

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA, ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL

**PERMEABILIDADE DE SISTEMAS
COMPOSTOS DE RESÍDUOS DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO
RECICLADOS (RCD-R) E GEOTÊXTEIS
NÃO TECIDOS**

ALEXANDRE FARIA SEIXO DE BRITTO

D0225G20
GOIÂNIA – GO
2020

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: Dissertação Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

Nome completo do autor: Alexandre Faria Seixo de Britto

Título do trabalho: Permeabilidade de sistemas compostos de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) e geotêxteis não tecidos

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.

Alexandre Faria Seixo de Britto

Assinatura do(a) autor(a)

Ciente e de acordo:


Assinatura do(a) orientador(a)

Data: 24 / 03 / 2020.

ALEXANDRE FARIA SEIXO DE BRITTO

**PERMEABILIDADE DE SISTEMAS
COMPOSTOS DE RESÍDUOS DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO
RECICLADOS (RCD-R) E GEOTÊXTEIS
NÃO TECIDOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás para defesa e obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Eder C. G. Santos, M.Sc., D.Sc.

Coorientadora: Prof.^a Maria G. Gardoni Almeida, M.Sc., D.Sc.

D0225G20
GOIÂNIA – GO
2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Faria Seixo de Britto, Alexandre

Permeabilidade de sistemas compostos de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) e geotêxteis não tecidos [manuscrito] / Alexandre Faria Seixo de Britto. - 2020.
cxxviii, 128 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Eder Carlos Guedes dos Santos; co orientadora Dra. Maria das Graças Gardoni Almeida.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiânia, 2020.

Bibliografia.

Inclui siglas, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Resíduos de construção e demolição. 2. Reciclagem. 3. Permeabilidade. 4. Geotêxtil não tecido. 5. Tensões normais. I. Guedes dos Santos, Eder Carlos, orient. II. Título.

CDU 624.13



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº **225** da sessão de Defesa de Dissertação de **Alexandre Faria Seixo de Britto** que confere o título de Mestre(a) em **Geotecnia, Estruturas e Construção Civil**, na área de concentração em **Geotecnia**.

Ao/s **vinte e oito de fevereiro do ano de dois mil e vinte**, a partir da(s) **08:00**, no(a) **sala de reuniões do LABITECC da Escola de Engenharia Civil e Ambiental**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada **“Permeabilidade de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) sob tensão normal e associados a geotêxteis não tecidos”**. Os trabalhos foram instalados pelo(a) Orientador(a), Professor(a) Doutor(a) **Eder Carlos Guedes dos Santos (GECON/UFG)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor(a) Doutor(a) **João Paulo Souza Silva (GECON/UFG)**, membro titular interno; Professor(a) Doutor(a) **Paulo Márcio Fernandes Viana (UEG)**, membro titular externo, a participação do Professor(a) Doutor(a) **Eder Carlos Guedes dos Santos ocorreu por videoconferência**. Durante a arguição os membros da banca **fizeram** sugestão de alteração do título do **trabalho**. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação tendo sido(a) o(a) candidato(a) **aprovado(a)** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo(a) Professor(a) Doutor(a) **Eder Carlos Guedes dos Santos**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos **vinte e oito dias do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

Permeabilidade de sistemas compostos de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) e geotêxteis não tecidos.



Documento assinado eletronicamente por **Eder Carlos Guedes Dos Santos, Professor do Magistério Superior**, em 28/02/2020, às 11:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **ALEXANDRE FARIA SEIXO DE BRITTO, Discente**, em 28/02/2020, às 12:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Paulo Souza Silva, Professor do Magistério Superior**, em 28/02/2020, às 14:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Márcio Fernandes Viana, Usuário Externo**, em 28/02/2020, às 15:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

Processo:

23070.006314/2020-40

Documento:

1157486



[https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0)

[acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1157486** e o código CRC **ADCF1E5E**.

Referência: Processo nº 23070.006314/2020-40

SEI nº 1157486

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a Deus,
à minha família e aos meus amigos*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por sempre estar presente em minha vida, me dando oportunidades e abrindo caminhos que levam à sabedoria e conhecimento. Obrigado por me amparar e não deixar a minha fé diminuir, mesmo em momentos de extrema dificuldade, onde pensei em desistir pois não conseguiria, não seria capaz. O Senhor me capacitou em todos os momentos. Obrigado, meu Deus!

Ao professor Eder Santos, meu orientador, por toda dedicação, profissionalismo, conhecimento, paciência e por cada um dos ensinamentos transmitidos. Agradeço, também, pela oportunidade de fazer parte dos ensaios na UnB, oportunidade essa que me abriu portas para outras oportunidades. Obrigado por tudo, professor.

A professora Maria das Graças Gardoni, minha coorientadora, pela orientação dada e valiosa ajuda para a realização deste trabalho. Muito obrigado por tudo, professora.

Agradeço a todos os professores do PPG-GECON UFG, que contribuíram para a minha formação em nível de mestrado. Em especial destaco o professor Carlos Lauro, por todo apoio necessário na utilização do LabGEO e outras burocracias necessárias dentro da UFG, além dos vários conselhos que me serviram bastante. Destaco, também, o professor Maurício Sales, pelas brilhantes aulas, pelas ótimas conversas que tivemos e por todos os conselhos que me passou. A professora Lilian Rezende, por enxergar o mestrando como ser humano, sabendo das suas limitações, medos e anseios, e pelos conselhos dados.

Aos meus pais, Stela e Adriano, por me proporcionarem a oportunidade de estudar em tempo integral, ao amor e carinho de sempre, e pelo incentivo a caminhar sempre em frente e não deixar de sonhar. Obrigado por estarem ao meu lado sempre em todos os momentos.

Aos meus avós, Maria Conceição, Rubens, Marise e Jalles. Obrigado pelas orações, apoio, suporte, incentivo e carinho para conclusão desta e todas as etapas da minha vida.

A minha irmã Danielle, meu cunhado Matheus e meu afilhado Gabriel, por todo apoio, carinho e atenção dedicados em todos os momentos.

A minha namorada Arielly, por todo o incentivo e apoio para a conclusão desta dissertação. Agradeço, também, por toda a paciência e amor durante esses 2 anos. Não foi fácil, mas você sempre acreditou em mim e esteve ao meu lado.

A todos os colegas de mestrado, que se tornaram grandes amigos no decorrer deste período. Obrigado pelo companheirismo e união de todos, seja em momentos de descontração ou de aperto. Em especial, agradeço aos amigos Carlos Amaeing Junior, Eduardo Ferreira, Gabriel Silvestre, Jaqueline Souza, João Victor Guabiroba, Luiz Galvani Junior, Mailson Queiroz, Marcela Domiciano, Marcus de Castro, Paulo Cotrim, Priscila Oliveira, Romulo Machado e Sabrina Cabral que estiveram mais próximos a mim, me dando força em todos os momentos.

A todos os técnicos da UFG, em especial ao João Junior e Clayton, técnicos do Laboratório de Geotecnia (LabGEO), Walter, Antônio e Vitor do Laboratório de Inovação Tecnológica em Construção Civil (LABITECC), João do Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação (LAMAF), Ellen do Laboratório de Análises de Águas (LAnA), Tatiane e Nathany do Laboratório Multiusuário de Microscopia de Alta Resolução (LabMic) e Vinicius e Priscila, do Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (Crti).

Agradeço ao LabGEO pela infraestrutura oferecida para realização dos ensaios de caracterização, cisalhamento direto, permeabilidade. Agradeço ao LABITECC pelo auxílio prestado na utilização de equipamentos. Agradeço ao LAMAF pelas peças fabricadas para instalações necessárias na execução dos ensaios de permeabilidade. Agradeço ao LAnA pelas análises de água realizadas e pela disponibilidade. Agradeço ao LabMic por todo auxílio prestado na preparação de amostras para análise de imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Agradeço ao Crti pela execução das análises de imagens por MEV de maneira tão ágil e com tamanha qualidade.

Agradeço meu primo Pedro Henrique Azevedo, o Pepê, por ter me recebido tão bem durante os 3 meses que estive em Brasília desenvolvendo meus ensaios. Muito obrigado por tudo, primo. Agradeço também a tia Hélia e o tio Toninho pelo apoio.

Agradeço ao professor Ennio Marques Palmeira por todo apoio e suporte fornecido durante os 3 meses de ensaios nas instalações da Universidade de Brasília. A professora Michele Casagrande por abrir as portas do Laboratório de Geotecnia da UnB. Ao professor Márcio Muniz pelo uso do Laboratório de Infraestrutura Rodoviária (Infralab) da UnB. Ao professor Rafael Cerqueira por todo o apoio, juntamente com o professor Ennio Palmeira, no processo de candidatura ao doutorado no PPGG UnB

Agradeço a todos os mestrandos e doutorandos do PPGG UnB que me apoiaram durante minha estadia em Brasília, destacando Ana Carolina Pires, Débora Melo, Luiza Nicolato, Michael Vargas, Alonso González e Jullianny Pereira. O apoio de vocês foi fundamental para que fosse possível a realização desta dissertação.

Agradeço aos técnicos de laboratório da UnB que me ajudaram no desenvolvimento da pesquisa, em especial ao Arthur, Rogério e Saimo.

