados se comparados àqueles (Cuisinier et al., 2011).

A permeabilidade durante o processo de compactação também pode ser explicada através da estrutura resultante do solo após compactação. Os melhores níveis de compactação são obtidos na umidade ótima, sendo a permeabilidade variável de acordo com o teor de umidade da compactação. A proposta de Lambe (1958), em que a permeabilidade de um solo compactado com umidade no ramo seco produz uma estrutura mais floclulada é bem aceita, pois a orientação das partículas de argila neste caso é aleatória. Com isso, os caminhos de percolação são mais curtos e a permeabilidade é maior. Quando a compactação acontece no ramo ótimo ou úmido a tendência é que a permeabilidade varie pouco, pois as partículas se encontrariam em um arranjo mais paralelo com estrutura dispersa.

Mitchell e Soga (2005), mostram que amostras compactadas com umidade um pouco superior ao ideal e, conseqüentemente esperaram-se estruturas dispersas, a condutividade hidráulica medida alcança seu menor valor possível, assumindo que não há mudanças na energia e método de compactação.

A mineralogia está intimamente ligada com o arranjo estrutural de um solo, logo com a morfologia de seus poros. Para o caso de argilominerais, em que suas partículas apresentam formato de placas, quando sua agregação é bem dispersa, elas tendem a formar estruturas do tipo massiva em que se formam microcanais de percolação com trajetórias longas e bastante tortuosas. Por outro lado, grãos simples de areia tendem, mesmo que sua agregação seja bem compacta, a formar estruturas granulares em que a permeabilidade tende a superar a das argilas.

2.6.3.6 Composição mineralógica

Em solos finos a composição mineralógica tem grande relevância no comportamento quanto a permeabilidade do solo. A estrutura eletroquímica da superfície dos finos e a adsorção de micropartículas de água formando uma película envoltória, controlam a tendência de argilas em se dispersar ou formar agregados. A agregação reforçada pelas forças de atração interpartículas leva à existência de inúmeros microcanais através dos quais a tendência de fluxo é baixa, e poucos canais relativamente grandes por onde quase a totalidade da percolação se processa (Mesri e Olson, 1971).

Em altos níveis de tensão mecânica e no caso de materiais altamente compactados, as forças elétricas tem efeito insignificante sobre o comportamento do solo e a sua estrutura é levemente afetada pelas propriedades químicas do líquido permeável (Mitchell e Soga, 2005). Entretanto, o comportamento hidráulico de solos finos com alta porosidade e solos recém-

compactados é altamente influenciado pela interação entre o fluido presente nos poros e as partículas minerais (Francisca e Gladstein, 2010).

2.6.4 Medição da condutividade hidráulica

Para a medição da condutividade hidráulica podem ser utilizados diferentes aparatos, estes podendo ser instalados em campo ou laboratório. Cada um destes tipos apresentam vantagens e deficiências um em relação ao outro. De modo geral os ensaios de laboratórios são os mais empregados sendo possível empregar diversos procedimentos e diferentes equipamentos, para isso normalmente é utilizado algum tipo de permeâmetro (Dourado, 2003). Os ensaios de laboratório podem ser classificados da maneira mais genérica possível entre o tipo, o sistema de percolação e método de ensaio.

Dentre o tipo de permeâmetro podem ser: parede rígida e parede flexível. O permeâmetro de parede rígida é composto de um corpo de prova (CP) cilíndrico contido em uma caixa ou tubo rígido, onde a percolação ocorre na direção do eixo do corpo de prova. Sua aplicação é voltada principalmente para materiais mais granulares com permeabilidade superior a 1×10^{-3} cm/s. O permeâmetro de parede flexível é um equipamento utilizado para a determinação da condutividade hidráulica de materiais porosos, quando a saturação do CP somente é conseguida por contrapressão. Neste caso, o corpo de prova é montado no interior de uma câmara, envolto por uma membrana e sujeito a uma pressão confinante, em geral aplicada no fluido que envolve o corpo de prova. Outra característica deste tipo de ensaio é que ele guarda estreita proximidade com a montagem que se utiliza nos ensaios de compressão triaxial (Dourado, 2003).

O permeâmetro de parede flexível tende a ser mais confiável em função do selamento que a membrana proporciona ao redor de toda a amostra. Em ensaios de parede rígida normalmente são encontradas dificuldades de aferição de tal selamento. Dentre as várias vantagens do permeâmetros de parede flexível estão: amostras indeformadas podem ser facilmente testadas, a contrapressão pode ser utilizada para saturar a amostra e as tensões verticais e horizontais podem ser facilmente monitoradas (Cruz, 2004).

Com relação ao sistema percolação, para promover e controlar o fluxo de água através do corpo de prova existem vários arranjos de sistemas de controle hidráulico, que podem ser do tipo aberto ou fechado. O sistema é dito aberto quando o influente ou o efluente, ou ambos, está em contato com a atmosfera ou algum sistema pressurizado. Neste sistema o corpo de prova pode variar de volume durante o ensaio, absorvendo ou expelindo água para o reservatório

influyente ou efluente. No sistema fechado as linhas de entrada e saída estão interligadas. Estando o corpo de prova saturado, o volume de percolante que adentra ao corpo de prova é forçado a ser igual ao volume que sai, fazendo com que não haja mudança de volume no corpo de prova.

Pode-se dizer, contudo, que estes sistemas anteriormente citados devem seguir um dos três princípios básicos de método de ensaio: carga constante, carga variável ou fluxo constante. Através destes sistemas, pode-se mensurar parâmetros necessários para o cálculo da condutividade hidráulica. Nos sistemas de carga constante, mantém-se invariável a pressão do fluido percolante na entrada e na saída do corpo de prova. Assim, o gradiente hidráulico permanece constante medindo-se a vazão que percolou. Pode-se calcular, neste caso, a condutividade hidráulica por meio da lei de Darcy.

Nos sistemas de carga variável, a pressão hidráulica pode variar na entrada, na saída ou em ambas, sendo recomendado para solos com baixa condutividade hidráulica. Possui a desvantagem de que a variação de carga pode liberar bolhas de gás dissolvidas e também pode causar variações na tensão efetiva, resultando em consolidação da amostra.

No sistema de fluxo constante, uma bomba de injeção faz o percolante passar pelo corpo de prova a uma vazão constante. Transdutores de pressão são acoplados na entrada e saída da câmara, fazendo leituras da pressão durante todo o ensaio. Quando a vazão e a diferença de pressão entre a entrada e a saída são estáveis, tem-se o fim do ensaio. O cálculo da condutividade hidráulica também se faz com o emprego da Lei de Darcy.

2.7 Processos erosivos

Os processos erosivos são fenômenos naturais aos quais qualquer material quando exposto no ambiente a ação hídrica, eólica ou geológica sofrem influência direta destes. Embora os processos geológicos e erosivos estejam sempre presente em qualquer ambiente, os processos erosivos de fonte hídrica merecem especial atenção quando tratamos de aterros sanitários. A ocorrência de precipitação pode produzir um processo erosivo em coberturas superficiais pois o impacto das gotas de chuvas podem desagregar as partículas que podem ser erodidas por processos de erosão interna e superficial a medida que o material começa a saturar.

Mortari (1994) *apud* Santos (1997) descreve que o processo erosivo é inerente a três etapas distintas: desagregação, transporte e sedimentação. A desagregação, processo inicial em que ocorre o desprendimentos entre os grãos, é de fundamental importância à manutenção da integridade da camada superficial, uma vez que o transporte sempre vai depender do tamanho

das partículas, da energia do agente transportador, da topografia e da ausência de obstáculos ao fluxo como vegetação. A sedimentação, última etapa, é quando o agente transportador perde sua força e ocorre deposição de material.

2.7.1 A erodibilidade dos solos

A erodibilidade deve ser entendida como a propensão que um solo apresenta para resistir aos fatores promotores de processos erosivos. Dessa forma, a erodibilidade depende de uma gama de condicionantes. Dentre essas condicionantes pode-se citar: ciclos de umedecimento e secagem, composição química do material, distribuição granulométrica, plasticidade e estrutura expressa pela porosidade (Mortari, 1994 *apud* Santos, 1997).

Dentre os processos erosivos internos destacam-se dois tipos principais: a esqueletização e o *piping*. Neste caso, a esqueletização seria o processo de degradação física do solo, fator que aumenta com a porosidade e ocorre devido ao transporte de partículas individualizadas, ou ainda perda e transporte de compostos ou elementos químicos individualizados. Por outro lado, o *piping* cria tuneis de escoamento preferencial partir do arraste de partículas ou então remoção de componentes por meio de dissolução química.

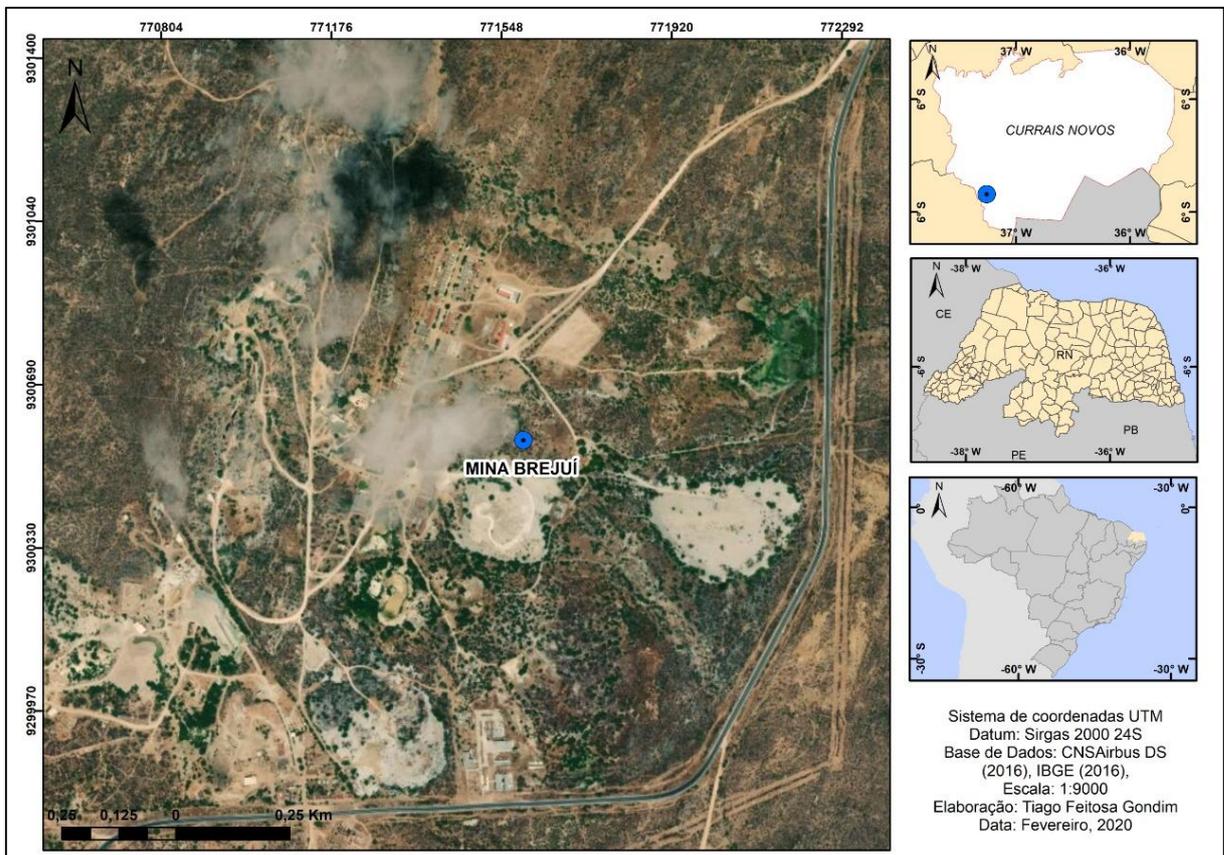
Almeida (2014) descreve que o maior potencial de erodibilidade é sempre quando as amostras estão na condição seca, pois assim quando elas sofrem saturação devido ao escoamento superficial da água ou inundação abrupta, há uma geração de pressões positivas no interior das amostras, uma vez que boa parte dos vazios ainda estão ocupados por ar. Ao serem submersas rapidamente, os vazios continuariam ocupados por ar, porém agora oclusos. Então, a pressão exercida pela água externa reduziria o volume da amostra, aumentando as poropressões positivas e conseqüentemente desestruturando-as. Assim, quanto maior a quantidade de ar ocluso, maior é a tendência da amostra à ruptura. Dessa forma, fazendo um paralelo com a prática, a erodibilidade dos solos aumentaria no início do período chuvoso.

A depender do tipo de material ou solo analisado, sabe-se que materiais que apresentam uma maior plasticidade, são menos susceptíveis aos processos erosivos (Fácio, 1991 *apud* Santos, 1997), por outro lado os materiais de comportamento mais granular (com partículas da ordem de areia fina ou silte e pouca quantidade de argila) são mais susceptíveis a erosão.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentadas as principais características dos resíduos e das misturas estudadas bem como da metodologia que engloba a caracterização geotécnica e mineralógica dos resíduos da scheelita originários da Mina Brejuí, localizada na cidade de Currais Novos-RN. A Figura 5 apresenta o mapa de localização da mina Brejuí. Neste caso, detalha-se que as áreas com coloração branca correspondem a diferentes pilhas de material acumulado.

Figura 5 – Localização da coleta do Resíduo, na Mina Brejuí em Currais Novos/RN.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

3.1 Materiais

O materiais estudados foram os dois resíduos gerados na mina após os processos de beneficiamento da scheelita. Na mina, esses resíduos são diferenciados nominalmente por resíduo fino e resíduo grosso. Por outro lado, sobre o aspectos dos grão que conformam cada

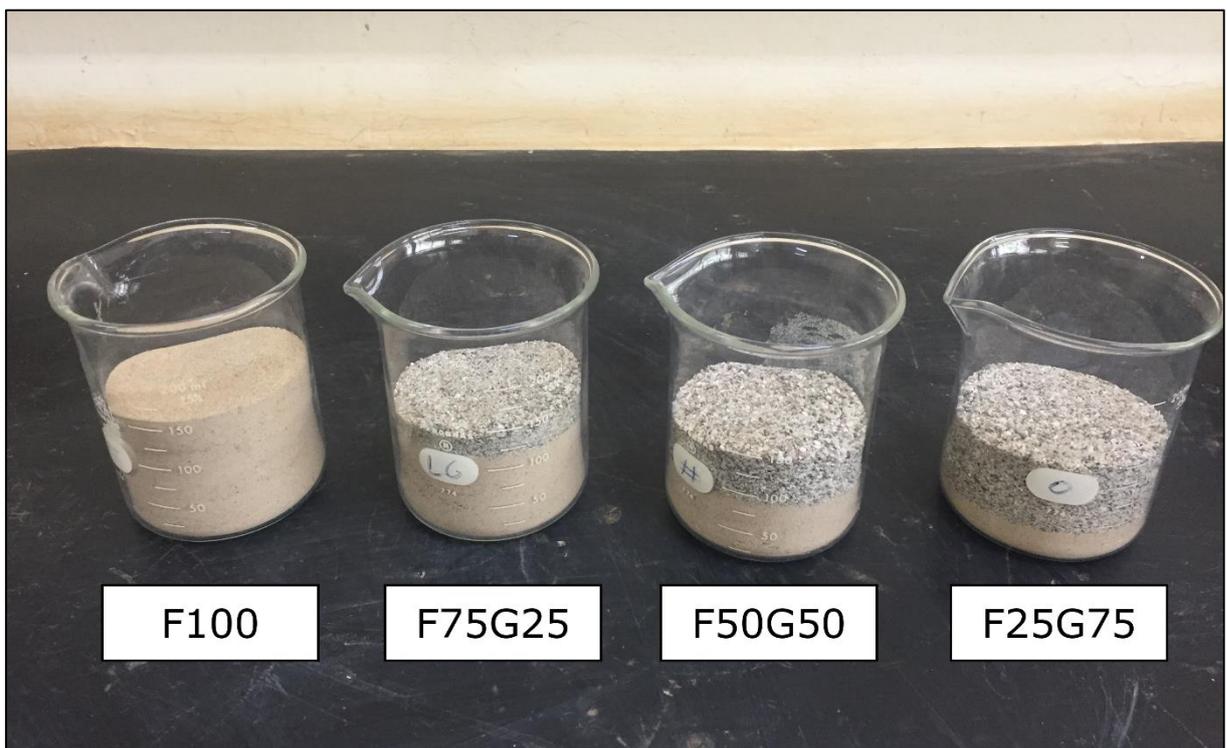
resíduo, pode-se dizer que no resíduo denominado fino 46,5% dos grãos são inferiores a 0,075 mm, e que no resíduo denominado grosso esse valor é de 3,9%.

O resíduo fino ao final do beneficiamento é bombeado hidráulicamente até diques de deposição de lama para sedimentação e dessecação do material. Já o resíduo grosso apresenta uma textura arenosa podendo ser disposto em grandes pilhas de material modificando o aspecto visual local. Esses materiais são originários dos processos de desbaste, redução granulométrica e peneiramento da matriz rochosa.

3.1.1 Misturas ensaiadas

A caracterização geotécnica foi realizada a partir de quatro tipos de materiais: o primeiro formado exclusivamente pelo resíduo fino e mais três compostos formados pela mistura do resíduo fino e grosso variando entre eles teores uniformes em massa do resíduo grosso. Desse modo, foram estudadas as seguintes amostras: 100% da massa de resíduo fino (F100), 75% da massa de resíduo fino e 25% da massa de resíduo grosso (F75G25), 50% da massa de resíduo fino e 50% da massa de resíduo grosso (F50G50), e 25% da massa de resíduo fino e 75% da massa de resíduo grosso (F25G75). A Figura 6 apresenta os materiais estudados.

Figura 6 – Amostras de cada material ensaiado



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

3.2 Caracterização física

Os ensaios de caracterização física seguiram as recomendações de preparação das amostras conforme NBR 6457 (ABNT, 2016). Essa preparação correspondeu a secagem prévia da amostra ao ar e posterior destorroamento e homogeneização. As análises granulométricas foram procedidas conforme a recomendação da NBR 7181 (ABNT, 2016), a massa específica dos grãos à luz da NBR 6508 (ABNT, 2017), o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP) de acordo com as NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016).

3.3 Caracterização química e mineralógica

Para a determinação da composição química e mineralógica, foram realizados ensaios de fluorescência de raios-x (FRX) e difratometria de raios-x (DRX). O ensaio de FRX é baseado na energia da radiação de fluorescência emitida por um material após sua excitação com raio-x, tornando possível identificar os óxidos presentes no material.

O ensaio de DRX consiste na irradiação contínua de raios-x que quando atingem o material são espalhados elasticamente sem perda de energia pelos elétrons de um átomo. O fóton do raio-x após a colisão com o elétron muda a sua trajetória, determinando assim seu ângulo de difração. Este ângulo varia de um elemento a outro o que permite caracterizar e quantificar substâncias que apresentam a mesma fórmula química, como também identificar minerais e estruturas químicas (Echeverri, 2012).

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) utilizado para identificação visual em nível microscópico, utiliza um feixe de elétrons que permite solucionar o problema de resolução relacionado com a fonte de luz branca. Imagens de MEV em diferentes níveis de ampliações foram realizadas nos resíduos puros e soltos, bem como nas quatro misturas ensaiadas (F100, F75G25, F50G50, F25G75) pós compactação, para análise dos principais atributos morfológicos pertinentes a elas. Na etapa de preparação da amostra para o MEV, a lâmina de material amostrado passou preliminarmente pelo processo de metalização a vácuo por ouro.

3.4 Ensaios de compactação

Os ensaios de compactação foram realizados em cada uma das amostras propostas no item 3.1.1, seguindo os procedimentos descritos na NBR 7182 (ABNT, 2016) na energia

Proctor Normal para se obter as curvas de compactação, teor de umidade ótima e seu respectivo peso específico aparente seco. Todos os ensaios foram realizados sem reuso do material.

3.5 Ensaios de condutividade hidráulica

3.5.1 Ensaio de permeâmetro de parede rígida

Os ensaios de permeabilidade foram baseados na NBR 14545 (ABNT 2000) utilizando o método de permeabilidade de carga variável dada a porcentagem de material passante na peneira #200. A partir do ensaio padronizado, pretendeu-se obter os valores de condutividade hidráulica (k) de cada material ensaiado e o grau de saturação do CP ao final do ensaio.

A saturação do corpo de prova foi feita em duas etapas. A primeira em sentido ascensional até que fosse percolada água no orifício superior do permeâmetro. Somente após este período, foi conectada a mangueira à célula em sentido de fluxo do topo para a base para uniformização da percolação pelo CP (segunda etapa).

Após a saturação, foi feita a medição do coeficiente hidráulico conforme procedimentos recomendados na NBR 14545 (ABNT 2000). Para os ensaios de todas as amostras foram moldados corpos de prova compactados na Energia Proctor Normal a partir dos cilindros de compactação de 15,24 cm de diâmetro e 11,43 cm de altura, com umidade aproximadamente 1% acima da ótima e peso específico seco máximo definido pelas curvas de compactação.

Para o isolamento hidráulico entre o CP dentro do permeâmetro e a parede rígida, envolveu-se o material com duas camadas de parafina separada por uma camada de bentonita sódica. Na base e topo do CP foram utilizados papéis filtros para evitar a colmatação da pedra porosa, e a regularização da base foi feita com areia média lavada.

O ensaio de condutividade hidráulica em permeâmetro de parede rígida foi considerado um ensaio preliminar, cujos resultados representaram apenas um reconhecimento da viabilidade do emprego isolado, sem mistura com solo, dos materiais propostos. O principal motivo de sua realização é que seus resultados, normalmente obtidos mais rapidamente que os de parede flexível, poderiam servir de base a possíveis decisões durante o percurso dos ensaios de parede flexível.

3.5.2 Ensaio de permeâmetro de parede flexível em célula triaxial

3.5.2.1 Preparação das amostras

Todas as amostras ensaiadas foram preparadas e compactadas manualmente com umidade aproximadamente 1% acima da ótima. A água utilizada durante todos os procedimentos de preparação das amostras e ensaios foi a água de rede de abastecimento.

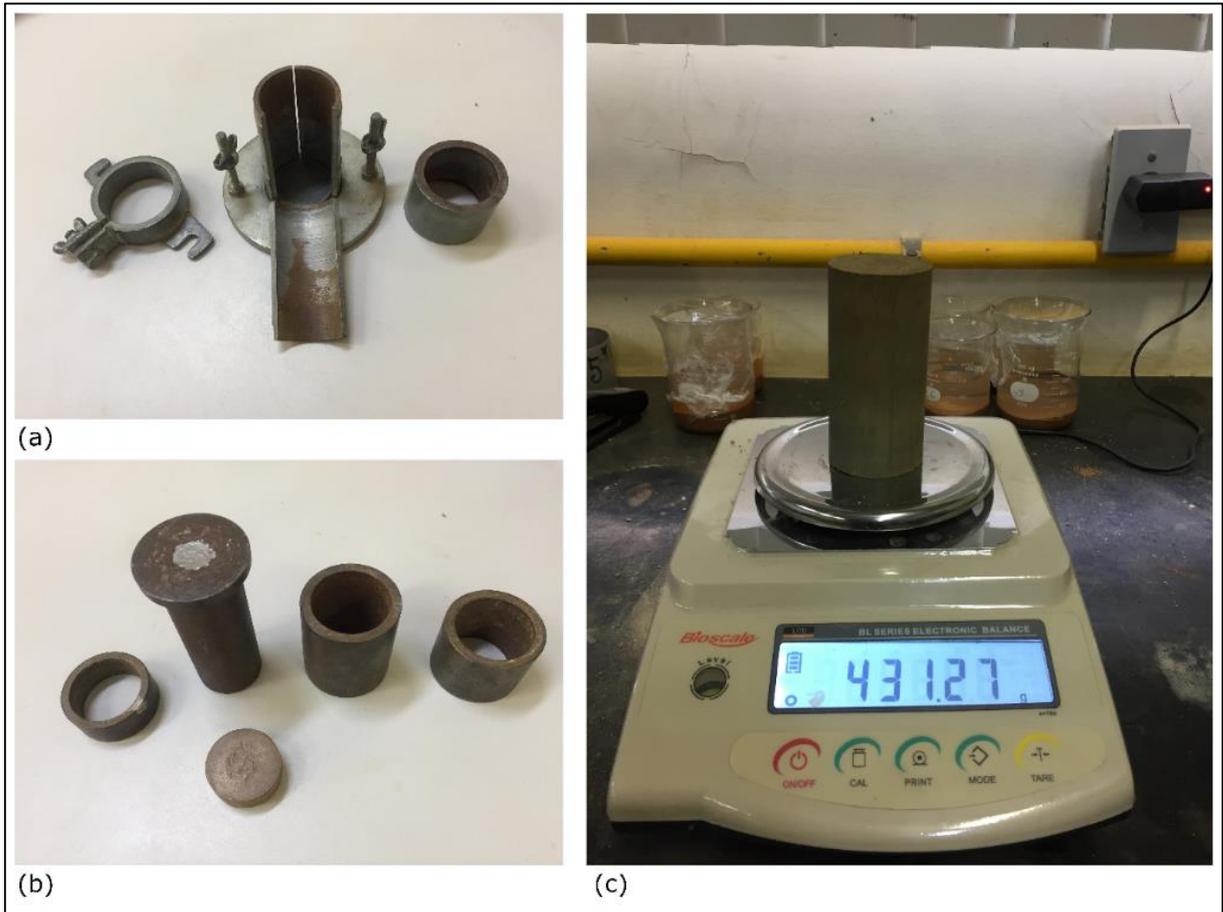
Para os ensaios de condutividade hidráulica, a preparação das amostras foi conduzida da seguinte forma: primeiro, os materiais foram pesados na proporções predefinidas, misturados e compactados dinamicamente em quatro camadas dentro de um molde tripartido de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura.

O controle da densidade para cada índice de vazios de moldagem foi realizado pela quantidade de massa total inserida calculada a partir dos parâmetros obtidos nas curvas de compactação e calculadas segundo a Equação 03, em que M_t é a massa total no cilindro e V_t seu volume.

$$M_t = \frac{\rho_s(1+w_{ot})V_t}{4(e+1)} \quad [03]$$

Logo após moldagem, os CPs foram pesados com precisão de 0,01 g, medidos com precisão de 0,01 cm, aferida a umidade final e imediatamente instalados no permeamômetro de parede flexível. Para o teor de umidade foi adotada tolerância de até +3%, sendo desconsideradas umidades no ramo seco da curva de compactação. A Figura 7 apresenta a imagem do molde tripartido, seus anéis, cilindro compactador e a amostra final compactada.

Figura 7 – Equipamentos utilizados para moldagem e corpo. (a) molde; (b) elementos compactadores; (c) amostra compactada.

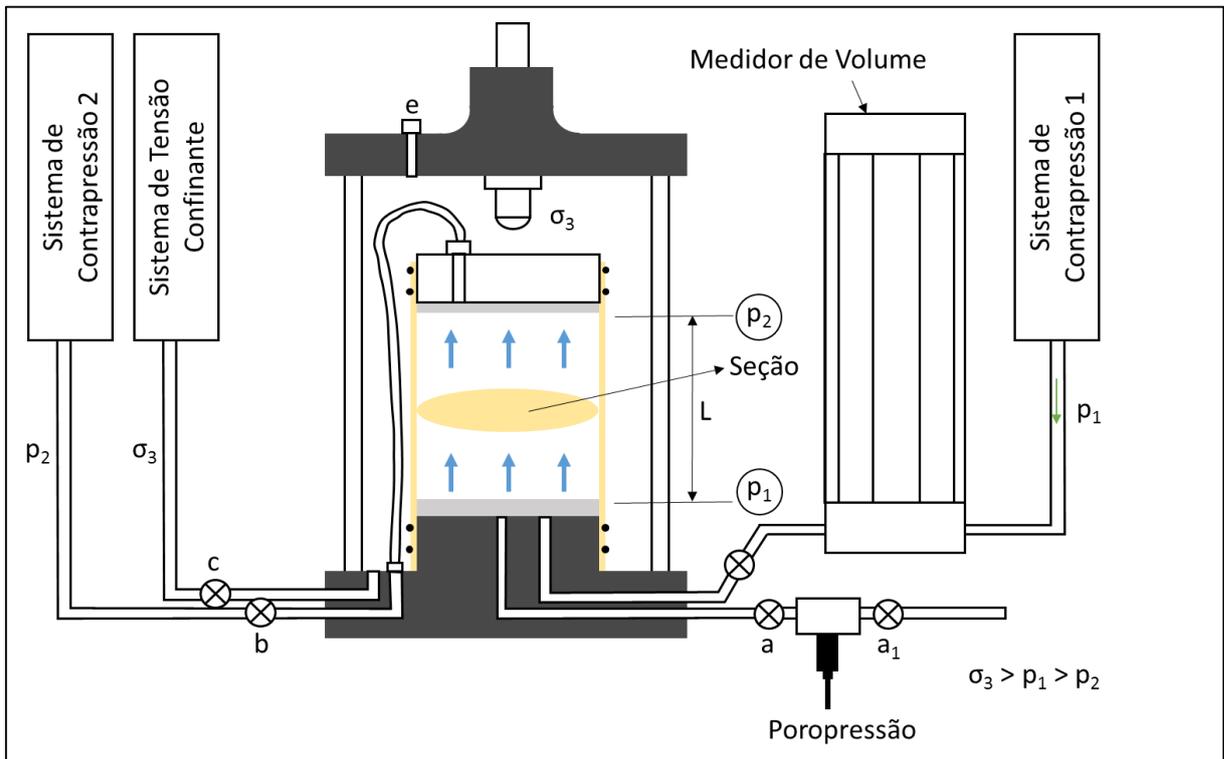


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

3.5.2.2 Procedimentos de ensaio

Os ensaios de condutividade hidráulica realizados em permeâmetro de parede flexível, utilizaram a célula triaxial e como procedimento de ensaio respeitaram-se os procedimentos estabelecidos na ASTM D5084 (2000) a carga constante. Este ensaio conforme descrito nessa norma é indicado a materiais de baixa permeabilidade como o material estudado. A célula triaxial foi adaptada conforme Head (1986) e apresentada na Figura 8.

Figura 8 – Aparato constitutivo do ensaio de permeabilidade em câmara triaxial.



Fonte: Adaptado de Morandini (2009, p.46).

Neste esquema são utilizadas três linhas de pressão, duas linhas de contra pressão sendo uma ligada à base e outra ao topo do corpo de prova, a terceira é responsável pela pressão de confinamento. O método estabelece um controle de pressões induzidas na base (p_1), no topo (p_2) e de confinamento (σ_3) com os seguintes critérios: (1) $p_1 > p_2$ para gerar um fluxo ascendente e (2) $\sigma_3 > p_1$ para que não ocorra ruptura da amostra por poropressão. Desta forma, durante o procedimento, a condição $\sigma_3 > p_1 > p_2$ foi respeitada.

Os ensaios foram realizados com as amostras saturadas por contra pressão e pressão confinante efetiva de 30 kPa. Essa pressão confinante efetiva mostrou-se consistente na retenção de fluxo entre a membrana e superfície lateral do corpo de prova, de forma que não houvesse pode-se garantir o fluxo através do CP.