A meus amigos Walter Bonfim, Sérgio Henrique Mundim, João Pedro Sena, Victor Baldin, Altamiro Junior, Dyego Silva e professores Antover Sarmiento e Wanderlei Junior por toda a parceria desde os tempos de graduação na UFG – Regional Catalão.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado concedida durante esses 24 meses de mestrado, o que viabilizou a realização da pesquisa.

A Fundação de Apoio a Pesquisa da UFG (FUNAPE) pelo custeio de equipamentos e ensaios.

A Secretaria de Infraestrutura da UFG (SEINFRA) pelos trabalhos prestados no fornecimento de materiais e na montagem de instalações para ensaios no LabGEO.

A Renove Gestão e Solução em Resíduos por fornecer o material de pesquisa.

E a todos aqueles que, de algum modo, colaboraram para realização deste trabalho.

RESUMO

A prática de reciclagem pode ajudar a reduzir os impactos ambientais e proporciona materiais de qualidade e menor custo para aplicação na construção civil e geotecnia. Estudos mais recentes mostram a viabilidade de utilização desses materiais em estruturas de solo reforçado (ESR) com geossintéticos. Nesse cenário, grande parte desses estudos focam em investigações das propriedades físicas, mecânicas e químicas dos resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R). Porém, as propriedades hidráulicas desses materiais reciclados também são informações relevantes para o dimensionamento dessas estruturas, dado que o material de preenchimento deve garantir a drenagem do maciço reforçado. Nesse contexto, o principal objetivo desse trabalho consistiu em investigar as propriedades hidráulicas dos RCD-R simulando condições de campo (diferentes níveis de tensão normal), bem como sua associação à geotêxteis não tecidos (GTNT). Diante do enfoque geotécnico, foram realizados os ensaios de caracterização usualmente empregados em solos nas amostras de RCD-R (areia cinza e pó de entulho) coletadas numa usina de beneficiamento e, também, em uma areia natural de leito de rio utilizada como parâmetro de referência. Ensaio de permeabilidade à carga constante foram realizados nos RCD-R e areia natural, com e sem associação a GTNT de poliéster (PET), de diferentes massas por unidade de área (200 e 300 g/m²), e em diferentes níveis de tensão normal (0, 50, 100 e 200 kPa) aplicadas ao topo do permeâmetro. Após os ensaios de permeabilidade, realizou-se análise granulométrica do material exumado dos corpos de prova, de modo a investigar possíveis alterações. Também foram obtidas imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) nos GTNT exumados, a fim de avaliar a ocorrência de colmatção desses materiais sintéticos. Os resultados da caracterização geotécnica evidenciaram que os RCD-R apresentam características próximas às de solos granulares, com baixa variabilidade dos seus parâmetros geotécnicos. Observou-se que a aplicação de tensão no topo do permeâmetro reduziu a permeabilidade dos RCD-R e da areia natural, sem e com a associação aos GTNT, dado que as tensões aplicadas alteraram os vazios dos materiais, dificultando a passagem do fluxo d'água. A permeabilidade dos RCD-R e areia natural também reduziu quando associados ao GTNT com a aplicação de tensão. Verificou-se, por meio de granulometria a laser, alterações de granulometria distintas em diversos pontos do corpo de prova e entre os materiais pesquisados. As análises de imagens por MEV não mostraram evidências de colmatção dos GTNT. Concluiu-se que os RCD-R apresentaram propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas semelhantes à de materiais granulares, que possibilitam as suas aplicações em diversos tipos de obras geotécnicas, com a vantagem de serem materiais de preenchimento ambientalmente correto.

Palavras-chave: Resíduos de construção e demolição. Reciclagem. Permeabilidade. Geotêxtil não tecido. Tensões normais.

ABSTRACT

Recycling can help reduce environmental impacts, provides high quality construction materials and lower the cost of geotechnical works. Recently, studies have shown the feasibility of using these materials as backfill material in geosynthetic reinforced soil (GRS) structures. In this scenario, most of these studies focused on investigating the physical, mechanical and chemical properties of recycled construction and demolition waste (RCDW). However, the hydraulic properties of these recycled materials are also relevant information for the design of GRS structures, given that the filling material must be able to allow the drainage of the reinforced soil. In this context, the main objective of this work was to investigate the hydraulic properties of RCDW simulating field conditions (different levels of normal stress), as well as their association with nonwoven geotextiles (GTNW). Bearing in mind the geotechnical approach, RCDW (gray sand and rubble dust) were tested following the standard procedures usually performed on soils. Samples of RCDW (gray sand and rubble dust) were collected in a recycling plant and a natural sand was used as a reference material. Constant head permeability tests were carried out on RCDW and natural sand, associated or not with GTNW polyester (PET) with different masses per unit area (200 and 300 g / m²), and under different normal stress levels (0, 50, 100 and 200 kPa) applied to the specimen top. Granulometric analysis was carried out on material exhumed from the specimens in order to investigate any changes. Scanning electron microscopy (SEM) images were also obtained in the exhumed GTNW to assess the occurrence of clogging. The geotechnical characterization showed that RCDW presents characteristics similar to those of granular soils and with low variability. It was observed that the application of normal stress to the specimens top reduced the permeability of the RCDW and natural sand, when associated or not with the GTNW, once the applied stress altered the voids of the materials and so hindered the flow of water. The permeability of RCDW and natural sand also reduced when just associated with GTNW without the application of normal stress. Laser granulometric analysis revealed different granulometry alterations in different points along the specimen height and among the researched materials. The images by SEM did not show evidence of the GTNW clogging. The results showed that RCDW presented physical, mechanical and hydraulic properties similar to those of granular materials, which allow the application of these recycled materials in several types of geotechnical works, with the advantage of being environmentally friendly filling materials.

Keywords: Construction and demolition waste. Recycling. Permeability. Nonwoven geotextile. Normal stress.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Publicações acumuladas - modificada pelo autor (SILVA FILHO; SANTOS, 2014).	34
Figura 2.2 - Principais consumidores de agregados reciclados – modificada pelo autor (ABRECON, 2015).	35
Figura 2.3 - Curvas granulométricas de um RCD-R da usina de São Carlos-SP - (SANTOS, 2007).	37
Figura 2.4 - Curvas granulométricas dos RCD-R em Brasília-DF - (SANTOS, 2011).	37
Figura 2.5 - Curva granulométrica de um RCD-R da usina da Região Metropolitana de Recife- PE - (ARAÚJO NETO, 2017).	38
Figura 2.6 - Curva granulométrica de RCD-R do tipo ‘BGS grosso’ da usina de Aparecida de Goiânia-GO - (FLEURY, 2018).	39
Figura 2.7 - Curva granulométrica de RCD-R do tipo ‘BGS fino’ da usina de Aparecida de Goiânia-GO - (SILVESTRE, 2019).	39
Figura 2.8 - Permeabilidade dos RCD-R submetidos a fluxo de solução de poluentes - modificado pelo autor (RAHMAN et al. 2014).	44
Figura 2.9 - Mecanismos de colmatação de filtros geotêxteis – modificado pelo autor (PALMEIRA et al., 2005).	48
Figura 2.10 - Método de descrição da forma da curva granulométrica - modificado por Muñoz (2005) (KENNEY; LAU, 1985).	50
Figura 2.11 - Fluxograma para critério de dimensionamento de Lafleur para solos com granulometria ampla - modificado por Munõz (2005) (LAFLEUR, 1999).	51
Figura 2.12 - Cilindro porta-amostras construído para ensaio de filtração solo-geotêxtil - (GARDONI, 1995).	53
Figura 2.13 - Ensaio de filtração solo-geotêxtil do tipo Razão entre Gradientes (GR) - (GARDONI, 2000).	55
Figura 2.14 - Equipamento ensaio de permissividade - (GARDONI, 2000).	56
Figura 3.1 - Saco de areia lavada de granulometria média – (Próprio autor).	60
Figura 3.2 - Pontos de coleta de pó de entulho (PE 02) – (Próprio autor).	61

Figura 3.3 - Pontos de coleta na pilha de areia cinza - (Próprio autor).....	62
Figura 3.4 - Tipos de geotêxteis utilizados - (Próprio autor).....	63
Figura 3.5 - Traçado da malha para recorte dos espécimes de 300 mm x 300 mm - (MELO, 2018).	66
Figura 3.6 - GTNT com bordas impregnadas por silicone.	67
Figura 3.7 - Esquema do permeâmetro de Gardoni (2000) - (BESSA DA LUZ, 2004).....	67
Figura 3.8 - Permeâmetro de Gardoni (2000) - (Próprio autor).....	68
Figura 3.9 – Localização dos pontos de análise de imagens por MEV: a) face em contato com os materiais (RCD-R ou areia natural) e b) face em contato com o papel filtro (verso do GTNT) - (Próprio autor).	72
Figura 4.1 - Curvas de distribuição granulométrica da areia natural - (Próprio autor).....	74
Figura 4.2 - Curvas de distribuição granulométrica da areia cinza - (Próprio autor).	75
Figura 4.3 - Curvas de distribuição granulométricas (sem defloculante) do pó de entulho – (Próprio autor).....	77
Figura 4.4 - Coeficiente de variação do percentual passante em função da abertura da peneira (pó de entulho sem defloculante) – (Próprio autor).	77
Figura 4.5 - Curvas de distribuição granulométricas (com defloculante) do pó de entulho – (Próprio autor).....	79
Figura 4.6 - Coeficiente de variação do percentual passante em função da abertura da peneira (pó de entulho com defloculante) – (Próprio autor).....	79
Figura 4.7 - Resultados do Ensaio de Limite de Liquidez (LL) para o pó de entulho – (Próprio autor).	82
Figura 4.8 - Curva de compactação das amostra de pó de entulho – (Próprio autor).	83
Figura 4.9 - Índices de vazios máximo e mínimo da areia natural - (Próprio autor).	84
Figura 4.10 - Índices de vazios máximo e mínimo da areia cinza - (Próprio autor).....	85
Figura 4.11 - Curva Tensão vs. Deslocamento do ensaio de cisalhamento direto para PE 06 – (Próprio autor).....	86