A saturação foi monitorada em cada incremento de tensão (50 kPa), garantindo valores de B em pelo menos 0,92 para todas as amostras. Todas as amostras foram saturadas conforme requisitos de saturação da ASTM D5084 (2000) a fim de se obter a condutividade hidráulica na condição saturada, com confirmação da condução saturada confirmada após finalização do ensaio e desmontagem da célula triaxial. Os procedimentos durante todo o ensaio são detalhados nas etapas abaixo:

i) Percolação

- a) Aplicação de uma contra pressão na base (p_1) de 10 kPa e uma tensão de confinamento na amostra (σ_3) de 20 kPa, de modo que a tensão efetiva fique em aproximadamente 10 kPa. A base deve estar conectada ao reservatório de água e o topo à pressão ambiente (p_2), para que haja fluxo;
- b) A etapa de percolação foi finalizada quando percolou-se um volume de água equivalente a pelo menos três vezes o volume de vazios da amostra.

ii) Saturação

- c) Fechamento da válvula de drenagem p_2 ;
- d) Aplicação de incrementos de tensão confinante de 50 kPa de modo que a tensão efetiva ficou aproximadamente em 10 kPa. Na saturação por contra pressão manteu-se fechada a válvula relativa a contrapressão do topo do corpo de prova (p_2). Uma vez aplicado um novo estágio, esperou-se o tempo equivalente a equalização das pressões aplicadas com a resposta (contrapressão) medida em p_2 .
- e) Controle de saturação feito pelo parâmetro B.

iii) Adensamento

- f) Adensamento hidrostático da amostra para a tensão de confinamento desejada (30 kPa), sendo esta a mesma tensão confinante de ensaio durante a percolação de modo a garantir que o volume de água medido era apenas resultante do fluxo e não da alteração de volume. Daniel (1994) recomenda que aplicação mínima de tensão efetiva de 30 kPa para a garantia de que não haja fluxo entre a membrana e o corpo de prova.

iv) Medição da Condutividade Hidráulica

- g) Para que a tensão efetiva de confinamento durante a fase de percolação fosse a mesma da aplicada durante o adensamento, foi necessário estimar a poropressão gerada em consequência da aplicação da pressão da base (p_1) e da pressão de topo (p_2). Segundo Head (1986), quando submetida a duas pressões diferentes (uma no topo e outra na base) a poropressão não é distribuída de forma linear, sendo que a poropressão na seção média pode ser estimada pela Equação 04.

$$u = \frac{1}{3}(2p_1 + p_2) \quad [04]$$

- h) Já a tensão de confinamento na qual a amostra foi submetida foi calculada pela Equação 05.

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - u \quad [05]$$

- i) A carga hidráulica imposta à amostra, segundo Head (1986), foi dada pela diferença entre as pressões em sua base e topo ($p_1 - p_2$).
- j) Por fim, mediu-se sucessivamente os volume percolado acumulado pelo tempo de percolação acumulado. O ensaio foi considerado valido quando pode-se aferir cinco medidas consecutivas em que a razão do volume por tempo era variável em até $\pm 5\%$ da medida anterior. Portanto, pode-se dizer que houve estabilidade do fluxo a partir do momento em que graficamente a variação do volume de água percolado (Vol) no intervalo de tempo acumulado (t) conformou trecho linear do gráfico obtido.
- k) Fazer a percolação até que pelo menos quatro valores de condutividade hidráulica sejam obtidos ao longo de um intervalo de tempo em que: a relação das vazões sequencialmente medidas esteja entre 0,75 e 1,25; e a condutividade hidráulica seja estável. A condutividade hidráulica deve ser considerada estável se quatro ou mais determinações de condutividade hidráulica consecutivas estiverem dentro de $\pm 25\%$ ou inferior do valor médio para $k \geq 1 \times 10^{-10}$ m/s ou dentro de $\pm 50\%$ ou inferior para $k < 1 \times 10^{-10}$ m/s, e um gráfico ou tabulação da condutividade hidráulica versus tempo não mostre nenhuma tendência significativa para cima ou para baixo.

3.5.2.3 Controle do gradiente hidráulico

Em problemas de percolação, o gradiente hidráulico relaciona-se diretamente ao estado de tensão atuante no solo, principalmente no que diz respeito às tensões efetivas. Essa característica, por si só, pode promover alterações no solo.

Alguns autores citam a influência do gradiente hidráulico na permeabilidade de tal forma que possa ocasionar uma diminuição da mesma. Como justificativa, tem-se o fato de que quando a estabilidade microestrutural de partículas finas do solo é fraca, pode ocorrer erosão, transporte e acúmulo de partículas, levando ao entupimento dos espaços vazios e, conseqüentemente, à redução na condutividade. Erosão e transporte de partículas finas, também, podem levar a aumentos na condutividade hidráulica dos solos devido ao

aumento dos vazios (Al-Taie et al., 2014; Ke e Takahashi, 2012 *apud* COSTA, 2016, p.16).

De acordo com a norma norte-americana ASTM D5084 (2016) o uso de gradientes hidráulicos elevados pode levar ao carreamento de partículas finas no interior do corpo de prova de solos argilosos e ocasionar o aprisionamento de partículas menores na sua porção final, o que pode bloquear o fluxo e reduzir a permeabilidade, ou levar ao carreamento total das partículas finas no caso de solos granulares, aumentando a permeabilidade. Por isso, durante o ensaio utilizou-se os valores de referência apresentado nesta norma para materiais de baixa permeabilidade que são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores de gradientes hidráulicos máximos recomendados.

Coefficiente de Permeabilidade (m/s)	Gradiente hidráulico máximo recomendado (kPa)
3×10^{-5} a 1×10^{-6}	2
1×10^{-6} a 1×10^{-7}	5
1×10^{-7} a 1×10^{-8}	10
1×10^{-8} a 1×10^{-9}	20
Menor que 1×10^{-10}	30

Fonte: ASTM D5084 (2000, p.10).

3.6 Ensaio de erodibilidade

Os ensaios de Dispersão Rápida e o de Desagregação podem ser considerados ensaios de caráter qualitativo, pois neles a avaliação das condições de erodibilidade está ligada à manutenção das propriedades inicial (integridade) da camada proposta frente à percolação de água em seu interior e superfície.

3.6.1 Ensaio de dispersão rápida (*crumb test*)

O ensaio de Dispersão Rápida, também chamado de Crumb Test, recomendado por Sherard *et al.* (1976) foi pensado para avaliar e classificar qualitativamente a dispersão de solos argilosos quando inundados por água. Esse ensaio embora seja considerado ensaio de caráter qualitativo, nele é possível fazer a avaliação das condições de erodibilidade ligada à manutenção das propriedades inicial (integridade) da camada proposta frente à percolação de água em seu interior e superfície.

O procedimento executivo está estabelecido na NBR 13601 (ABNT 1996), em que um torrão de formato aproximadamente esférico, de 6 mm a 10 mm de diâmetro, é colocado dentro de um béquer contendo cerca de 150 mL de água destilada.

Embora a norma preconize a possibilidade de utilizar uma solução hidróxido de sódio em substituição a água destilada, Sherard *et al.* (1976) orienta que o uso de hidróxido de sódio pode promover uma situação considerada excessivamente severa, uma vez que neste caso pode-se produzir a ocorrência de dispersão embora o solo não seja dispersivo em sua condição natural.

A NBR 13601 (ABNT, 1996) ainda recomenda que para cada amostra sejam ensaiados três torrões a fim de evitar resultados divergentes dependendo da dispersividade do solo e modo como os torrões são imersos em águas. Após transcorrida uma hora de repouso, observa-se visualmente o aspecto da esfera e classifica-se o material quanto a sua dispersibilidade, conforme o Quadro 2.

Quadro 2 – Classificação das reações ocorridas nas amostras.

Grau	Dispersividade	Observação
Grau 1	Não dispersivo	A amostra pode espalhar-se no fundo do recipiente, porém não se observa sinal de turvação causada por coloides em suspensão
Grau 2	Levemente dispersivo	Indícios de turvação próximo à superfície do torrão
Grau 3	Moderadamente dispersivo	Verifica-se uma turbidez, acompanhada de uma fina camada de partículas no fundo do béquer
Grau 4	Fortemente dispersivo	Nuvem coloidal cobrindo toda a base do recipiente frequentemente em uma camada muito fina. Em casos extremos a água torna-se turva

Fonte: ABNT NBR 13601 (1996, p.2).

3.6.2 Ensaio de desagregação

A metodologia utilizada ocorreu conforme Santos (1997), com inundação total e parcial, em amostras indeformadas de material no formato de cubos com 60 mm de aresta. Este ensaio (“slaking test”) evoluiu do “crumb test”. Entretanto, o objetivo maior deste ensaio é a verificação da estabilidade à desagregação da amostra quando submersa em água, independente da dispersão do material. A aplicação do ensaio de desagregação para fins geotécnicos foi idealizado pela engenheira Anna Margarida Fonseca, ao estudar propriedades dos solos para fins de fundação durante a construção de Brasília (Ferreira, 1981 *apud* Bastos 1999).

A depender das características do material (friável ou não) e da presença de pedregulhos, a metodologia indicada recomenda buscar a moldagem o mais semelhante possível a um cubo, de forma que haja estabilidade em sua base a fim de minimizar a

interferência nos resultados. A Figura 9 apresenta os formatos dos corpos de prova das amostras ensaiadas.

Figura 9 – Modelos dos corpos de prova



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O ensaio de imersão total consiste na inundação completa do corpo-de-prova permanecendo assim por 24 horas. Por outro lado, para o ensaio de imersão parcial, a amostra de formato cúbico é disposta sobre uma pedra porosa inundada por quatro (04) diferentes estágios de submersão. No primeiro estágio, é colocada água apenas na altura da base do corpo de prova apoiado sobre uma pedra porosa por um tempo de 30 minutos, no segundo estágio o nível é elevado para $1/3$ da altura do corpo de prova permanecendo por 15 minutos, e no terceiro estágio eleva-se o nível para $2/3$ da amostra por um tempo também de 15 minutos. Por fim, no quarto e último estágio completa-se com água até a total submersão da amostra, permanecendo até 24 horas do início do ensaio.

Durante cada estágio são anotados os tempos de aparente saturação das amostras (intervalo de tempo entre o início e fim da ascensão capilar), o tempo de início de sua fissuração e o tempo para desagregação total ou parcial.

Fonseca (1981) afirma que é possível fazer uma correlação entre a velocidade de desagregação com o potencial de erodibilidade, de forma a criar um índice classificatório. De acordo com os ensaios de desagregação em amostras remoldadas de Holmgren e Flanagan (1977) *apud* Santos (1997), classificam-se os tipos de reação a inundação em:

- a) Sem resposta: quando a amostra mantém sua forma e tamanho originais.
- b) Abatimento (Slumping): quando a amostra se desintegra formando uma pilha de material desestruturado.
- c) Fraturamento: quando a amostra se quebra em fragmentos, mantendo a forma original das faces externas.
- d) Dispersão: quando as paredes da amostra se tornam difusas com o surgimento de uma “nuvem” coloidal que cresce à medida que a amostra se dissolve.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios de caracterização química e mineralógica dos dois resíduos analisados, caracterização morfológica nas amostras compactadas, bem como da caracterização geotécnica dos mesmos e dos resultados dos ensaios de erodibilidade.

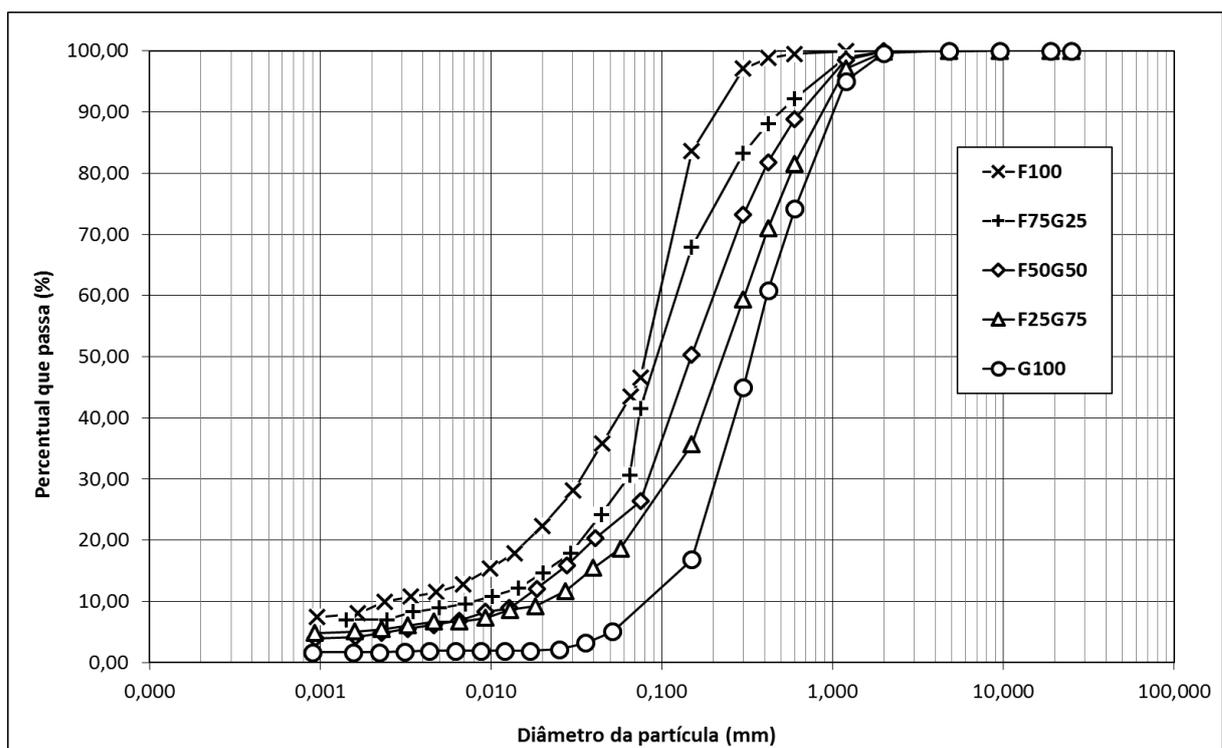
4.1 Caracterização geotécnica

A caracterização geotécnica expressa os resultados de caracterização física, das curvas de compactação, condutividade hidráulica em permeâmetro de parede rígida e flexível além dos resultados dos ensaios de erodibilidade para as quatro amostras estudadas.

4.1.1 Caracterização física

O Gráfico 1 apresenta a curva granulométrica de cada material obtido por peneiramento conforme NBR 7181 (ABNT, 2016).

Gráfico 1 – Curvas granulométricas dos materiais ensaiados.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O resíduo grosso apresentou predominância de partículas de textura arenosa correspondendo a um total de 96,4% em peso das partículas. Por outro lado, o resíduo fino apresentou a maior fração de finos com textura argilosa correspondendo a um total de 10% em peso das partículas.

As misturas em diferentes proporções desses dois resíduos variaram suas características físicas entre esses dois espectros sofrendo maior influência daquele resíduo em maior proporção. Os demais parâmetros físicos dos materiais ensaiados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros físicos dos materiais.

Material	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	CNU	CC	ρ _s (g/cm ³)	IP
F100	0,002	0,034	0,102	51,00	5,67	2,93	Não plástico
F75G25	0,008	0,063	0,127	15,88	3,91	2,95	Não plástico
F50G50	0,015	0,086	0,213	14,20	2,31	2,95	Não plástico
F25G75	0,020	0,119	0,307	15,35	2,31	2,96	Não plástico
G100	0,093	0,220	0,414	4,45	1,26	2,98	Não plástico

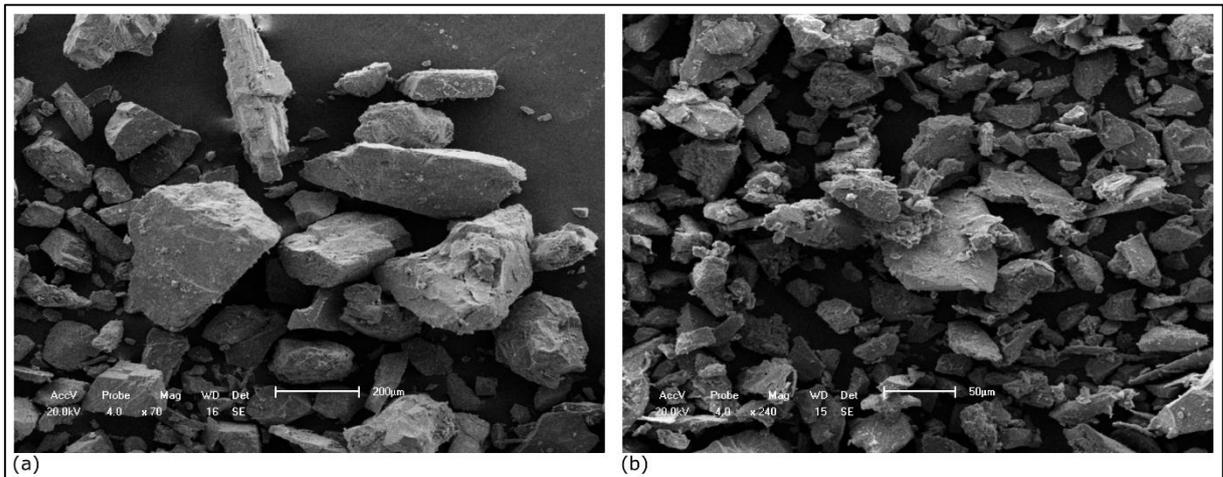
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

De acordo com a Unified Soil Classification System (ASTM D2487, 2017), pode-se classificar o resíduo grosso como areia mal graduada. Apesar da classificação mencionada (SP-resíduo grosso), o resíduo fino não poderia ser classificado por esta metodologia já que apresenta 46,5% de finos sem apresentar valores de limite de liquidez e índice de plasticidade. Neste caso, os resíduos são gerados por desbaste, peneiramento e redução granulométrica da rocha mãe, o que lhe confere propriedades específicas, logo comportamento geotécnico próprio. Exemplo disso pode ser exemplificado pelos valores elevados de peso específico dos sólidos encontrados de 2,931 e 2,977 g/cm³, respectivamente para os resíduos fino e grosso.

O valor obtido para o coeficiente de curvatura para o resíduo fino (F100) apresenta resultado que indica uniformidade na parte central da curva granulométrica. Os demais materiais apresentaram uniformidade média dos grãos, e curva granulométrica se desenvolvendo mais suavemente. Os valores de CC para as misturas com boa predominância de resíduo grosso (F50G50, F25G75) apresentaram-se como material melhor graduado que os demais.

A Figura 10 apresenta imagens de MEV realizadas nas partículas soltas para avaliação da forma e tamanho dos grãos. Quanto a forma das partículas dos dois resíduos, ambos apresentam forma de partículas angulares e sub-angulares, heterogêneas.

Figura 10 – Imagem MEV em resíduos soltos. (a) resíduo grosso 70 x; (b) resíduo fino 240 x.

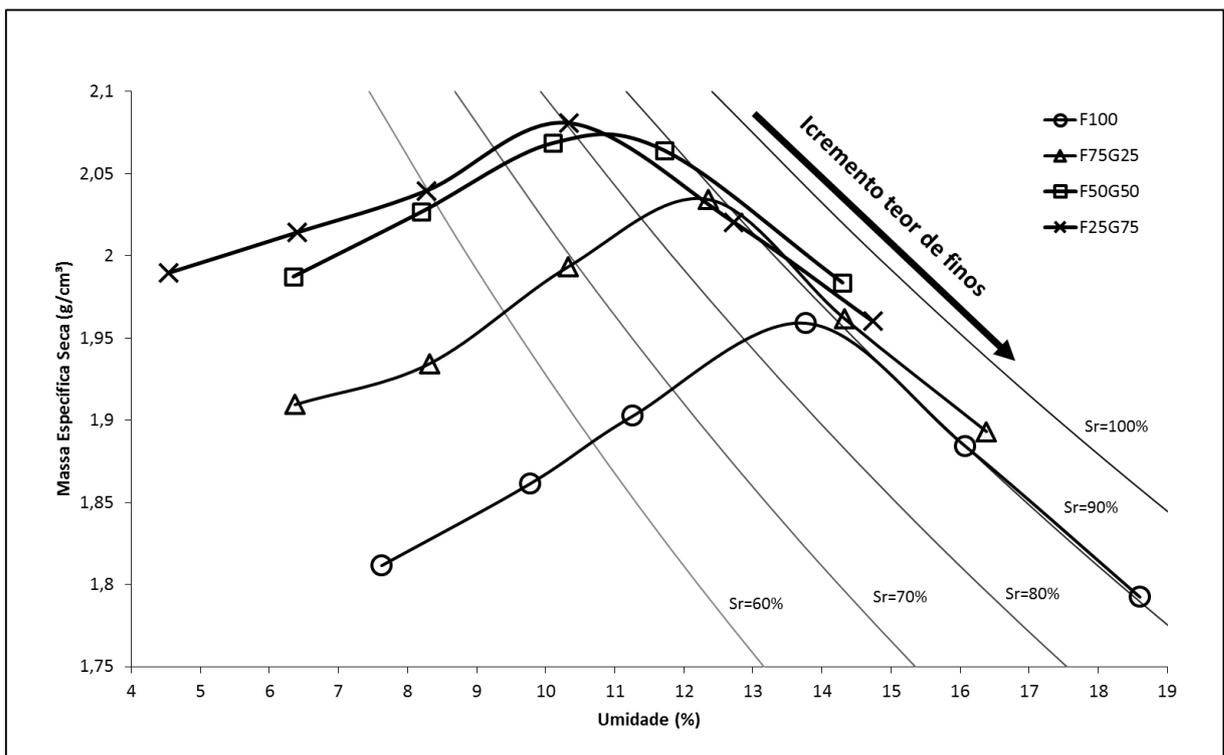


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4.1.2 Ensaios de compactação

Os ensaios de compactação foram realizados na energia Proctor Normal (ABNT NBR 7182, 2016) para determinar os parâmetros de compactação dos materiais ensaiados. O Gráfico 2 apresenta as curvas de compactação obtidas para cada amostra ensaiada.

Gráfico 2 – Curvas de compactação das amostras.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A Tabela 5 resume os principais índices físicos de cada material compactado, seus parâmetros ótimos de compactação e a determinação da quantidades de finos presente em cada material.

Tabela 5 – Índices físicos do material compactado na umidade ótima.

Material	ρ_d (máx) (g/cm ³)	W _{ot.} (%)	e	n _{mín} (%)	Conteúdo de partículas <0,002 mm (%)	Conteúdo de partículas 0,002-0,06 mm (%)
F100	1,96	13,7	0,5	33,2	10,0	31,4
F75G25	2,04	12,2	0,4	30,9	7,0	22,0
F50G50	2,07	10,8	0,4	29,7	8,8	18,9
F25G75	2,08	10,7	0,4	29,8	5,4	10,5

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Observa-se que as curvas de compactação das misturas F50G50 e F25G75 estão plotadas no Gráfico 2 uma bem próxima à outra indicando um nível de compactação máxima similar entre as duas misturas.

Dada as massas específicas secas similares nessas misturas e a predominância de grãos grossos, acredita-se que a porcentagem de finos existente nelas tenham papel de preencher os vazios deixados pelos contatos entre os grãos grossos, estando os grãos finos em uma microestrutura totalmente confinada entre os vazios.

Nas demais curvas (F100 e F75G25) a presença de finos é superior que nas misturas anteriormente citadas, logo mais influente na compactação. Nesse caso, o contato entre grãos finos predomina de forma que o papel dos grãos grossos na microestrutura é de estarem dispersos. Isso faz com que as curvas de F100 e F75G25 estejam apresentadas mais à direita inferior do Gráfico 2, denotando que quanto maior a presença de partículas de textura fina menor o nível de compactação.

Os resultados dos índices de vazios e porosidade nas mistura entre o resíduo grosso e o fino demonstram uma similitude quanto aos volumes de vazios existente nesses materiais. Como não há uma correlação direta entre a porosidade e o tamanho dos poros, espera-se que em cada um desses materiais apresentem conformações microestruturais diferentes umas das outras mesmo que as partículas finas preencham os vazios das partículas maiores.

Pode-se perceber que o volume de vazios é maior na amostra de resíduo fino (F100) uma vez que esta apresenta maior teor de partículas finas (< 0,075 mm). Porém, maiores volumes de vazios só são percebidos nas misturas ensaiadas em que a porcentagem de resíduo fino foi maior que a porcentagem de resíduo grosso. Nesse sentido, a uniformidade das partículas de textura siltosa deva uniformizar um nível de compactação semelhante entre os compósitos F50G50 e F25G75.

4.1.3 Ensaios de condutividade hidráulica em permeâmetro de parede rígida

Os valores medidos de permeabilidade referem-se ao fluido percolante (água) à temperatura de 20 °C (k_{20}) conforme recomenda a NBR 14545 (ABNT, 2000). A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos durante os ensaios dos materiais compactados com umidade acima da ótima.

Tabela 6 – Valores de k_{20} para os materiais compactados.

Material	k_{20} (m/s)
F100	$6,57 \times 10^{-10}$
F75G25	$4,03 \times 10^{-10}$
F50G50	$1,66 \times 10^{-9}$
F25G75	$7,84 \times 10^{-9}$

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Os valores da massa específica seca, da umidade ótima, do grau de compactação e desvio do teor de umidade das amostras compactadas para execução do ensaio de permeabilidade encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7 – Características das amostras ensaiadas no permeâmetro de parede rígida.

Material	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	w_{comp} (%)	S_{final} (%)	Δw (%)
F100	1,81	0,6	38,2	14,9	90,6	+1,2
F75G25	1,93	0,5	34,5	13,0	82,2	+0,8
F50G50	2,02	0,5	31,5	11,4	93,3	+0,6
F25G75	2,01	0,5	32,2	10,8	74,4	+0,1

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Todos os ensaios foram realizados com o mesmo gradiente hidráulico ($i=13,26$). Observa-se que a variação entre a maior e menor condutividade hidráulica é menor que uma ordem de grandeza ($1,66 \times 10^{-9} - 6,57 \times 10^{-10}$ m/s).

A norma americana para medição da condutividade hidráulica de material poroso por permeâmetro de parede rígida ASTM D 5856 (1995) deixa claro que este método somente se aplica a materiais porosos que contêm pouco ou nenhum ar, já que o método não garante a saturação completa da amostra com água para alguns tipos de materiais. Um problema potencial com esse método de ensaio segundo esta norma é a possibilidade de que a água flua ao longo da interface entre a amostra e o anel de compactação/permeâmetro. Esse problema tende a ter um significado mínimo para materiais que expandem quando expostos à água, mas pode ser um

problema para materiais como os ensaiados, já que não são materiais expansíveis. Nestes casos o método de ensaio ASTM D 5084 (2000) é recomendado para qualquer material que não tende a expandir quando exposto ao líquido do permeante.

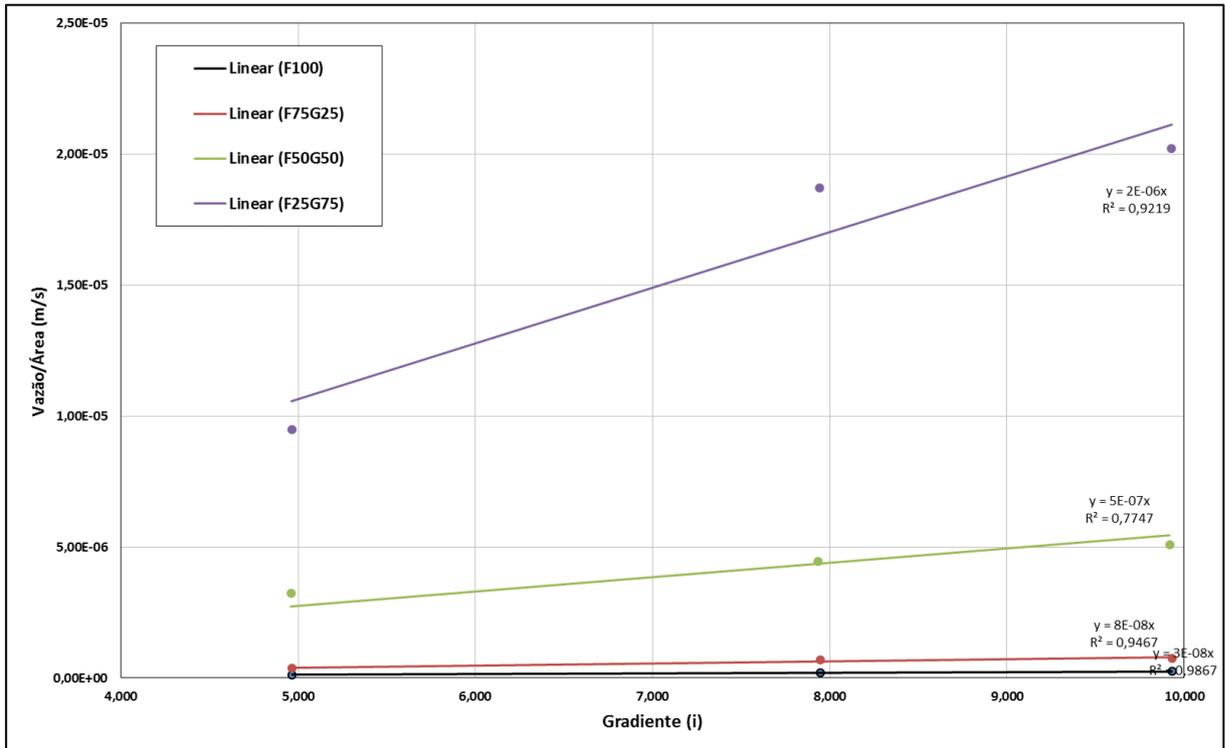
Para Daniel (1994), as desvantagens do permeâmetro de parede rígida são a não saturação completa da amostra, a possibilidade de saturação somente por contrapressão para materiais pouco permeáveis, a não existência de possibilidade de regulação das pressões atuantes e a existência da possibilidade de haver fluxo lateral pelas paredes do tubo do permeâmetro de difícil percepção durante o ensaio. Como em nenhuma das amostras foi possível atingir a completa saturação do CP (grau de saturação final das amostras entre 70 - 82%), a realização dos ensaios em permeômetros de parede flexível foram procedidos. Neste caso os ensaios ora realizados possibilitaram o melhor conhecimento sobre a viabilidade de emprego único (sem mistura com solo ou bentonita) dos resíduos, e uma melhor estimativa dos gradientes hidráulicos a serem trabalhados.

4.1.4 Ensaios de condutividade hidráulica em permeâmetro de parede flexível

Os ensaios foram realizados conforme a ASTM D 5084 (2000) em que três distintos valores de gradientes hidráulicos (5, 8 e 10) foram usados sendo mantida a tensão confinante e contrapressão afluente inalteradas, somente aumentando a contrapressão na extremidade influente permitindo uma melhor distribuição da tensão ao longo da amostra, de acordo com o padrão americano.

Como referência dos valores dos gradientes aplicados, pode-se destacar que a escolha do valor referente ao gradiente máximo segue a recomendação da norma americana. Por outro lado, o gradiente mínimo ficou assim estabelecido por ser o menor valor de gradiente que alcançou a estabilização do fluxo dentro do CP. Para valores menores, percebeu-se uma variabilidade de fluxo devido a baixa diferença entre as contrapressões p_1 e p_2 . Os valores da condutividade hidráulica são apresentadas no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Resultados da condutividade hidráulica durante o ensaio.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Percebe-se a partir dos resultados obtidos nos ensaios de condutividade hidráulica que há uma mudança de duas ordens de grandezas entre os compósitos de menor e maior porcentagem de finos.

Para o valor de condutividade hidráulica de F25G75 podemos entender que tal resultado possa defini-lo com permeabilidade compatível a de uma areia, logo um material permeável, e para o F100 um material de permeabilidade compatível com um material de característica silto-argilosa, logo baixa permeabilidade. As propriedades das amostras ensaiadas e o valor da condutividade hidráulica corrigida são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Propriedades físicas iniciais dos CPs e resultado de k_{20} .