Figura 4.12 - Curva Deslocamento Vertical vs. Deslocamento Horizontal do ensaio de cisalhamento direto para PE 06 - (Próprio autor).....	86
Figura 4.13 - Envoltória de resistência da amostra PE 06 - (Próprio autor).....	87
Figura 4.14 - Permeabilidade da areia natural - (Próprio autor).....	88
Figura 4.15 - Compacidade relativa da areia natural no ensaio de permeabilidade a carga constante - (Próprio autor).....	89
Figura 4.16 - Permeabilidade da areia cinza - (Próprio autor).....	90
Figura 4.17 - Compacidade relativa da areia cinza no ensaio de permeabilidade a carga constante - (Próprio autor).....	90
Figura 4.18 - Permeabilidade do pó de entulho - (Próprio autor).....	91
Figura 4.19 - Grau de compactação do pó de entulho no ensaio de permeabilidade a carga constante - (Próprio autor).....	92
Figura 4.20 - Permeabilidade dos materiais - (Próprio autor).....	94
Figura 4.21 - Critério de Kenney e Lau (1985) aplicado a areia natural - (Próprio autor).....	95
Figura 4.22 - Permeabilidade da areia natural associada aos geotêxteis - (Próprio autor).....	96
Figura 4.23 - Compacidade relativa da areia natural associada aos geotêxteis no ensaio de permeabilidade a carga constante - (Próprio autor).....	96
Figura 4.24 - Critério de Kenney e Lau (1985) aplicado à areia cinza - (Próprio autor).....	98
Figura 4.25 - Permeabilidade da areia cinza associada aos geotêxteis - (Próprio autor).....	99
Figura 4.26 - Compacidade relativa da areia cinza associada aos geotêxteis no ensaio de permeabilidade a carga constante - (Próprio autor).....	99
Figura 4.27 - Critério de Kenney e Lau (1985) aplicado ao pó de entulho - (Próprio autor).....	101
Figura 4.28 - Permeabilidade do pó de entulho associado aos geotêxteis - (Próprio autor).....	102
Figura 4.29 - Grau de compactação do pó de entulho associado aos geotêxteis no ensaio de permeabilidade a carga constante - (Próprio autor).....	102
Figura 4.30 - Permeabilidade de todos os materiais associados aos geotêxteis - (Próprio autor).....	103

Figura 4.31 – Diferença granulométrica (% INICIAL – % FINAL) da areia natural após ensaio de permeabilidade – (Próprio autor).	105
Figura 4.32 – Diferença granulométrica (% INICIAL – % FINAL) da areia cinza após ensaio de permeabilidade – (Próprio autor).	107
Figura 4.33 - Diferença granulométrica (% INICIAL – % FINAL) do pó de entulho após ensaio de permeabilidade - (Próprio autor).	109
Figura 4.34 - Imagens amostra virgem de GTNT ₂₀₀	111
Figura 4.35 - EDS das partículas encontradas na amostra virgem.....	112
Figura 4.36 - Imagens GTNT ₂₀₀ associado à areia natural nas tensões de 0 e 200 kPa - (Próprio autor).	113
Figura 4.37 - EDS da areia natural - (Próprio autor).	114
Figura 4.38 - Imagens GTNT ₂₀₀ associado à areia cinza nas tensões de 0 e 200 kPa - (Próprio autor).	115
Figura 4.39 - EDS da areia cinza	117
Figura 4.40 - Imagens GTNT ₂₀₀ associado ao pó de entulho nas tensões de 0 e 200 kPa - (Próprio autor).	118
Figura 4.41 - EDS do pó de entulho.....	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Coleta de RCD por região - modificada pelo autor (ABRELPE, 2016, 2017). ...	33
Tabela 2.2 - Autores que realizaram caracterização geotécnica de RCD-R - (Próprio autor).	36
Tabela 2.3 - Resumo de resultados de ensaio de compactação - (Próprio autor).....	40
Tabela 2.4 - Resumo de resultados de ensaio de cisalhamento direto - (Próprio autor).	41
Tabela 2.5 - Informações sobre estudos de permeabilidade em RCD-R – (Próprio autor).....	43
Tabela 3.1 - Cronograma de coletas realizadas – (Próprio autor).	61
Tabela 3.2 - Principais propriedades dos geotêxteis não tecidos fornecidas pelo fabricante (MELO, 2018) – modificado pelo autor.	63
Tabela 3.3 - Normas empregadas na caracterização geotécnica do pó de entulho, areia cinza e da areia natural - (Próprio autor).	64
Tabela 3.4 - Relação de ensaios de permeabilidade à carga constante – (Próprio autor).....	69
Tabela 3.5 - Resultados das análises de água - (Próprio autor).....	71
Tabela 4.1 - Frações granulométricas da areia natural - (Próprio autor).....	74
Tabela 4.2 - Propriedades granulométricas da areia natural - (Próprio autor).	74
Tabela 4.3 - Frações granulométricas da areia cinza, segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995a) - (Próprio autor).	75
Tabela 4.4 - Propriedades granulométricas da areia cinza - (Próprio autor).....	76
Tabela 4.5 - Frações granulométricas (sem defloculante) do pó de entulho, segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995a) – (Próprio autor).....	78
Tabela 4.6 - Propriedades granulométricas do pó de entulho (sem defloculante) - (Próprio autor).....	78
Tabela 4.7 - Frações granulométricas (com defloculante) do pó de entulho, segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995a) – (Próprio autor).....	80
Tabela 4.8 - Propriedades granulométricas do pó de entulho (com defloculante) - (Próprio autor).....	80
Tabela 4.9 - Massa específica dos sólidos do pó de entulho – (Próprio autor).	81

Tabela 4.10 - Índices de consistência do pó de entulho – (Próprio autor).....	82
Tabela 4.11 - Resumo dos ensaios de compactação do pó de entulho – (Próprio autor).....	83
Tabela 4.12 - Resultados do ensaio de determinação de índice de vazios máximo para areia natural - (Próprio autor).	84
Tabela 4.13 - Resultados do ensaio de determinação de índice de vazios mínimo para areia natural - (Próprio autor).	84
Tabela 4.14 - Resultados do ensaio de determinação de índice de vazios máximo para areia cinza - (Próprio autor).....	85
Tabela 4.15 - Resultados do ensaio de determinação de índice de vazios mínimo para areia cinza - (Próprio autor).	85
Tabela 4.16 - Resumo dos resultados obtidos no ensaio de permeabilidade da areia natural - (Próprio autor).....	89
Tabela 4.17 - Resumo dos resultados obtidos no ensaio de permeabilidade da areia cinza - (Próprio autor).....	90
Tabela 4.18 - Resumo dos resultados obtidos no ensaio de permeabilidade do pó de entulho - (Próprio autor).....	92
Tabela 4.19 - Critérios de Lafleur (1999) para GTNT associado a AN - (Próprio autor).	97
Tabela 4.20 - Resumo dos resultados obtidos no ensaio de permeabilidade da areia natural associada aos geotêxteis - (Próprio autor).....	97
Tabela 4.21 - Resumo dos resultados obtidos no ensaio de permeabilidade da areia cinza associada aos geotêxteis - (Próprio autor).....	100
Tabela 4.22 - Critérios de Lafleur (1999) para GTNT associado a AC - (Próprio autor).....	100
Tabela 4.23 - Resumo dos resultados obtidos no ensaio de permeabilidade do pó de entulho associado aos geotêxteis - (Próprio autor).	103

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRECON	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção e Demolição
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AC	Areia cinza
AN	Areia natural
APHA	<i>American Public Health Association</i>
ARA	Agregado reciclado de asfalto
ARC	Agregado reciclado de concreto
ART	Agregado reciclado de tijolos
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BBP	<i>Bubble point test</i>
BGS	Brita graduada simples
BS	<i>British Standard</i>
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COMURG	Companhia de Urbanização de Goiânia
Crti	Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação
EDS	<i>Energy dispersive x ray spectroscopy</i>
EECA	Escola de Engenharia Civil e Ambiental
ESR	Estrutura de solo reforçado
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
GP-GM	Pedregulho mal graduado com areia e silte
GW	Pedregulho bem graduado
GW-GM	Pedregulho bem graduado com areia e silte
GR	<i>Gradient Ratio</i>
GTNT	Geotêxtil não-tecido