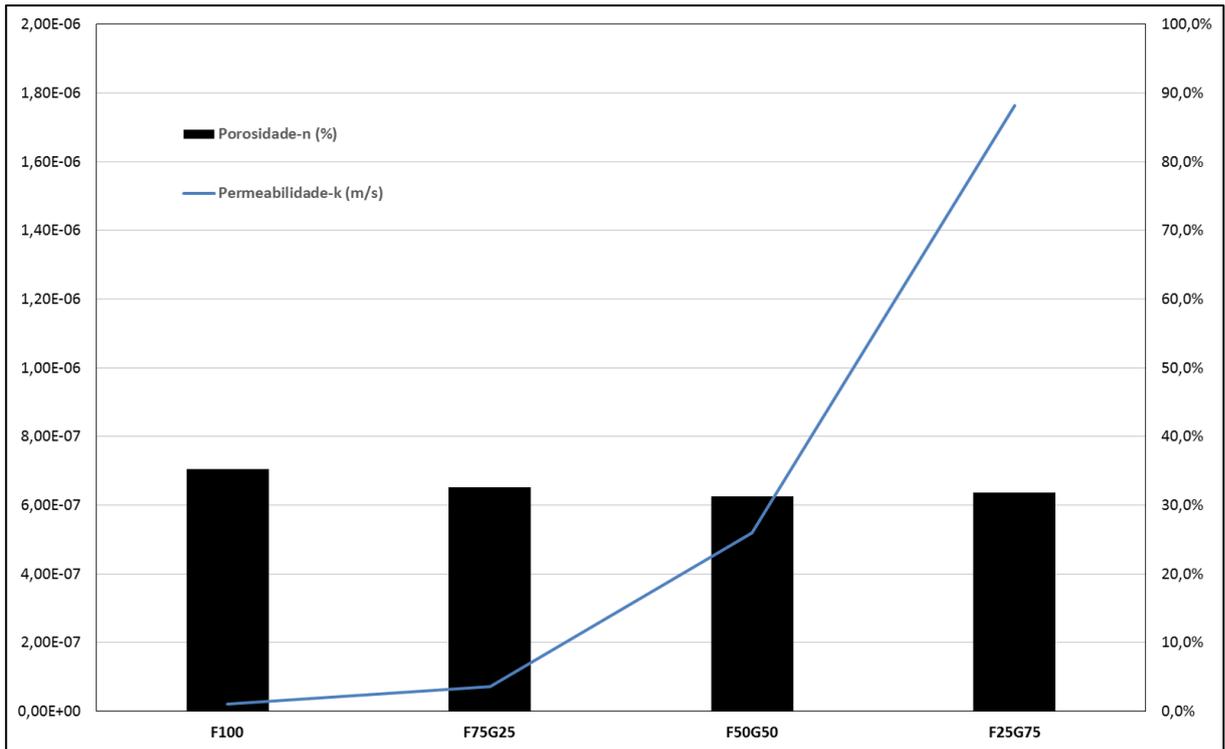
Material	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	w_{comp} (%)	Parâmetro B	k_{20} (m/s)
F100	1,90	0,5	35,3	15,0	0,92	$2,18 \times 10^{-8}$
F75G25	1,99	0,5	32,6	12,9	0,92	$7,07 \times 10^{-8}$
F50G50	2,03	0,5	31,3	11,4	0,92	$5,19 \times 10^{-7}$
F25G75	2,02	0,5	31,8	10,9	0,94	$1,76 \times 10^{-6}$

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O Gráfico 4 apresenta os resultados da condutividade hidráulica das amostras ensaiadas por sua respectiva porosidade. Neste sentido, observado o Gráfico 4, nota-se que a

porosidade demonstra-se pouco variável, por outro lado, a permeabilidade varia em escalas consideráveis entre as amostras ensaiadas. Como tendência, percebe-se que à medida em que a amostra apresenta maior quantidade do resíduo fino, logo, também, maior quantidade de finos, a permeabilidade é menor.

Gráfico 4 – Permeabilidade e porosidade versus tipo de material.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Segundo Fuentes *et al.* (2018), o valor da condutividade hidráulica de misturas com texturas arenosas e argilosas, por exemplo, depende das proporções relativas dos dois materiais e sua mineralogia, influenciando assim na massa específica ou porosidade, e na interconexão entre os poros formados e seus tamanhos.

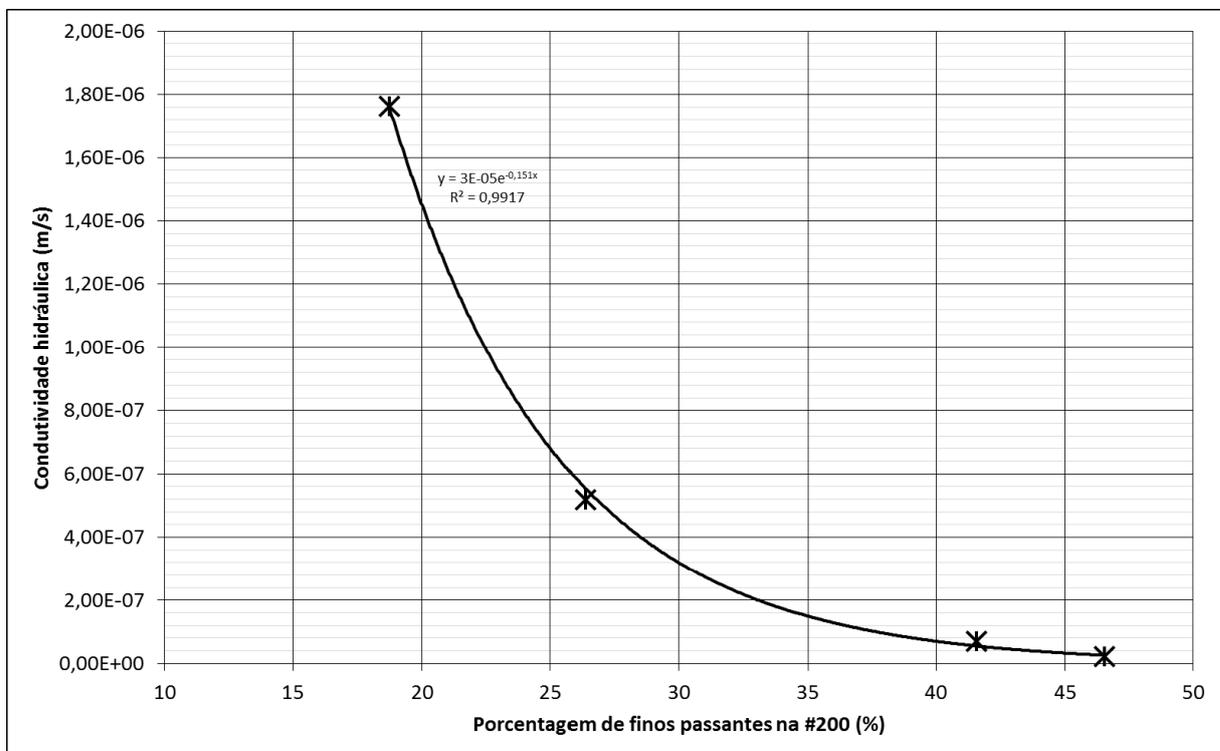
Para o material ensaiado, pode-se admitir que mesmo tratando-se de resíduo de mineração, material de comportamento geotécnico próprio, é válida a análise da variação de k_{20} para as amostras ensaiadas sobre a mesma ótica dos fatores anteriormente citados, observadas as particularidades do material.

Uma vez que a diferença na quantidade de finos existentes em cada amostra ensaiada demonstra exercer menor influência sobre a porosidade, mas grande influência sobre a condutividade hidráulica, entende-se que o tecido microestrutural organizado pela quantidade de finos existente condiciona a composição dos poros formados. Por isso, a incorporação de

maiores teores de finos nas amostras ensaiadas devem proporcionar um entrosamento entre as partículas de forma a criar um maior número de poros de tamanhos mais reduzidos, sem alterar a porosidade.

Neste caso a progressiva redução da condutividade hidráulica parece estar relacionada a fatores morfológicos em que ocorra uma alteração no tecido estrutural com aumento no número de microporos de menor diâmetro efetivo aumentando a tortuosidade do fluido percolante durante a infiltração. O Gráfico 5 apresenta os efeitos da quantidade de finos na condutividade hidráulica dos materiais estudados.

Gráfico 5 – Efeito da quantidade de finos na condutividade hidráulica.



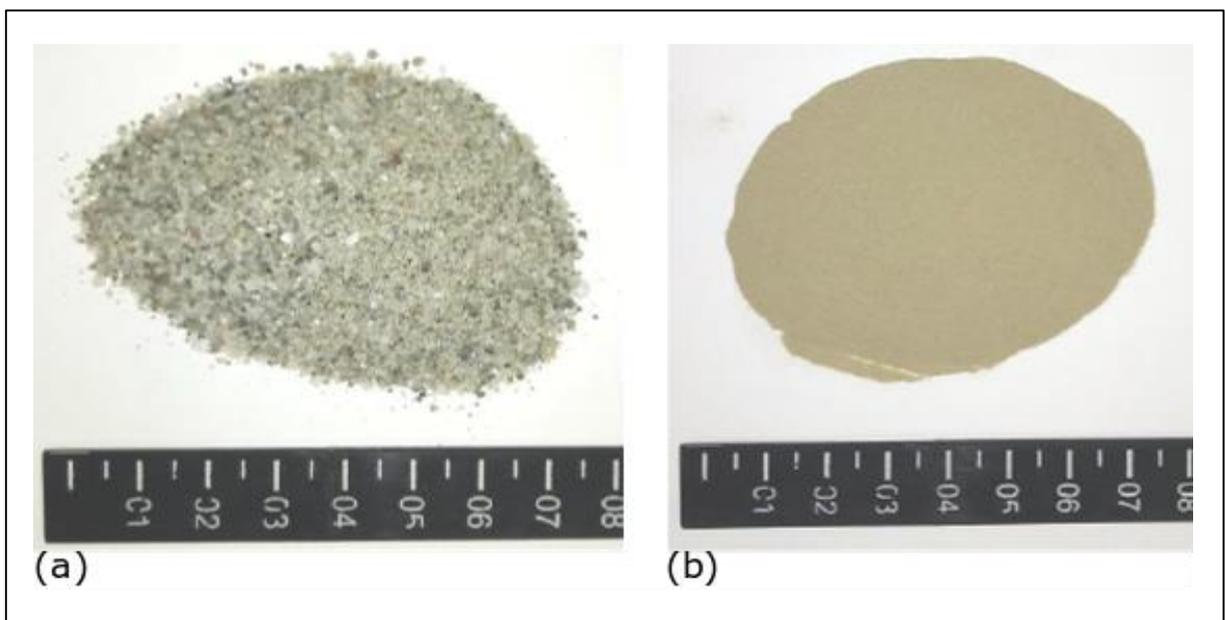
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Como pode-se observar, à medida que o teor de finos aumentou, houve uma redução da permeabilidade sob um ajuste exponencial, com influência podendo ser considerada relevante, partindo de $1,76 \times 10^{-6}$ m/s na amostra com menor teor de finos para $2,18 \times 10^{-8}$ m/s na amostra com maior teor de finos.

4.2 Caracterização química e mineralógica

Os resultados das análises químicas e mineralógicas serão discutidos conjuntamente para o resíduo grosso e o resíduo fino. A amostra de resíduo fino foi ensaiada a partir da fração passante na peneira #200 para análise de FRX e DRX, já a amostra de resíduo grosso não passou previamente por peneiramento principalmente devido sua granulometria. A Figura 11 apresenta as amostras ensaiadas.

Figura 11 – Resíduos caracterizados por FRX e DRX. (a) Resíduo grosso; (b) Resíduo fino.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A Tabela 9 exhibe o resultado do ensaio de FRX, respectivamente, do resíduo grosso e resíduo fino. Ambos materiais apresentam composição química similar, sendo composto por óxidos de cálcio, silício, alumínio e ferro em maiores proporções, com menores teores de óxidos de magnésio, potássio, manganês, titânio, enxofre, estrôncio, cobre, zinco e zircônio.

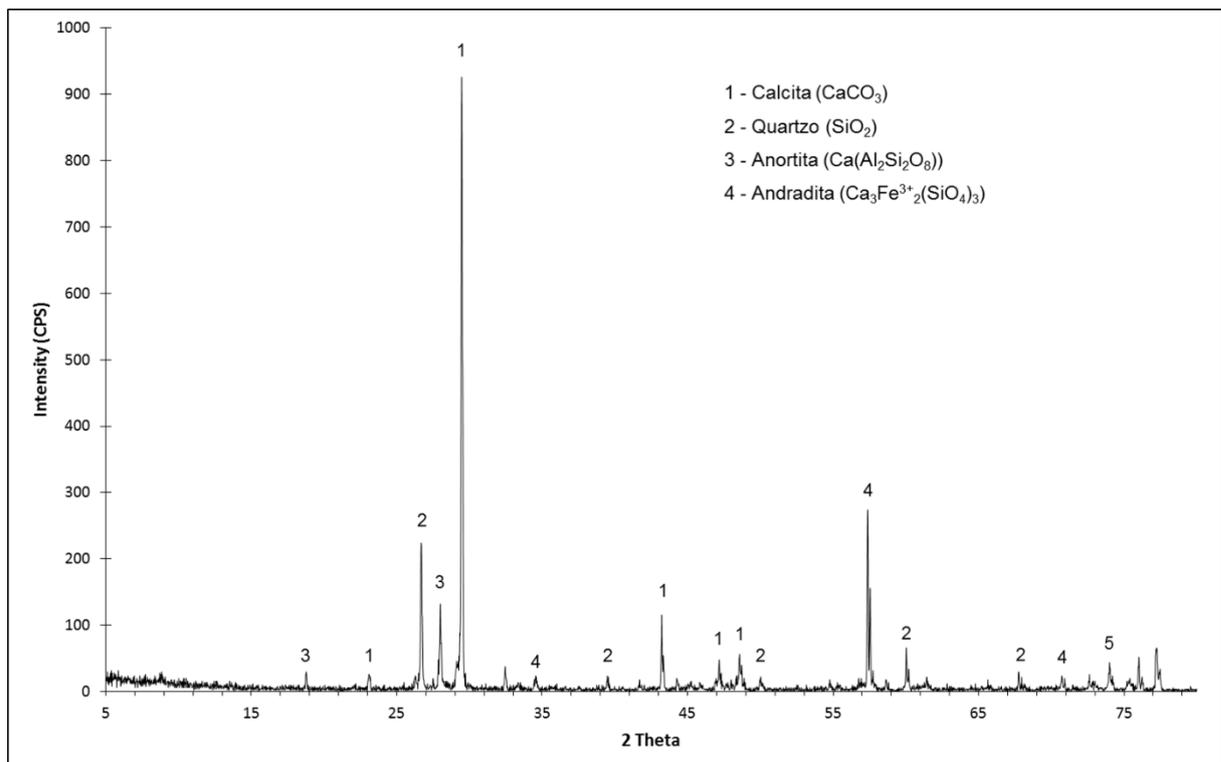
Tabela 9 – Resultados dos ensaios de FRX para os dois resíduos ensaiados.

Óxido	Resíduo grosso (%)	Resíduo fino (%)
CaO	46,46	38,85
SiO ₂	19,66	16,86
Al ₂ O ₃	7,02	12,38
Fe ₂ O ₃	5,92	11,94
MgO	1,66	2,00
K ₂ O	0,81	0,81
WO ₃	-	0,58
SO ₃	0,50	0,23
TiO ₂	0,37	0,61
MnO	0,36	0,62
SrO	0,21	0,21
CuO	0,02	0,11
ZnO	0,02	0,04
ZrO ₂	0,02	0,04
MoO ₃	-	0,03
Rb ₂ O	0,01	-
P.F.	16,97	14,69

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

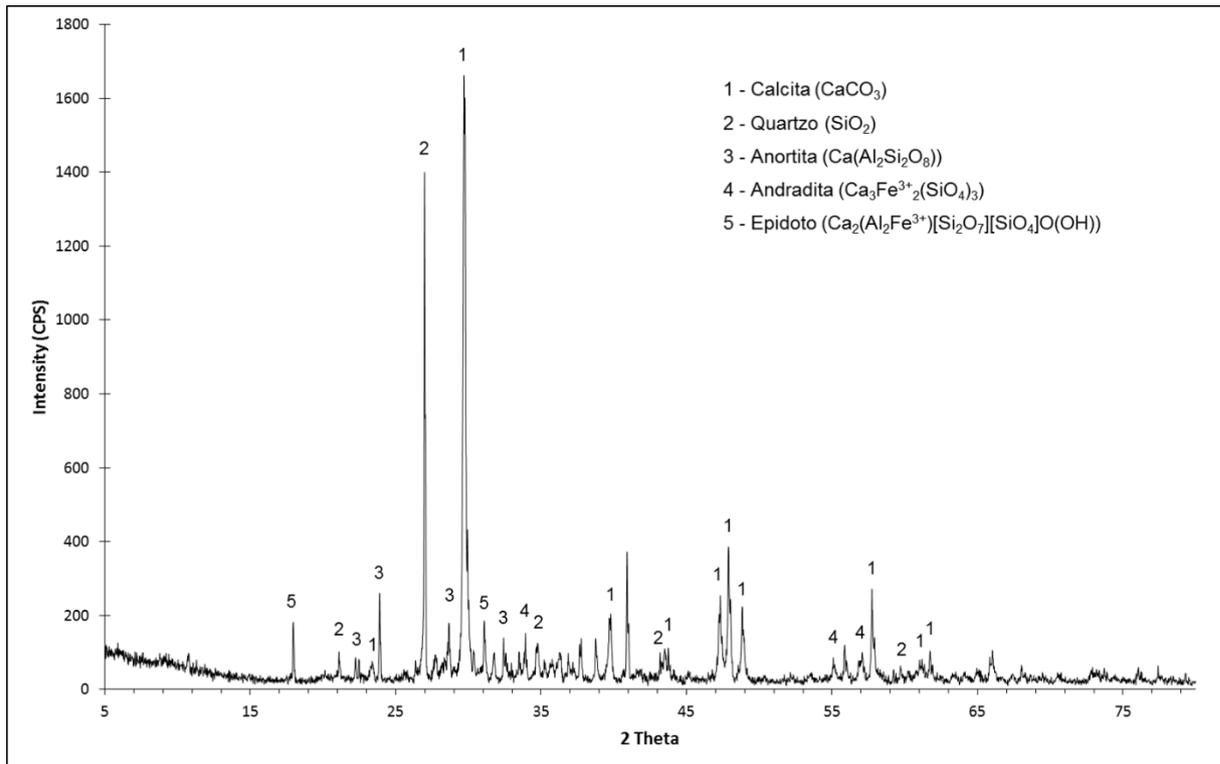
Nos Gráfico 6 e Gráfico 7 são apresentados os resultados da Difração de Raios-X em que são identificados os minerais componentes dois resíduos através da análises de pico no difratograma.

Gráfico 6 – DRX do resíduo grosso.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Gráfico 7 – DRX do resíduo fino.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Foram identificados picos correspondentes a calcita, quartzo, anortita e andradita, condizentes com o FRX que corrobora a existência de diferentes tipos de silicatos e por um carbonato de cálcio. Diferentemente de Gerab (2014), não foram identificadas a phlogopita, muscovita, grossulária e granada nas análises de DRX.

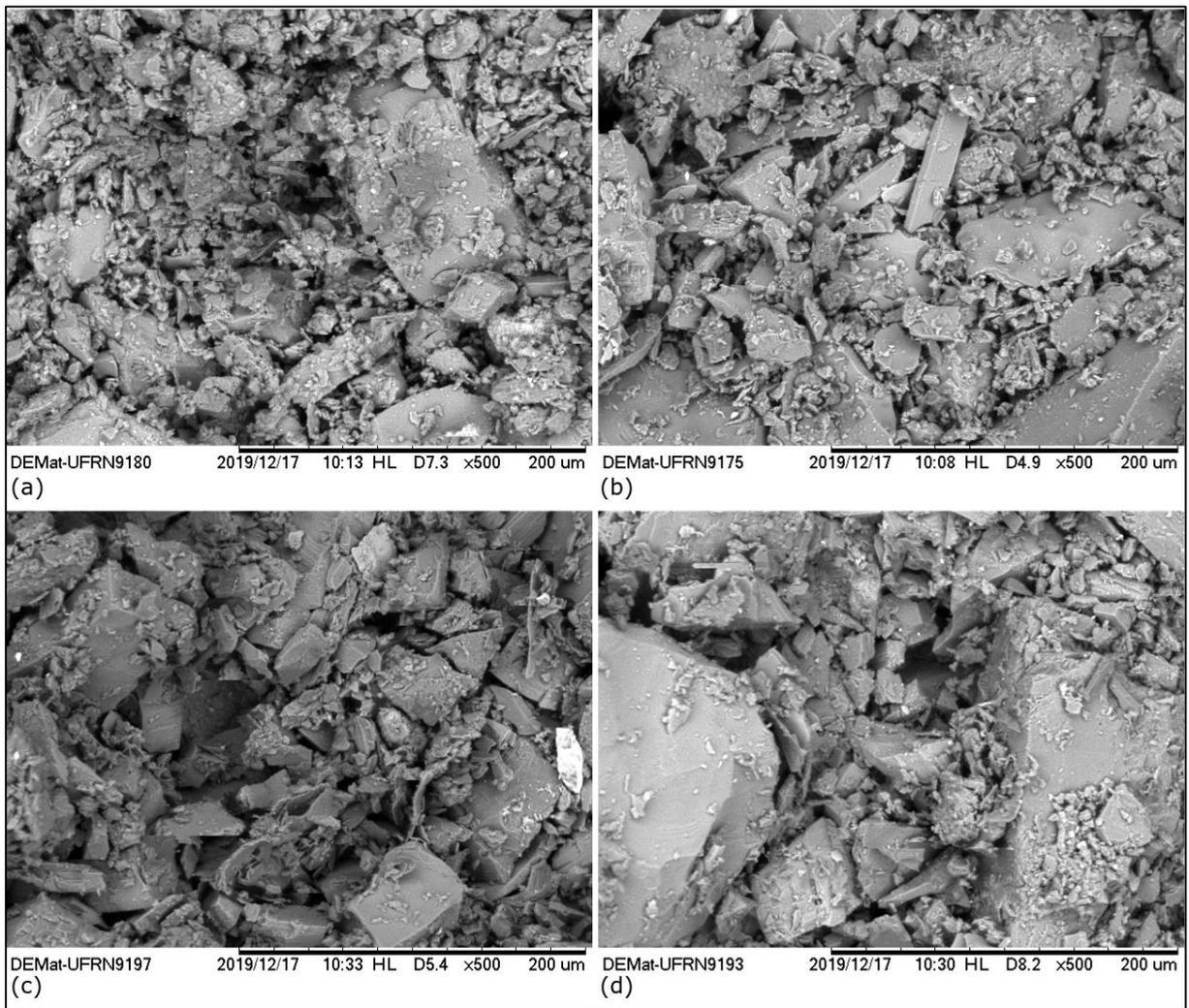
Por sua composição mineralógica, percebe-se que os resíduos fino e grossos são influenciados basicamente pelos mesmos minerais (calcita, quartzo, anortita e andradita). Por isso, a existência do carbonato de cálcio (calcita) e de silicáticos primários confere um comportamento geotécnico particular ao material, que difere-o do comportamento esperado para um solo pedologicamente formado por rochas cálcio-silicáticas (normalmente apresentando algum tipo de argilomineral correlacionado). A anortita (feldspato plagioclásio) e a andradita (granada) são minerais primários e demonstram o pouco intemperismo do material.

4.3 Caracterização morfológica

A Figura 12 mostra uma imagem de MEV com os quatro materiais ensaiados na condição compactada em 500 ampliações. É possível perceber a agregação entre grãos maiores

e menores, sobretudo na amostra de forma que as partículas menores apresentaram entrosamento com as partículas maiores, demonstrando que no tecido estrutural houve o preenchimento dos contatos entre grãos maiores pelos finos.

Figura 12 – MEV das amostras compactadas x500. (a) F100; (b) F75G25; (c) F50G50; (d) F25G75.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Este arranjo propiciou a formação de poros de menor diâmetro equivalente. Para a classificação dos poros pelo diâmetro equivalente (d_{eq}), utilizou-se como base as classificações propostas por Brewer (1964) apresentada pela Tabela 10.

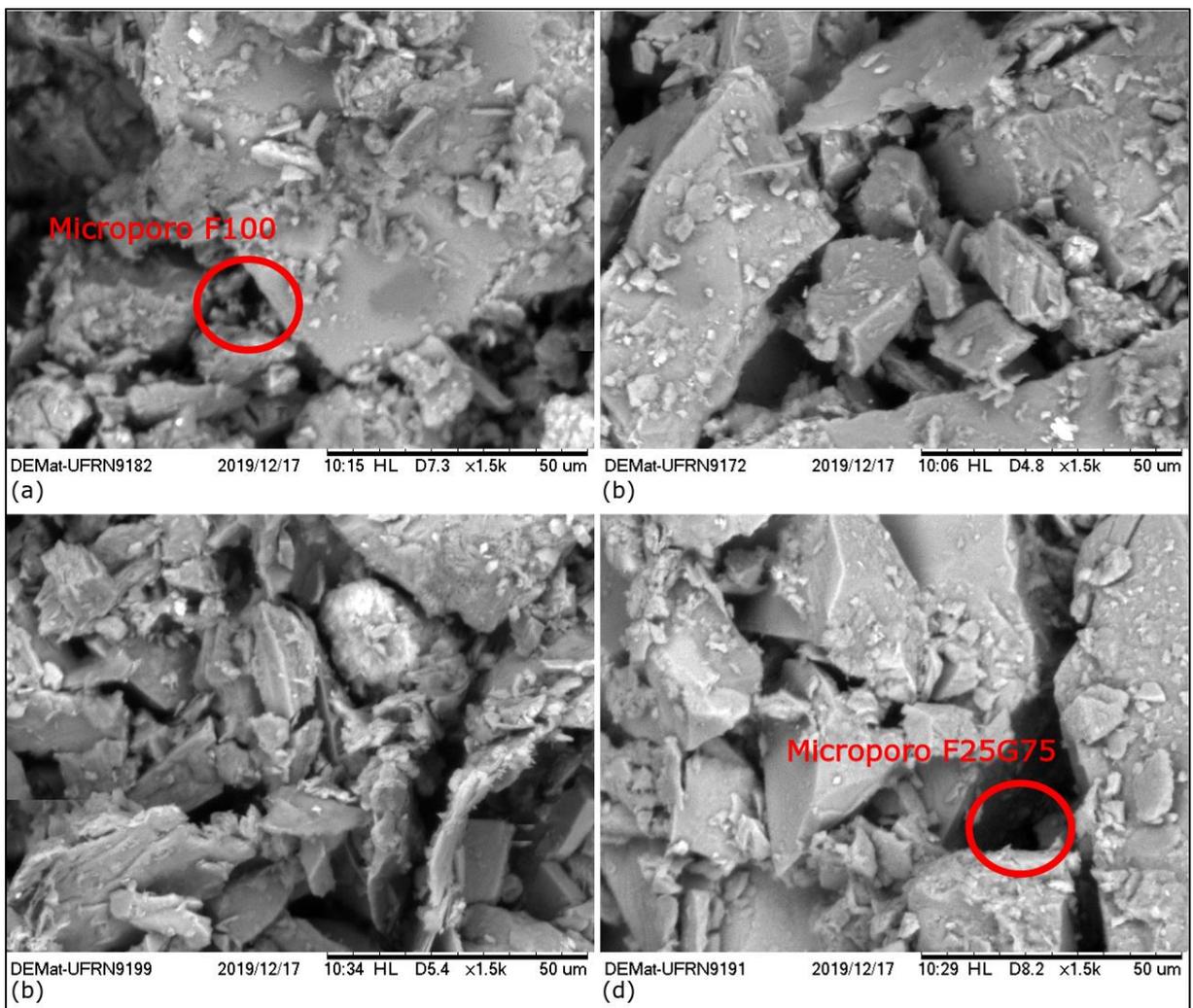
Tabela 10 – Classe de poros de acordo com o diâmetro equivalente dos poros.

Classe de poros	Diâmetro equivalente do poro(μm)
Macroporos	
Grandes	> 5.000
Médios	$5.000 - 2.000$
Pequenos	$2.000 - 1.000$
Muito pequenos	$1.000 - 74$
Mesoporos	$74 - 30$
Microporos	$30 - 6$
Ultramicroporos	$6 - 0,1$
Criptoporos	$< 0,1$

Fonte: Brewer (1996, p.182).

A Figura 13 apresenta uma ampliação de 1.500x para os mesmos materiais compactados da Figura 12.

Figura 13 – MEV das amostras compactadas x1500. (a) F100; (b) F75G25; (c) F50G50; (d) F25G75.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Para F100, uma boa predominância de partículas inferiores a 0,075 mm faz com que este material apresente um tecido estrutural diferenciado em comparação aos outros de forma que a predominância de ultramicroporos neste seja mais influente. Com uma análise a este nível de ampliação podemos identificar os maiores tamanhos de poros irregulares variando de cerca de 5,6 μm (em F25G75) a 1,6 μm (em F100). Assim, as classes de microporos maiores puderam ser percebidas com maior notoriedade nas amostras com menos porcentagem de finos, de maneira a corroborar que o aumento da permeabilidade tem relação com tortuosidade promovida pelo tecido estrutural. Para F100, uma boa predominância de partículas inferiores a 0,075 mm faz com que este material apresente um tecido estrutural diferenciado em comparação aos outros de forma que a predominância de ultramicroporos neste seja mais evidente.

4.4 Ensaios de erodibilidade

Neste item serão mostrados os resultados do estudo da erodibilidade interna apresentado para os materiais ensaiados em laboratório.

4.4.1 Ensaio de dispersão rápida (*crumb test*)

Neste ensaio optou-se para cada tipo de amostra realizar o ensaio em quatro diferentes condições a fim de avaliar a influência dos seguintes processos de umedecimento e secagem: imediatamente após compactação, imediatamente após umedecimento, imediatamente após secagem, imediatamente após um ciclo de umedecimento e secagem.

Conforme descrito na NBR 13601 (ABNT, 1996) atribui-se um grau para classificar cada torrão baseando-se na forma da dispersão do material no fundo e quanto a presença e nível de turvação da água. Os resultados de todos os ensaios encontram-se resumido no Quadro 3.

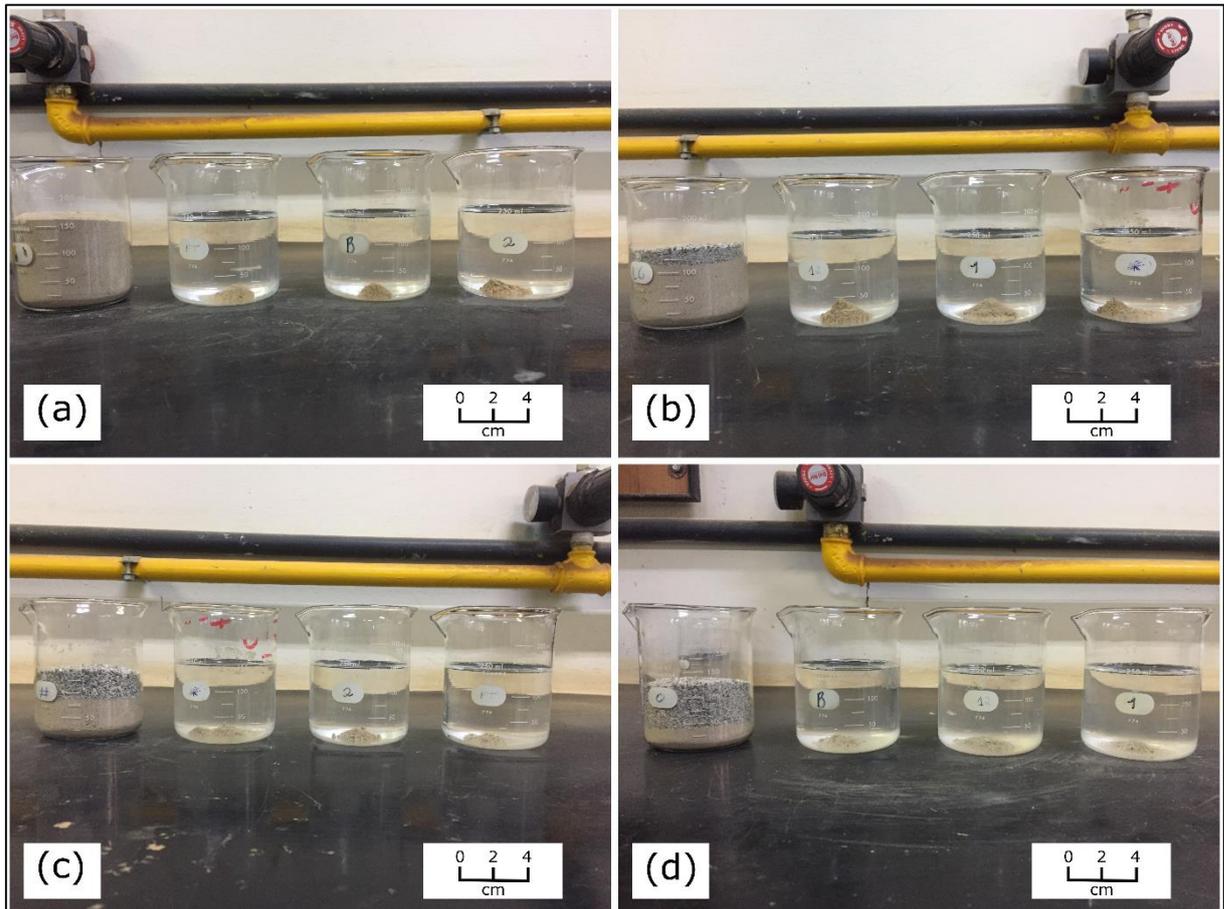
Quadro 3 – Classificação dos resíduos conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004).