ICC	Indústria da construção civil
INFRALAB	Laboratório de Infraestrutura
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LAnA	Laboratório de Análise de Água
MCT	Miniatura, Compactado, Tropical
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
PE	Pó de entulho
PET	Poliéster
PP	Polipropileno
PMGIRS	Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Município de Goiânia
RCD	Resíduos de construção e demolição
RCD-R	Resíduos de construção e demolição reciclados
SAGEOS	<i>Geosynthetics Technology Center</i>
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
SW	Areia bem graduada
SW-SM	Areia bem graduada com silte e pedregulho
UFG	Universidade Federal de Goiás
UnB	Universidade de Brasília

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Massa específica dos sólidos
$\rho_{dm\acute{a}x}$	Massa específica seca máxima
ρ_w	Massa específica do fluido
ρ_f	Densidade das fibras do geotêxtil
ρ_s	Densidade das partículas de solo
τ	Tensão de cisalhamento
δ_H	Deslocamento horizontal
δ_V	Deslocamento vertical
β	Fator de forma
C_C	Coefficiente de curvatura
CRf	Compacidade relativa final
CRi	Compacidade relativa inicial
C_U	Coefficiente de uniformidade
d_f	Diâmetro das fibras do geotêxtil
d_s	Diâmetro das partículas de solo (assumidas esféricas) dentro do geotêxtil
d_I	Diâmetro indicativo do solo-base a ser protegido
D_s	Diâmetro efetivo das partículas
$e_{m\acute{a}x}$	Índice de vazios máximo
$e_{m\acute{i}n}$	Índice de vazios mínimo
g	Aceleração da gravidade (9,81 m/s ²)
GCI	Grau de compactação inicial
GCF	Grau de compactação final
IP	Índice de plasticidade
k	Coefficiente de permeabilidade
k_{20}	Coefficiente de permeabilidade à água a 20°C

k_n	Coeficiente de permeabilidade normal ao plano do geossintético
k_{GT}	Coeficiente de permeabilidade do geotêxtil
k^*	Coeficiente de permeabilidade do geotêxtil parcialmente colmatado
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
M_A	Massa por unidade de área
M_f	Massa das fibras do geotêxtil
M_s	Massa das partículas de solo no geotêxtil
n_{GT}	Porosidade do geotêxtil sem considerar a presença das partículas
t_{GT}	Espessura do geotêxtil
$w_{ót}$	Umidade ótima
η_w	Viscosidade dinâmica do fluido
ψ	Permissividade
λ	Nível de impregnação do geotêxtil
ξ	Parâmetro adimensional que pode ser obtido pela calibração com dados de ensaio
ϕ	Ângulo de atrito
GR	Razão entre gradientes
GR_{Mod}	Razão entre gradients modificada
$i_{7/9}$	Gradiente hidráulico entre os piezômetros 7 e 9
$i_{9/12}$	Gradiente hidráulico entre os piezômetros 9 e 12
$i_{10/12}$	Gradiente hidráulico entre os piezômetros 10 e 12
$i_{11/12}$	Gradiente hidráulico entre os piezômetros 11 e 12
O_f	Abertura de filtração do geotêxtil
O_{95}	Abertura de filtração do geotêxtil
R_R	Índice de retenção

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	INTRODUÇÃO	27
1.1	JUSTIFICATIVA	27
1.2	OBJETIVOS	28
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	28
CAPÍTULO 2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1	RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)	31
2.1.1	Geração de Resíduos de Construção e Demolição (RCD)	32
2.1.2	Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição (RCD)	33
2.1.3	A reciclagem de RCD na Região Metropolitana de Goiânia-GO	35
2.2	CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DE RCD-R PARA USO EM SOLO REFORÇADO COM GEOSSINTÉTICOS	36
2.3	PERMEABILIDADE DOS RCD-R	41
2.4	GEOTÊXTEIS	44
2.4.1	Ensaio de Permissividade (permeabilidade normal ao plano)	45
2.4.2	Abertura de filtração	47
2.4.3	Critérios de filtro	48
2.5	Utilização de geotêxteis como filtros	52
CAPÍTULO 3	MATERIAIS E MÉTODOS	59
3.1	MATERIAIS	59
3.1.1	Areia Natural	59
3.1.2	Resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R)	60
3.1.3	Geotêxtil não tecido (GTNT)	62
3.2	MÉTODOS	63
3.2.1	Caracterização geotécnica do Pó de Entulho, Areia Cinza e Areia Natural	63
3.2.2	Preparação das amostras de geotêxtil	64

3.2.3	Ensaio de permeabilidade a carga constante	67
3.2.4	Ensaio de granulometria após o ensaio de permeabilidade à carga constante ..	69
3.2.5	Ensaio para análise de água utilizada nos ensaios de permeabilidade à carga constante	70
3.2.6	Ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e de Espectroscopia de raios x por dispersão em energia (EDS).....	71
CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....		73
4.1.	CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DOS MATERIAIS.....	73
4.1.1.	Análise Granulométrica	73
4.1.2.	Massa Específica dos Sólidos.....	80
4.1.3.	Limites de Consistência.....	81
4.1.4.	Compactação.....	82
4.1.5.	Índices de Vazios Máximo e Mínimo	83
4.1.6.	Cisalhamento Direto.....	85
4.2.	ENSAIOS DE PERMEABILIDADE SEM GEOTÊXTIL	87
4.2.1.	Ensaio de Permeabilidade da Areia Natural	88
4.2.2.	Ensaio de Permeabilidade da Areia Cinza	89
4.2.3.	Ensaio de Permeabilidade do Pó de Entulho.....	91
4.2.4.	Comparativo entre as permeabilidades dos materiais reciclados e a areia natural	92
4.3.	ENSAIOS DE PERMEABILIDADE COM GEOTÊXTIL	94
4.3.1.	Ensaio de Permeabilidade da Areia Natural	94
4.3.2.	Ensaio de Permeabilidade da Areia Cinza	97
4.3.3.	Ensaio de Permeabilidade do Pó de Entulho.....	100
4.4.	ENSAIOS DE GRANULOMETRIA NO GRANULÔMETRO A LASER	103
4.5.	ENSAIO DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) E ESPECTROSCOPIA DE RAIOS X POR DISPERSÃO EM ENERGIA (EDS).....	110
CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES.....		121

5.1. CONCLUSÕES	121
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	122
REFERÊNCIAS	123

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A reciclagem de RCD tem sido empregada há décadas nos países desenvolvidos, e mostra-se uma alternativa interessante para a gestão desses resíduos, pois, de imediato, reduz a sua deposição em locais inadequados e produz um novo tipo de agregado – os agregados reciclados. Tal prática também gera uma série de impactos positivos no âmbito socioeconômico, pois diminui a proliferação de doenças e cria toda uma nova cadeia de produção de novos empregos.

Em obras geotécnicas, esses materiais reciclados têm sido empregados com sucesso principalmente em pavimentação e aterros, dadas as suas vantagens econômicas e ambientais. Nesse contexto, o uso de geossintéticos também tem apresentado uma série de vantagens técnicas, econômicas e ambientais, uma vez que esses materiais sintéticos possibilitam a construção de obras mais seguras, com menor custo e com redução de uso de matéria prima.

Com o propósito de unir os pontos positivos desses materiais (RCD-R e geossintéticos) várias pesquisas vem sendo realizadas investigando o emprego desse compósito em obras de pavimentação (RAHMAN *et al.*, 2014), aterros sobre solos moles (ALKHORSHID *et al.*, 2019) e, mais recentemente, em ESR (SANTOS; PALMEIRA; BATHURST, 2013; VIEIRA; PEREIRA, 2015).

1.1 JUSTIFICATIVA

Apesar da importância dos estudos investigando o emprego de RCD-R em ESR, observa-se que tais estudos têm demonstrado um enfoque nas propriedades físicas, mecânicas e químicas desses materiais, deixando as propriedades hidráulicas em segundo plano. No entanto, vale ressaltar que as normas internacionais BS 8006 (2010) e FHWA (2009) recomendam o emprego de um material de preenchimento que permita a livre drenagem do maciço reforçado, e, assim, faz-se necessário conhecer seu comportamento hidráulico dos RCD-R.

Neste contexto, esta pesquisa visa apresentar as propriedades hidráulicas dos RCD-R e o seu comportamento hidráulico quando associados a geotêxteis não tecidos em condição de campo, de modo que essa associação seja feita de maneira correta, atendendo às recomendações de normas, para que o compósito tenha um desempenho satisfatório e seguro.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo principal analisar a permeabilidade de RCD-R produzidos numa usina de beneficiamento e avaliar os efeitos, nesse parâmetro, quando submetidos a tensões normais e associados a geotêxtil não tecido. Dentre os objetivos específicos, tem-se:

- Caracterizar as propriedades geotécnicas (físicas e hidráulicas) de RCD-R produzidos numa usina de beneficiamento localizada na Região Metropolitana de Goiânia-GO;
- Avaliar os efeitos na permeabilidade dos RCD-R decorrentes da aplicação de tensão normal durante a realização dos ensaios de permeabilidade;
- Verificar eventuais mudanças na permeabilidade dos RCD-R quando em contato com geotêxtil não tecido, e determinar as potenciais consequências da aplicação desse compósito (RCD-R e geotêxtil não tecido);
- Avaliar a ocorrência de colmatção dos geotêxteis não tecidos ensaiados conjuntamente com os RCD-R em ensaios de permeabilidade sem e com a aplicação de tensões normais.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura deste documento é composta por cinco capítulos, de forma a apresentar os conhecimentos básicos necessários para a compreensão do estudo, bem como os materiais utilizados e as considerações sobre os métodos utilizados empregados. Serão apresentadas conclusões sobre a pesquisa na seção final.

No Capítulo 1 está apresentada a contextualização do tema de estudo, mostrando os benefícios do uso de RCD-R e geossintéticos em obras geotécnicas. A justificativa e os objetivos a serem atingidos por este estudo também são apresentados neste capítulo.

A revisão bibliográfica acerca dos assuntos do estudo é apresentada no Capítulo 2, o qual está dividido em duas principais partes. A primeira é referente aos RCD-R, suas classificações e as suas características geotécnicas, as variabilidades dos seus parâmetros, suas propriedades hidráulicas. Também são fornecidas informações sobre a produção e os processos de beneficiamento de usina de reciclagem localizada em Aparecida de Goiânia-GO. A segunda parte refere-se à descrição dos geotêxteis e do seu uso com a função de reforço e filtro em obras geotécnicas.

O Capítulo 3 descreve os materiais (RCD-R e geotêxteis) e os métodos adotados para realização dos ensaios laboratoriais. Nesse capítulo é realizada uma descrição do método a ser empregado na avaliação da associação dos RCD-R ao geotêxtil.

No Capítulo 4, os resultados obtidos são apresentados e discutidos.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões a respeito do trabalho desenvolvido.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

É apresentado neste capítulo uma revisão sobre resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R), de modo a apresentar informações sobre a geração de resíduo de construção e demolição (RCD), questões em relação a sua reciclagem, e os aspectos relacionados com a sua posterior aplicação em obras geotécnicas. Também consta neste capítulo informações sobre os geotêxteis não tecidos, com destaque para as suas propriedades hidráulicas.

2.1 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), através da Resolução 307 (CONAMA, 2002) conceitua os resíduos de construção e demolição como sendo materiais “[...] provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos [...] comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha”. Segundo Angulo (2000), o conceito de RCD não é algo exato, pois depende da abrangência das frações presentes e, também, das atividades geradoras dessas frações.

A Resolução 307 (CONAMA, 2002) classifica os RCD em quatro classes distintas, conforme as possibilidades de reciclagem e periculosidade dos resíduos: i) Classe A, reutilizáveis ou recicláveis como agregados; ii) Classe B, recicláveis para outras destinações (por exemplo, plásticos, papeis, etc.); iii) Classe C, sem tecnologia de reciclagem economicamente viável; e iv) Classe D, resíduos perigosos. Diante disso, materiais como concretos, argamassas, tijolos e telhas cerâmicas, rochas naturais, solos entre outros, são pertencentes a Classe A (CONAMA, 2002). Vários estudos têm demonstrado que a Classe A corresponde à maior fração dos resíduos gerados em canteiros de obra, variando de 87% a 91% em massa (SANTOS, 2007; ANGULO, TEIXEIRA, CASTRO, 2011).

2.1.1 Geração de Resíduos de Construção e Demolição (RCD)

Os resíduos da indústria da construção (RCD) são gerados desde o início da obra e durante o ciclo de vida das construções – que engloba as fases de construção, manutenção e demolição –, acarretando numa composição caracterizada por uma grande variabilidade e heterogeneidade dos materiais presentes (FLEURY, 2018). Santos (2007) salienta que o fato de executar atividades simultâneas com utilização de diferentes materiais, com a finalidade de cumprir o cronograma de obras, apresenta-se com um dos fatores responsáveis pela ocorrência de variações e heterogeneidade na composição do RCD, desde que não exista uma gestão eficiente de tais resíduos. Pinto (1989¹ *apud* SANTOS, 2007), ao analisar uma obra de aproximadamente 3.650 m², concluiu que há aproximadamente 20% de desperdício em massa de material utilizado na fase de construção, sendo que aproximadamente metade desse material desperdiçado sai da obra como entulho, o que impacta numa elevação de custos da obra em torno de 6%.

A geração de RCD também pode se dá devido a guerras e fenômenos naturais de grandes magnitudes. De acordo com Santos (2007), o maremoto ocorrido no Oceano Índico, no ano de 2004, causando o tsunami que atingiu 12 países, provocou a destruição de aproximadamente 400.000 casas. O autor também cita o terremoto ocorrido em Los Angeles, em janeiro de 1994, que deixou aproximadamente 3 milhões de toneladas de escombros. Segundo Leite (2001), após a Segunda Guerra Mundial, a Alemanha apresentava entre 400 e 600 milhões de metros cúbicos de entulho.

No cenário nacional, um estudo desenvolvido com a finalidade de estimar a geração de RCD apontou que de 50 a 150 kg/m² construído são produzidos, sendo esta variação explicada por diversos fatores, dentre eles as diferenças no controle de produção realizado por cada empresa em seus canteiros de obra (ANGULO, TEIXEIRA, CASTRO, 2011). Num estudo mais recente, a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON) estimou a geração de 84,18 milhões de metros cúbicos de RCD, no ano de 2014, no Brasil (ABRECON, 2015).

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), foram coletados 44,63 milhões de toneladas de RCD em 2014, um aumento de 4,1% em relação a 2013 (ABRELPE, 2014). Este levantamento revelou que 44,18% dos RCD

¹ PINTO, T. P. **Perdas de materiais em processos construtivos tradicionais**. São Carlos, 1989. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, São Carlos, 1989. (Datilografado)

gerados foram coletados, sendo mais da metade do volume gerados (aproximadamente 56 milhões de toneladas) não coletados, ou depositados de maneira inadequada. A Tabela 2.1 apresenta os dados referentes à coleta nacional de RCD segundo a ABRELPE (2016, 2017).

Tabela 2.1 - Coleta de RCD por região - modificada pelo autor (ABRELPE, 2016, 2017).

Região	2015		2016		2017	
	RCD coletado (x 10 ³ ton)	%	RCD coletado (x 10 ³ ton)	%	RCD coletado (x 10 ³ ton)	%
Norte	1.729	3,83	1.723	3,82	1.725	3,83
Nordeste	8.873	19,65	8.901	19,73	8.974	19,92
Centro-Oeste	5.079	11,25	5.042	11,17	4.955	11,00
Sudeste	23.395	51,81	23.353	51,76	23.383	51,91
Sul	6.082	13,47	6.102	13,52	6.012	13,35
Brasil	45.158	100	45.121	100	45.049	100

Conforme a Lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010), os municípios são os responsáveis pela realização da coleta e do tratamento dos resíduos sólidos urbanos. Em Goiânia-GO, a Companhia de Urbanização de Goiânia (COMURG) é responsável por realizar esse serviço. A COMURG, além de coletar resíduos sólidos urbanos convencionais (como matéria orgânica, plástico, metais, vidro, etc.), coleta também 30% do RCD gerado na cidade (SILVA; MALHEIROS; CAMPOS, 2013). Tendo em vista que o PMGIRS (GOIÂNIA, 2016) estima a geração de 319 mil toneladas de RCD em Goiânia-GO, tal coleta corresponde à cerca de 95 mil toneladas.

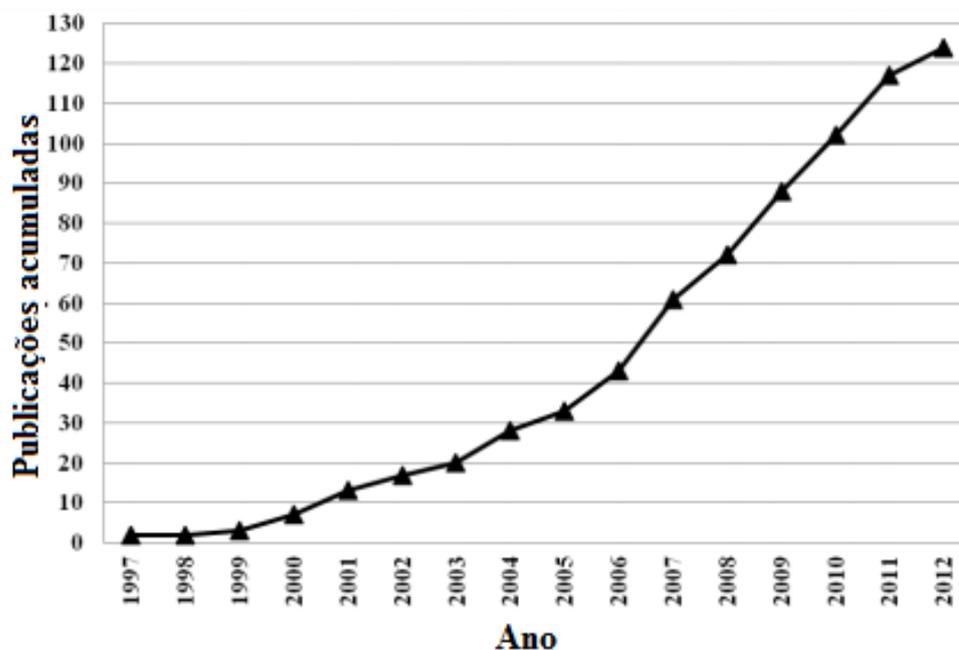
2.1.2 Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição (RCD)

A ABRECON (2015) realizou uma pesquisa setorial, entre junho de 2014 e setembro de 2015, coletando dados relativos à reciclagem de RCD e às estratégias de reciclagem no Brasil. Nessa pesquisa, participaram 105 usinas de reciclagem nacionais; porém a ABRECON estima a existência de 310 usinas de reciclagem de RCD em território nacional, sendo a iniciativa privada a responsável pela maior parte. Brasileiro e Matos (2015) relatam que a realidade dos RCD nos municípios brasileiros é de 72,45% possuem “serviço de manejo dos RCD”; 7,05% tem “existência e tipo de processamento dos resíduos”; 2,23% existe a “triagem simples do RCD reaproveitáveis (Classes A e B)”; 0,25% existe a “triagem e trituração dos resíduos Classe

A”; 0,36% existe a “triagem e trituração dos resíduos Classe A com classificação granulométrica dos agregados reciclados” e somente 1,42% existe o programa “reaproveitamento dos agregados produzidos na fabricação de componentes construtivos”.