Condição	Material			
	F100	F75G25	F50G50	F25G75
Compactado	Grau 1	Grau 1	Grau 1	Grau 2
Úmido	Grau 1	Grau 1	Grau 1	Grau 2
Seco	Grau 1	Grau 1	Grau 1	Grau 1
Ciclo de umedecimento e secagem	Grau 1	Grau 1	Grau 1	Grau 1

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Na Figura 14 são apresentados os resultados do ensaio de dispersão rápida para as amostras na condição úmida.

Figura 14 – Resultado do ensaio de *Crumb Test* com torrões úmidos: (a) F100; (b) F75G25; (c) F50G50; (d) F25G75.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Em princípio, o método não se destina a materiais de comportamento arenoso. Porém, em algumas amostras a fração finos inferiores a 0,002 mm é significativa (F100 e F75G25), assim a avaliação dos resultados desses ensaios são válidas.

Observa-se que em todas as amostras houve desprendimento das partículas externas ocorrendo desmoronamento nas laterais resultando na formação de uma pilha em volta da amostra. Apenas nas amostras referentes a F25G75 ensaiadas na condição compactada e úmida apresentaram um leve comportamento dispersivo com turvação nas proximidades da pilha de material. Acredita-se que tal ocorrência deve-se ao fato que esses torrões apresentaram mais facilidade em desagregar logo quando em contato com a água não sendo possível levar o torrão

íntegro até o fundo do becker. Os restantes das amostras não apresentaram comportamento dispersivo.

Durante o ensaio todos os corpos de prova esboroaram-se desagregando com facilidade. Embora o material F25G75 seja aquele de comportamento mais granular de todos, percebe-se que quando na condição seca, mesmo após ciclos de umedecimento e secagem, ele, assim como os outros, não apresenta potencial de dispersão tendo bons resultados mesmo para os materiais de comportamento arenoso.

4.4.2 Ensaio de desagregação

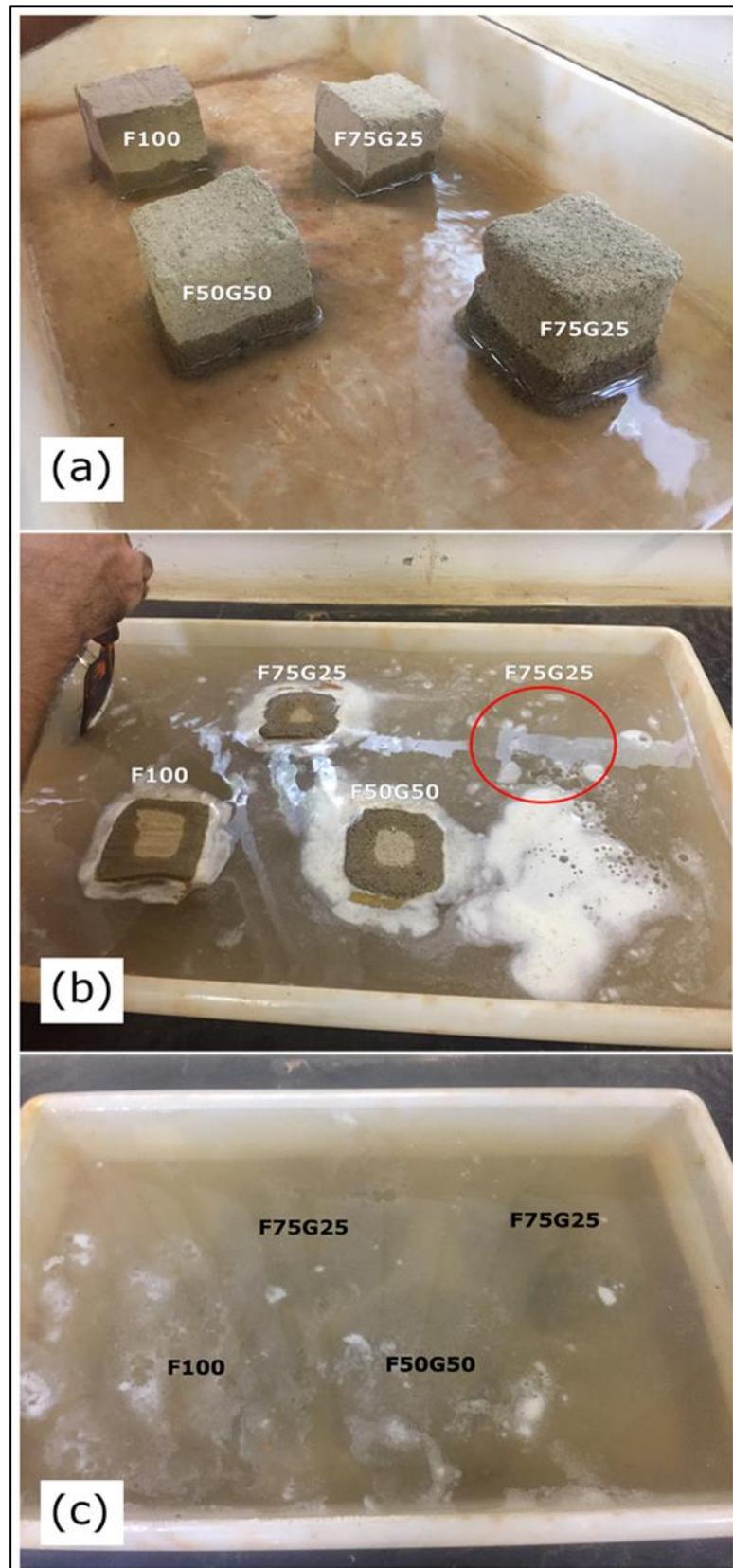
Os ensaios de desagregação foram realizados para os quatro materiais estudados a partir de CPs de 60 mm de lado. Esses CPs foram moldados a partir do cilindro de compactação na energia normal.

4.4.2.1 Ensaio de desagregação por imersão total

A Figura 15 apresenta os procedimentos realizados no ensaio de desagregação por imersão total para todas as amostras ensaiadas. Seguindo a metodologia de classificação de Holmgren e Flanagan (1997) *apud* Santos (1997), foi possível perceber durante o ensaio que a amostra F25G75 apresentou abatimento antes mesmo da submersão total, já as demais amostras apresentaram abatimento logo após a submersão total.

Imediatamente após a imersão todos os CPs haviam desagregado e houve a formação de uma quantidade de espuma na superfície da água, provavelmente devido à presença de bolhas de ar anteriormente oclusas e liberadas durante a desagregação. Acredita-se que a ocorrência da geração de pressões positivas no interior da amostra, geradas pela rápida submersão, tenha ocasionado uma elevação rápida da poropressão por mobilização do ar ocluso desagregando o material rapidamente. Ao término do período de ensaio (24 horas), as amostras permanecerão na mesma forma de pilha mostrando o resultado de abatimento.

Figura 15 – Procedimentos realizados no ensaio de desagregação por imersão total: (a) durante a submersão; (b) durante a submersão e desagregação de amostra F75G25; (c) após 24 horas de submersão.

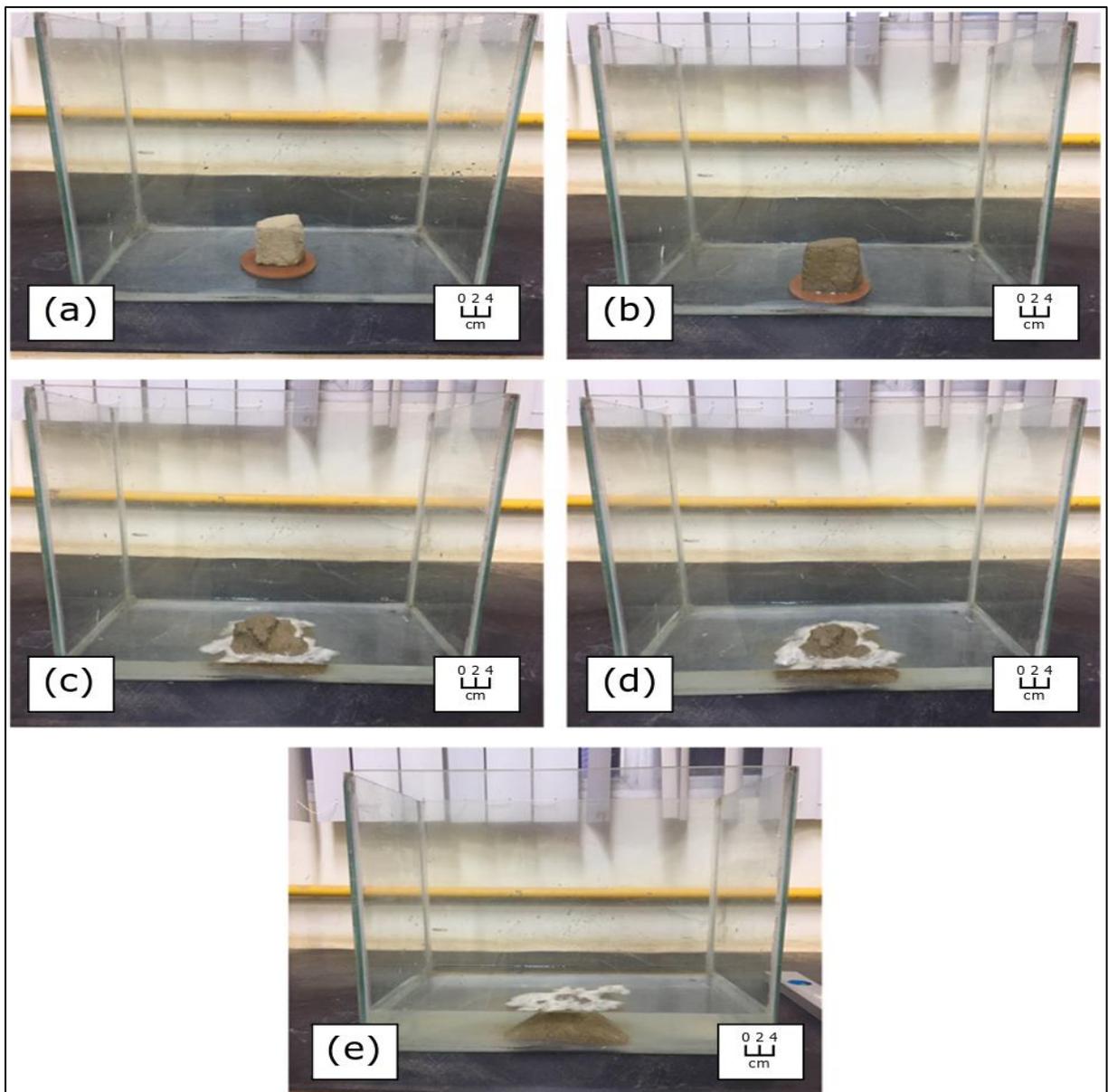


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4.4.2.2 Ensaio de desagregação por imersão parcial

Os resultados deste ensaio para todas as amostras ensaiadas foram similares. Durante a etapa de saturação por ascensão capilar não houve perdas de massa em nenhum material. Por outro lado, já no primeiro estágio de imersão, em que a lâmina de água se encontra a 1/3 da altura do corpo de prova, todas as amostras sofreram desagregação total de partículas a partir do aparecimento de fissuras que progrediram à fendas no topo do corpo de prova.

Figura 16 – Procedimentos realizados no ensaio de desagregação por imersão parcial: (a) amostra antes do ensaio; (b) saturação por capilaridade; (c) nível de água em 1/3 da altura da amostra; (d) nível de água em 2/3 da altura da amostra; (e) final do ensaio.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Antes mesmo da finalização do primeiro estágio todos materiais já se apresentavam em estado de completo de abatimento com formação de uma pilha de material desestruturado que foi mantido nos dois estágios subsequentes (2/3 da altura dos CPs e imersão total). A Figura 16 apresenta os estágios do ensaio de desagregação por imersão parcial realizado na amostra F75G25.

Analisando-se os resultados dos quatro materiais, pode-se observar que todas as amostras mostraram-se instáveis na presença de água. Sendo assim, acredita-se que os materiais parecem sofrer grande influência do fenômeno de abatimento, pois todas as amostras acabaram desagregando por ocorrência de rachaduras seguido do desprendimento de partículas durante a imersão.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse capítulo são apresentadas as conclusões obtidas com base nos resultados e análises realizadas nesse trabalho. São apresentadas ainda sugestões para futuras pesquisas envolvendo a aplicação dos resíduos da scheelita como cobertura final de aterros sanitários.

5.1 Conclusões

A potencialidade de emprego de materiais como barreira hidráulica em cobertura de aterros de RSU é sempre avaliada primordialmente quanto a sua eficiência na retenção do fluxo de água por uma camada impermeabilizante. Outras considerações quanto a textura dos grão componentes e teor de finos (partículas inferiores a 0,075mm) são de fundamental importância na aplicabilidade de um material com tal finalidade.

Neste aspecto, percebe-se que os materiais F100 e F75G25 atenderam os requisitos estabelecidos por distintas normativas e recomendações internacionais para emprego em camadas de coberturas superficiais como barreira hidráulica. Por outro lado, F50G50 e F25G75 não atingiram os critérios necessários quanto a condutividade hidráulica para emprego em coberturas de aterros de RSU, mas esses poderiam ser empregados dentro de uma cobertura com finalidades menos nobres como: camada de regularização e/ou de proteção.

Uma vez analisadas as condições de empregabilidade dos materiais estudados, a aplicação dos resíduos de mineração da mina Brejuí em cobertura de aterros sanitários denota uma das melhores soluções possíveis ao material, uma vez que atualmente não há uma destinação concreta em alguma atividade industrial e/ou de construção civil específica. Neste tipo de alternativa, contempla-se que a utilização desse material poderia dar-se nas proximidades da mina em qualquer aterro sanitário próximo.

As características físicas do material em que o teor de resíduo fino foi superior a 50% são condizentes com o tipo de aplicação proposta. E a composição mineralógica parecida entre os dois resíduos tende a manter o mesmo comportamento mineralógico das misturas compostas pelos dois materiais. Quanto as características geotécnicas dos materiais ensaiados, percebe-se que esses apresentaram um comportamento próprio se comparado a solos naturais. Este comportamento próprio deve-se ao tipo beneficiamento que a rocha mãe passa durante o beneficiamento na mina. Como são majoritariamente processos de desbaste, peneiramento e redução granulométrica faz-se com que esses resíduos conservem as características

mineralógicas da rocha não identificando minerais secundários fruto de processos de intemperismo.