Silva Filho e Santos (2014) destacaram o impacto causado pela Resolução 307 do CONAMA (2002) avaliando não só a quantidade de instalação de usinas de reciclagem no país, mas também o número de estudos realizados e publicações sobre o tema (Figura 2.1). Segundo os autores, a grande parte dos estudos sobre resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) foram realizados em nível de mestrado, com foco na utilização do material reciclado como agregado de concreto para pavimentação, com a maioria das pesquisas tendo sido realizada na região sudeste do país, com destaque para o estado de São Paulo.

Figura 2.1 - Publicações acumuladas - modificada pelo autor (SILVA FILHO; SANTOS, 2014).

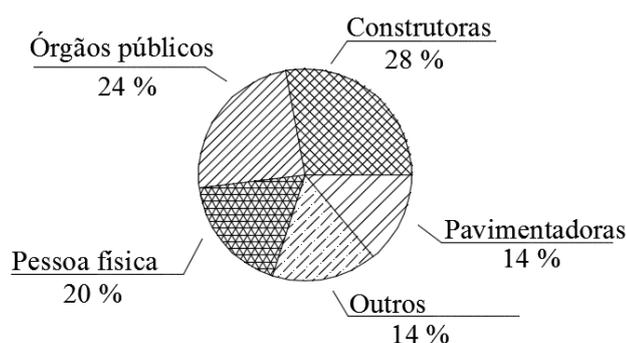


Fleury (2018), ao analisar os resultados da pesquisa realizada pela ABRECON (2015), concluiu que aproximadamente 582,5 mil toneladas de agregados reciclados são produzidas mensalmente no Brasil, o que corresponde a uma produção pouco expressiva, tendo em vista que o país apresenta uma capacidade máxima instalada de 1,3 milhão de toneladas. Somente parte do RCD dos municípios brasileiros é destinado a usinas de reciclagem, concluindo-se que a grande maioria dos RCD no país não são reciclados (BRASILEIRO; MATOS, 2015). Segundo Fleury (2018) este cenário pode ser justificado pela falta de políticas públicas que incentivem o uso de agregados reciclados. Brasileiro e Matos (2015) consideram, também, que

a não reutilização dos resíduos é cultural, devido a desconfiança de construtores e clientes quanto ao desempenho desses materiais.

Neste contexto, observa-se que 23% das empresas não realizaram ensaios de caracterização tecnológica dos seus produtos, e apenas 5% das empresas fazem ensaios diariamente (ABRECON, 2015). Segundo Fleury (2018), esses dados são um indicativo de que as empresas não têm muita preocupação em agregar valor de mercado aos seus produtos, uma vez que a caracterização tecnológica do material: i) garante a sua qualidade, ii) atende às exigências dos consumidores e iii) informa as suas propriedades. De acordo com o autor, os consumidores de agregados reciclados apontados na pesquisa da ABRECON (2015) são, em sua maioria, construtoras, órgãos públicos e pessoas físicas (Figura 2.2).

Figura 2.2 - Principais consumidores de agregados reciclados – modificada pelo autor (ABRECON, 2015).



2.1.3 A reciclagem de RCD na Região Metropolitana de Goiânia-GO

A partir de dezembro de 2011, passou a operar em Aparecida de Goiânia-GO uma usina de reciclagem e beneficiamento de RCD. De acordo com Fleury, Siqueira Neto e Santos (2017), cerca de 99% dos resíduos recebidos pela empresa são gerados na região metropolitana de Goiânia-GO. A usina separa os resíduos conforme as classes definidas pela Resolução 307 (CONAMA, 2002). Segundo informações da gerência da empresa, os resíduos de Classe D não chegam à usina, uma vez que são triados na própria obra; os resíduos de Classe C que chegam à usina são destinados aos aterros sanitários; os resíduos Classe B são encaminhados para outras usinas de reciclagem; e os resíduos de Classe A são agrupados em pilhas até a realização dos processos de britagem.

Segundo Fleury, Siqueira Neto e Santos (2017), a usina produz 6 (seis) tipos de materiais diferentes: i) rachão; ii) brita 1; iii) brita 0; iv) areia cinza; v) areia marrom; e vi) pó de entulho. A areia cinza difere da areia marrom pois não apresenta solo em sua composição. De acordo

com os autores, a usina produz e comercializa outros materiais como: i) brita graduada simples (BGS) grossa – composta por rachão (25%), brita 1 (25%), brita 0 (25%) e areia (25%) – ; e ii) BGS fino – composta por brita 1 (33%), brita 0 (33%) e areia (33%).

2.2 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DE RCD-R PARA USO EM ESTRUTURAS DE SOLO REFORÇADO COM GEOSSINTÉTICOS

Os resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) tem sido objeto de estudo com diferentes abordagens na geotecnia. A literatura apresenta estudos de investigação das propriedades geotécnicas desses materiais para utilização em diversos tipos de obra, dentre elas: i) pavimentação (RAHMAN et al., 2014; REZENDE *et al.*, 2015), ii) estruturas de solo reforçado (ESR) com geossintéticos (SANTOS, 2007, 2011; ARAÚJO NETO, 2017; FLEURY, 2018; SILVESTRE, 2019), iii) camadas de cobertura de aterros de resíduos (BARROS, 2005). A Tabela 2.2 apresenta informações sobre diferentes trabalhos que realizaram caracterização geotécnica de RCD-R com a finalidade de uso como material de preenchimentos em ESR.

Tabela 2.2 - Autores que realizaram caracterização geotécnica de RCD-R - (Próprio autor).

Autor	Localidade	Material (RCD-R)*
Santos (2007)	São Carlos-SP	Bica corrida
Santos (2011)	Brasília-DF	Material misto
Araújo Neto (2017)	Região Metropolitana de Recife-PE	Areia reciclada
Fleury (2018)	Aparecida de Goiânia-GO	Brita Graduada Simples (BGS) ‘grosso’
Silvestre (2019)	Aparecida de Goiânia-GO	Brita Graduada Simples (BGS) ‘fino’

Nota: (*) Nomeclatura empregada pelas usinas onde os materiais foram coletados.

No estudo realizado por Santos (2007), os RCD-R ensaiados foram classificados como ‘pedregulho arenoso’ (ABNT, 1995a); enquanto os RCD-R ensaiados por Santos (2011) foram classificados como ‘areia pedregulhosa’ (ABNT, 1995a). As curvas granulométricas obtidas por Santos (2007) e Santos (2011) são ilustradas nas Figuras 2.3 e 2.4, respectivamente.

Figura 2.3 - Curvas granulométricas de um RCD-R da usina de São Carlos-SP - (SANTOS, 2007).

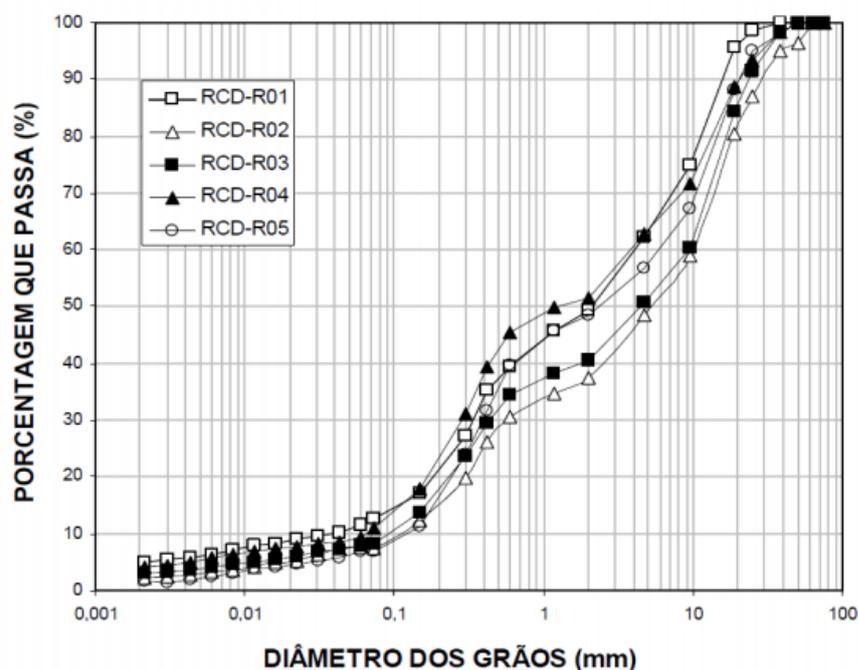
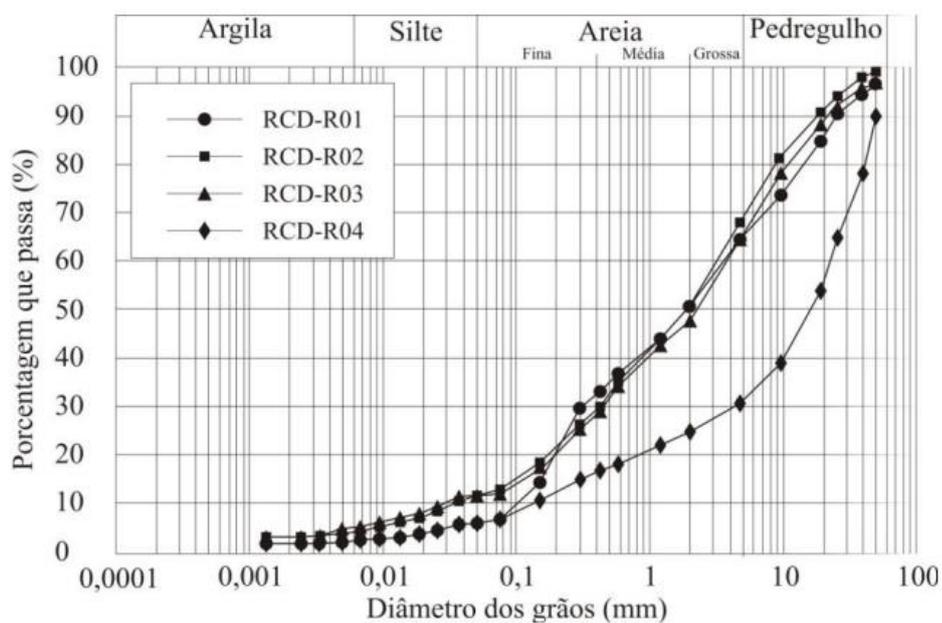


Figura 2.4 - Curvas granulométricas dos RCD-R em Brasília-DF - (SANTOS, 2011).

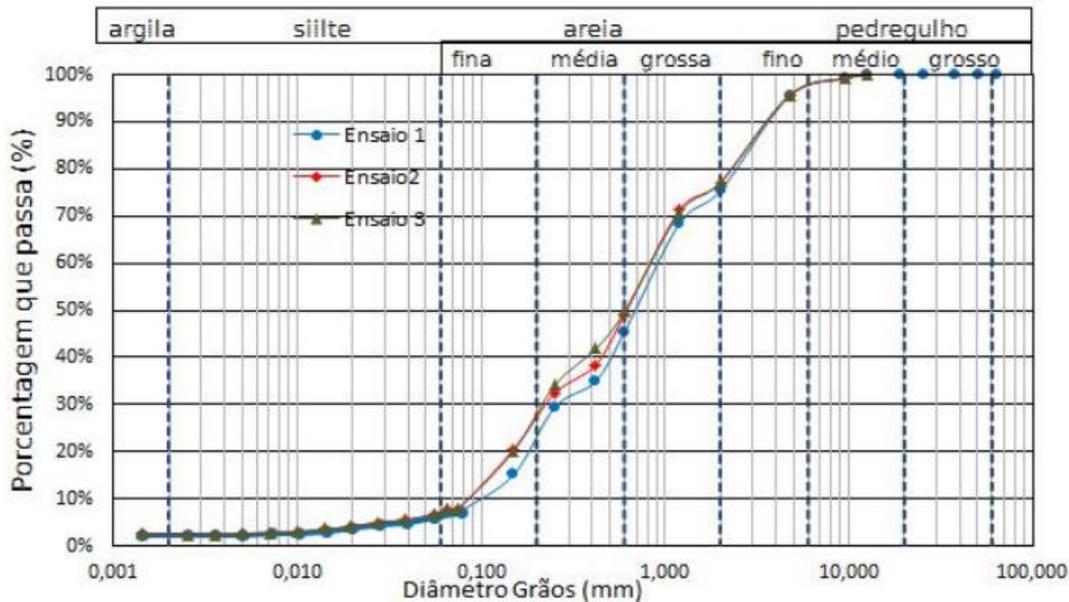


Nota: O RCD-R 04 não foi coletado na usina de reciclagem de Brasília-DF, mas sim em um canteiro de obras.

Araújo Neto (2017) caracterizou geotecnicamente amostras de RCD-R com a finalidade analisar o comportamento de geogrelhas em ensaios de arrancamento em pequenas dimensões utilizando o RCD-R como material de preenchimento. Os resultados de análise granulométrica revelaram que o RCD-R poderia ser classificado como uma 'areia bem graduada com pouco

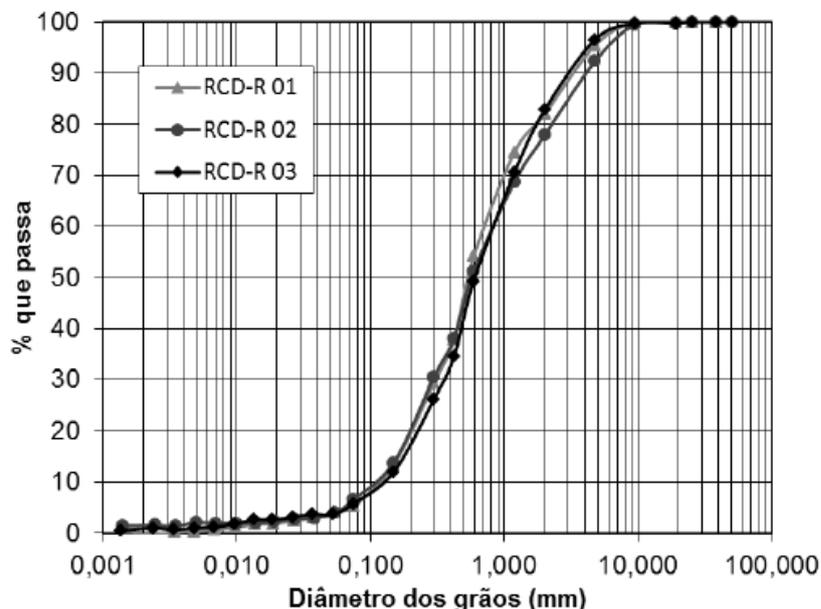
pedregulho e poucos finos' (SUCS), apresentando baixa variabilidade entre as curvas granulométricas dos RCD-R (Figura 2.5).

Figura 2.5 - Curva granulométrica de um RCD-R da usina da Região Metropolitana de Recife-PE - (ARAÚJO NETO, 2017).



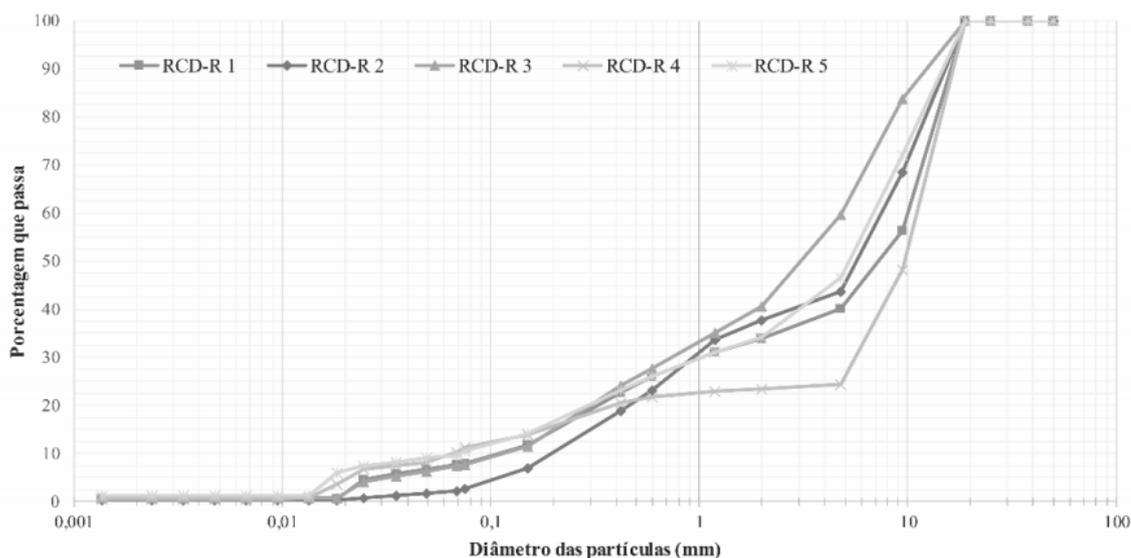
Fleury (2018) utilizou amostras de 'BGS grosso' em seus estudos sobre danos mecânicos em geogrelhas devido ao processo de instalação em campo. A variabilidade apresentada pelo material revelou coeficientes de variação que possuíram maiores valores entre 15% e 20%, entre as dimensões de 0,02 a 2,00 mm. As curvas granulométricas obtidas pelo autor são apresentadas na Figura 2.6.