No âmbito deste estudo, pode-se afirmar que o teor de finos influenciou decisivamente os parâmetros de permeabilidade obtidos, de forma que sua maior incidência tende a reduzir significativamente a condutividade hidráulica a padrões considerados ótimo. Essa mudança de condutividade hidráulica é devida às alterações da microestrutura do material compactado, forma dos grãos e tamanho dos poros existentes.

A pouca mudança na porosidade do material indica que não houve variação significativa no volume de vazios existente nas amostras ensaiadas, de forma que entre a amostra mais permeável e a menos permeável ocorreu uma alteração das classes dos poros existentes, passando da situação de poros de maior diâmetro efetivo para um maior número de poros de menor diâmetro efetivo, afetando assim a condutividade hidráulica por aumento da tortuosidade.

Na análise da erodibilidade interna os materiais ensaiados podem ser considerados como materiais facilmente desagregáveis, mas não dispersivos. A ocorrência de fácil desagregação pode ser devido a não plasticidade do material, o que não lhe confere coesão quando na situação saturada. Esses resultados podem indicar um potencial a ocorrência de fenômenos erosivos mas não necessariamente inviabilizaria o uso do material desde que cuidados especiais como a revegetação na camada superficial e proteção em camadas inferiores fossem tomados.

5.2 Sugestões para pesquisas futuras

- Realizar a mistura dos resíduos da scheelita com solos de comportamento mais argiloso a fim de avaliar o teor ideal de argila para que as melhores condições de plasticidade sejam alcançadas proporcionando um material mais estável sobre o ponto da ocorrência de fissuras e trincas e do potencial erosivo.

- Avaliar a viabilidade técnica e econômica no emprego de bentonita aos resíduos possibilitando a utilização de uma maior fração do resíduo grosso (maior quantidade de resíduo gerado na mina).

- Avaliar a permeabilidade do material para outros tipos de fluidos percolantes como água destilada ou até mesmo de um lixiviado orgânico para avaliar a influência destes sobre a percolação.

- Realizar ensaios de permeabilidade de duração prolongada para avaliar se há alteração dos valores de permeabilidade com o tempo.
- Recomenda-se estender o estudo sobre a erodibilidade interna e superficial dos materiais realizando ensaios quantitativos como o *Pinhole Test* e o ensaio de Inderbtzen.
- Modelagem de infiltração na camada com vista ao dimensionamento da espessura.

REFERÊNCIAS

American Society for Testing and Materials – ASTM. Standard test method for classification of soils for engineering purposes (unfield soil classification system): D2487. Philadelphia, 10 p., 2017.

American Society for Testing and Materials – ASTM. Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of porous material using a rigid-wall, compaction-mold permeameter: D5856. Philadelphia, 8 p., 1995.

American Society for Testing and Materials – ASTM. Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter: D5084. Philadelphia, 8 p., 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização: NBR 6457/16.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. Solo – Análise Granulométrica: NBR 7181/16.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. Solo – Determinação do limite de liquidez: NBR 6459/16.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. Solo – Determinação do limite de plasticidade: NBR 7180/16.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. Ensaio de Crumb Test: NBR 13601/96.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água: NBR 6508/17.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. Resíduos Sólidos - Classificação: NBR 10004/04.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável: NBR 14545/00.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. Solo – Ensaio de compactação: NBR 7182/16.

Danish Standards Association. Membranes for waste disposal facilities: DS INFO 466/1999.

ALBRIGHT, W. H., BENSON, C. H., APIWANTRAGOON, P. Field Hydrology of Landfill Final Covers with Composite Barrier Layers. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 139 (1), p. 1-12. 2013.

ALMEIDA, J. G. R. **Erodibilidade de solos tropicais não saturados nos municípios de Senador Canedo e Bonfinópolis – GO**. 2014. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

ANDRADE, S. S. F., BATISTA, L. S., MACHADO, W. S., MEDEIROS, J. K. S., SOUZA, T. L. Análise da viabilidade da utilização de resíduos da mineração para fins de pavimentação

com base na caracterização e avaliação mecânica. *In: CONRESOL, 2., 2019, Foz do Iguaçu. Anais [...]. 2019.*

BARROS, M. C. **Avaliação de um resíduo da construção civil beneficiado como material alternativo para sistema de cobertura.** 2005. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

BASTOS, C. A. B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados.** 1999. 303f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

BENSON C. H., CHEN J. N., EDIL T. B., LIKOS W. J. Hydraulic Conductivity of Compacted Soil Liners Permeated with Coal Combustion Product Leachates. **J Geotech Geoenviron Eng**, v. 144(4), p. 1-15 , 2018.

BENSON, C. G., ALBRIGHT, W. H., GEE, G. W., ABICHOU, T., ROESLER, A. C., ROCK, S. A. Examining the Alternatives. **Civil Engineering**, p. 70-75, 2003.

BENSON, C. G.; OTHMAN, M. A. Hydraulic and Mechanical Characteristics of a Compacted Municipal Solid Waste Compost. **Waste Management & Research**, v. 11, p. 127-142, 1993.

BENZAOUA M., FISET J. F., BUSSIÈRE B., VILLENEUVE M., PLANTE B. Sludge recycling within cemented paste backfill: Study of the mechanical and leachability properties. **Minerals Engineering**, v. 19, p. 420-432, 2006.

BOSCOV, Maria Eugenia Gimenez. **Geotecnia Ambiental.** São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

BREWER, R. **Fabric and mineral analysis of soils.** New York: John Wiley & Sons, 1964.

BUCHER K., GRAPES R. **Petrogeneses of metamorphic rocks.** Berlin: Ed. Springer, 2011.

CABALAR A. F., AKBULUT N. (2016) Evaluation of actual and estimated hydraulic conductivity of sands with different gradation and shape. v. 5 (1): 820, 2016.

CARVALHO, E. B., LIMA, R. F. S., PETTA, R. A., PAULO, J. B. A., DE SOUZA, L. C. Caracterização de rejeitos provenientes da usina de beneficiamento do minério da Mina Brejuí. *In: ENTMME, XIX., 2002, Recife. Anais [...]. 2002.*

CEDERGEN H. R. Seepage, drainage, and flownets, New York: 3rd edn. Wiley, 1989.

ÇELLEK S. Comparison of Grain Size Distribution and Grain Shape of Various Sand Samples. **Geotech Geol Eng**, v. 37, p. 5019-5033, 2019.

CIRÍACO DIAS, M. C. **Viabilidade do uso de solo tropical e resíduos de construção civil em sistemas de cobertura de aterro sanitário.** 2014. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

CLAYTON, C. R. I., ABBIREDDY, C. O. R., SCHIEBEL, R. A method of estimating the form of coarse particulates. **Geotechnique**, v. 59(6), p. 493-501, 2009.

COSTA, W. G. S. **Efeito da variação do gradiente hidráulico na estrutura de um solo compactado**. 2016. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Viçosa, Viçosa, 2016.

CRUZ, R. C. **Condutividade hidráulica em solos contaminados encapsulados**. 2004. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

CUISINIER O., AURIOL J. C., BORNE T., DENELEE D. Microstructure and hydraulic conductivity of a compacted lime-treated soil. **Engineering Geology**, v. 123, 187-193, 2011.

DANIEL, D.E. State-of-the-art: laboratory hydraulic conductivity tests for saturated soils. Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil. **ASTM STP 1142**, p. 30-78, 1994.

DANIEL D. E., BENSON C. H. Water content-density criteria for compacted soil liners. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 116, p. 1811-1830, 1990.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. Sumário Mineral: Tungstênio, 2014. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/tungstenio-sumario-mineral-2014>>. Acesso em: 14 de janeiro de 2020.

DOURADO, K. A. **Condutividade hidráulica de materiais de baixa permeabilidade: desenvolvimento, construção e teste de um sistema de medida**. 2003. 89 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

ECHEVERRI, J. **Aplicabilidade dos rejeitos de mineração de Ferro para a Utilização em Filtros de Barragens**. 2012. 112 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil, Brasília, 2012.

FOGED, N., BAUMANN, J. Clay membrane made of natural high plasticity clay: leachate migration due to advection and diffusion. **Engineering Geology**, v. 54 (2), p. 129-137, 1999.

FONSECA, A.M.M.C.C. Técnicas para previsão, prevenção e contenção da erosão em taludes e encostas. In: SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE O CONTROLE DE EROSÃO, 2., 1981, São Paulo/SP. Anais [...] 1981.

FRANCISCA, F. M., GLATSTEIN, D. A. Long term hydraulic conductivity of compacted soils permeated with landfill leachate. **Applied Clay Science**, v. 49, p. 187-193, 2010.

FREDERICIA, J., JØRGENSEN, P.R. Migration of nutrients, pesticides and heavy metal in fractured clayey till. **Geotechnique**, 1, p. 67-77, 1992.

FUENTES W. M., HURTADO C., LASCARRO C. On the influence of the spatial distribution of fine content in the hydraulic conductivity of sand-clay mixtures. **Earth Sci Res J**, v. 4, p. 239-249, 2018.

GERAB A. T. F. de S. C. **Utilização do resíduo grosso do beneficiamento da scheelita em aplicações rodoviárias.** 2014. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

GILBOY, G. The compressibility of sand-mica mixtures. **Proc ASCE**, v. 2, p. 555-568, 1928

GUYONNET, D., GAUCHER, E., GABORIAN, H., PONS, C. H., CLINARD, C., NOROTTE, V., DIDIER, G. Geosynthetic clay liner interaction with leachate: correlation between permeability, microstructure, and surface chemistry. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 131 (6), p. 740-749, 2005.

HEAD K. H. Manual of soil laboratory testing, London: John Wiley & Sons, v.3, 1986.

HEINECK, K. S. **Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis.** 2002. 275 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

HEINECK, K. S.; LEMOS, R. G.; FLORES, J. A. A.; CONSOLI, N. C. Influence of Particle Morphology on the Hydraulic Behavior of Coal Ash and Sand. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. B95, p. 107-124, 2002.

HERMSMEYER, D.; DIEKMANN, R.; VAN DER PLOEG, R. R.; HORTON, R. Physical Properties of a Soil Substitute Derived From an Aluminum Recycling by-product. **Journal of Hazardous Materials**, v. 28, p. 325-335, 2010.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. Economia Mineral do Brasil, Março, 2018. Disponível em: <<https://portaldaminerao.com.br/wp-content/uploads/2018/02/economia-mineral-brasil-mar2018-1.pdf?x73853>>. Acesso em: 14 de janeiro de 2020.

KOERNER, R. M. e DANIEL, D. E. **Final Covers for Solid Waste Landfills and Abandoned Dumps**, New York: ASCE PRESS, 1997.

KUOKKANEN, T., NURMESNIEMI, H., PÖYKIÖ, R., KUJALA, K., KAAKINEN, J., KUOKKANEN, M. Chemical and leaching properties of paper mill sludge. **Chemical Speciation & Bioavailability**, v. 20 (2), p. 111-122, 2008.

LAMBE, T.W. The structure of compacted clay. Journal of Soil Mechanics and Foundation. Engineering Division. **ASCE**, v.84, n.2, p. 1-35, 1958.

MACHADO T. G. **Estudo da adição de resíduo de scheelita em matriz cerâmica: formulação, propriedades físicas e microestrutura.** 2012. 143 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

MACIEL, F. J., JUCÁ, J. F. T. Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale Experimental Cell in Brazil. **Waste Management**, v. 31, p. 966-977, 2011.

MBONIMPA, M., MÉRDARD, B., DEMERS, I., BENZAAZOUA, M., BOIS, D., GAGNON, M. Preliminary Geotechnical Assessment of the Potencial Use of Mixtures of Soil

and Acid Mine Drainage Neutralization Sludge as Materials for the Moisture Retention Layer of Covers with Capillary Barrier Effects. **NRC Research Press**, v. 53, p. 828-838, 2016.

MESRI, G., OLSON, R. E. Mechanics Controlling the Permeability of Clays. **Clays and Clays Minerals**, vol. 19, p. 151-158, 1971.

MITCHELL, J. K., SOGA, K. **Fundamentals of Soil Behavior**, Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.

MITCHELL J. K., HOOPER D. R., CAMPANELLA R. G. Hydraulic conductivity of compacted clay. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v. 91, p. 41-65, 1965.

MORANDINI, T. L. C. **Condutividade hidráulica e compatibilidade em combinações de solo tropical e bentonita para uso em barreiras**. 2009. 171 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

MUDD G. M., CHAKRABARTI S., KODIRKARA J. Evaluation of engineering properties for the use of leached brown coal ash in soil covers. **Journal of Hazardous Materials A139**, p. 409-412, 2007.

OLSON, R. E., MESRI G. Mechanisms controlling the compressibility of clay. **J Soil Mech Found Div**, V. 96, p. 1863-1878, 1970.

PAIVA, E.H.G. **Avaliação do concreto de cimento Portland com resíduo da produção de scheelita em substituição ao agregado miúdo**. 2013. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

RAKOTONIMARO, T. V., NECULITA, C. M., BUSSIÈRE, B., BENZAAZOUA, M., ZAGURY, G. Recovery and Reuse of Sludge from Active and Passive Treatment of Mine Drainage-Impacted Waters: a review. **Environ Sci Pollut Res**, v. 24, p. 73-91, 2017.

SANTOS, C. R. **Análise paramétrica da infiltração e sua influencia na estabilidade de taludes em solo não saturado**. 2004. 118 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

SANTOS, R. M. M. **Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no municípios do Goiânia**. 1997. 120 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil, Brasília, 1997.

SANTOS, C. J. R., BATISTA, L. S., ASSIS, D. P. M., ANDRADE, S. S. F., LEAL, J. P. C. Estudo do comportamento mecânico de concreto para pavimento com substituição parcial do agregado miúdo natural por resíduo da scheelita. *In*: CONRESOL, 2., 2019, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. 2019.

SHERARD, J. L., DUNNIGAN L. P., DECKER, R. S. Identification and nature of dispersive soils. **Journal of Geotechnical Engineering Division**, 102(4), p. 287-301, 1976.

SILVA, A. L. A., BATISTA, L. S., ANDRADE, S. S. F., LEAL, J. P. C., COSTA, D. B. Estudo da reutilização de rejeito de scheelita em substituição do agregado miúdo na composição de misturas asfálticas. *In*: CONRESOL, 2., 2019, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. 2019.

SILVA, L. C. F., MARINHO, D. Y., SILVA FILHO, C. M., SILVA, E. C. S., ESPINOSA, J. W. M. Gestão de resíduos industriais: um estudo do aproveitamento de rejeito na mineração. *In*: SIMPROD, 9., 2017, Serjipe. **Anais [...]**. 2017.

SIVAPULLAIAH, P.V., SRIDHARAN, A., STALIN, V.K. Hydraulic conductivity of bentonite-sand mixtures. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 37 (2), p. 406–413, 2000.

SOUZA, R. A., MORAIS, A. D., FRANÇA, F. A. N., SANTOS JÚNIOR, O. F. Aplicação do Resíduo Fino do Beneficiamento da Scheelita em Obras Geotécnicas. *In*: COBRAMSEG, 18., 2016, Belo Horizonte. **Anais [...]**. 2016.

TERZAGHI K. **Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer grundlage**, Vienna: Deuticke, 1925.

TOUZE-FOLTZ, N., DUQUENNOI, C., GAGET, E. Hydraulic and mechanical behavior of GCLs in contact with leachate as part of a composite liner. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 24, p. 188-197, 2006.

U. S. Environmental Protection Agency – USEPA. Draft Technical Manual for Solid Waste Disposal Facility Criteria, 40 CFR, Parte 258, USEPA, Washington, 1992.

VUKOVIĆ, M., SORO, A. Determination of hydraulic conductivity of porous media from grain size distribution. **Water Resources Publications**, Littleton, Colorado, 1992.

YAMUSA B. Y., NOR ZURAIRAHETTY M. Y., KAMARUDIN A., NORHAN A. R., RADZUAN S. Effects of fines content on hydraulic conductivity and morphology of laterite soil as hydraulic barrier. **E3S Web of Conferences** 34, 01005, 2018.

ZIĘBA Z. Influence of soil particle shape on saturated hydraulic conductivity. **J Hydrol Hydromech**, v. 65, p. 80-87, 2017.