Figura 2.6 - Curva granulométrica de RCD-R do tipo 'BGS grosso' da usina de Aparecida de Goiânia-GO - (FLEURY, 2018).



Num estudo que investigou a redução de resistência de geogrelhas devido a danos químicos causados por RCD-R, Silvestre (2019) observou que a análise granulométrica das cinco amostras do 'BGS fino' apresentou baixa variabilidade, com classificações pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) de pedregulho bem ou mal graduado com presença de areia e/ou silte (GW-GM, GW, GP-GM), de acordo com a data de beneficiamento do material. O autor ressalta que apenas uma das amostras foi classificada como areia bem graduada com silte e pedregulho (SW-SM). A Figura 2.7 ilustra as curvas granulométricas obtidas pelo autor.

Figura 2.7 - Curva granulométrica de RCD-R do tipo 'BGS fino' da usina de Aparecida de Goiânia-GO - (SILVESTRE, 2019).



Outra característica geotécnica importante do material de preenchimento em ESR que deve ser analisada são seus limites de consistência, uma vez que as normas internacionais, como a BS 8006 (2010) e a FHWA (2009), sugerem o uso de materiais de preenchimento em ESR que não apresentem resistência coesiva, ou seja, apresentem comportamento não plástico. Alguns estudos já verificaram que os RCD-R podem apresentar comportamento não plástico, sendo esse um fato positivo para o uso desses materiais em ESR (SANTOS, 2007; ARAÚJO NETO, 2017; FLEURY, 2018; SILVESTRE, 2019).

Santos (2011) realizou ensaios expeditos para classificação MCT com o RCD-R e observou que o material passante na peneira de 0,42 mm de abertura apresentou comportamento laterítico. Com base nesse comportamento, o autor afirmou que a fração mais fina do RCD-R pode sofrer forte influência pela presença de solo da região de produção/beneficiamento, uma vez que quantidades significativas de solo escavado podem ser destinadas à usina. Nesse contexto, o autor classificou suas amostras quanto a plasticidade como amostras não plásticas ou com plasticidade média.

Por outro lado, alguns estudos relatam dificuldades em executar o ensaio de compactação com RCD-R, uma vez que o material pode ter características bem distintas de granulometria e composição. Santos (2011) relatou dificuldade na execução do segundo ponto a partir da umidade ótima, pois o material apresentou-se muito úmido. Segundo o autor, tal dificuldade se deu pelo fato de não ter aguardado o período de cura de 24 horas do material. Por esse motivo, o autor recomendou o umedecimento prévio do RCD-R, se possível com 24 horas antes da compactação. A Tabela 2.3 sumariza os alguns resultados de ensaios de compactação realizados com RCD-R.

Tabela 2.3 - Resumo de resultados de ensaio de compactação - (Próprio autor).

Autor	$\rho_{d\text{máx}}$ (g/cm ³) médio	Coefficiente de variação ($\rho_{d\text{máx}}$) (%)	$w_{\text{ót}}$ (%) médio	Coefficiente de variação ($w_{\text{ót}}$) (%)
Santos (2007)	1,844	2,10	14,9	13,30
Santos (2011)*	1,930	6,40	13,7	18,20
Araújo Neto (2017)	1,761	0,50	15,53	1,70
Fleury (2018)	1,811	2,30	14,6	8,41
Silvestre (2019)	1,740	2,04	17,3	4,50

Nota: (*) O autor não aguardou 24 horas de tempo de umedecimento do material.

Em relação às características mecânicas dos RCD-R, Santos (2007) verificou a ocorrência de curva tensão versus deslocamento com comportamento do tipo plástico (“por deformação excessiva”), isto é, a tensão crescente até um determinado valor e, a partir daí, as deformações

começam a crescer praticamente sem variações de tensões. O autor observou que os deslocamentos verticais revelaram uma redução no volume do corpo de prova durante o ensaio.

Santos (2011) observou que na curva tensão versus deslocamento, as amostras ensaiadas não apresentaram pico de resistência, apresentando crescimento de tensão até um dado valor a partir do qual as deformações crescem praticamente sem variações de tensão. Na tensão mais baixa, houve dilatância apenas em uma das amostras. Nas outras duas amostras, o autor verificou que houve dilatância para as duas tensões normais mais baixas e, para a tensão mais alta, verificou redução de volume seguida de leve dilatância próximo ao final do curso do equipamento.

Ao ensaiar RCD-R classificado como 'areia bem graduada (SW)', Araújo Neto (2017) verificou que as amostras apresentaram pico de tensão, seguido de uma tensão residual no mesmo patamar da tensão de pico. O autor não fez comentários sobre as alterações de volume do material durante o ensaio. Os resultados obtidos pelos autores no ensaio de cisalhamento direto estão resumidos na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Resumo de resultados de ensaio de cisalhamento direto - (Próprio autor).

Autor	Ângulo de atrito (ϕ) (°)	Coesão (kPa)
	Médio	Média
Santos (2007)*	41,0	13,0
Santos (2011)	37,9	14,0
Araújo Neto (2017)	39,9	9,0

Nota: (*) Apenas uma amostra ensaiada.

Apesar da importância dos estudos citados acima, percebe-se que os mesmos foram realizados com o enfoque nas características físicas, propriedades mecânicas e químicas dos RCD-R. No entanto, vale ressaltar que, segundo as normas internacionais BS 8006 (2010) e a FHWA (2009), os materiais de preenchimento de ESR também devem permitir a drenagem livre do maciço reforçado. Diante disso, faz-se necessário também investigar as propriedades hidráulicas dos materiais de preenchimento, sobretudo simulando as condições que representem as suas aplicações em campo.

2.3 PERMEABILIDADE DOS RCD-R

Com o objetivo de investigar o uso de RCD-R como material alternativo para cobertura de aterro de resíduos sólidos urbanos, Barros (2005) caracterizou um RCD-R proveniente de usina

de beneficiamento instalada na cidade do Rio de Janeiro-RJ, e verificou que o mesmo apresentou comportamento semelhante a um solo granular. A caracterização física revelou que o material poderia ser classificado como uma ‘areia pedregulhosa com finos e não plástica’. Os resultados de ensaio de permeabilidade saturada revelaram coeficiente de permeabilidade (k) da ordem de 10^{-5} cm/s; já os ensaios de permeabilidade não-saturada mostraram um valor de 10^{-12} cm/s, demonstrando a viabilidade de uso do material na aplicação investigada.

Buscando investigar os fatores de influência na permeabilidade de RCD-R, Couto e Santos (2016) avaliaram experimentalmente a variação da permeabilidade de um tipo de RCD-R classificado como ‘areia pedregulhosa’ (ABNT, 1995a) produzido numa usina de reciclagem em Camaragibe-PE. Os fatores de influência na permeabilidade do RCD-R avaliados pelos autores foram: i) a presença de material concretício na sua composição e ii) o grau de compactação. Os ensaios de permeabilidade foram realizados com um permeômetro de carga constante, com três variações do grau de compactação (variando de 72% a 91%). A adição do agregado reciclado de concreto (ARC) no RCD-R, em porções de 25%, 50% e 75%, não alterou a classificação granulométrica do último – mantendo-a como ‘material arenoso’ – e não influenciou significativamente a permeabilidade do material. Por outro lado, os autores observaram que a variação do grau de compactação ocasionou variações relevantes na permeabilidade, com valores de 10^{-1} cm/s a 10^{-5} cm/s, mas sem comprometer a sua utilização em obras geotécnicas que demandassem materiais com permeabilidade de solos arenosos.

Com o propósito de investigar a permeabilidade de uma areia grossa reciclada comercializada por uma usina de reciclagem, Rosa e Santos (2016) realizaram os ensaios de permeabilidade à carga constante, submetendo o material a diferentes condições de compactidade. Os resultados revelaram que o RCD-R poderia ser classificado como ‘areia pedregulhosa’ (ABNT, 1995a) e apresentou valores de coeficiente de permeabilidade com valores usualmente observados para solos arenosos, variando de 10^{-2} cm/s a 10^{-4} cm/s, dependendo do grau de compactação. Os autores concluíram que a areia grossa reciclada poderia ser utilizada em obras geotécnicas que demandem materiais de aterro com comportamento hidráulico típicos de solos granulares.

Silva e Santos (2016) investigaram a permeabilidade de um RCD-R, produzido em usina de reciclagem instalada no município de Paudalho-PE, classificado como ‘areia com pedregulhos’ (ABNT, 1995a), por meio de variação do grau de compactação – valores de 75, 85 e 95%. A análise gravimétrica mostrou que o RCD-R apresentava um predomínio de concreto e solo, sendo esses dois materiais correspondentes à cerca de 85% da massa total. Por meio dos ensaios, os autores concluíram que o material estudado possuía comportamento hidráulico de solo

granular, podendo ser utilizado em obras geotécnicas. A Tabela 2.5 apresenta um resumo de informações sobre os estudos supracitados.

Tabela 2.5 - Informações sobre estudos de permeabilidade em RCD-R – (Próprio autor).

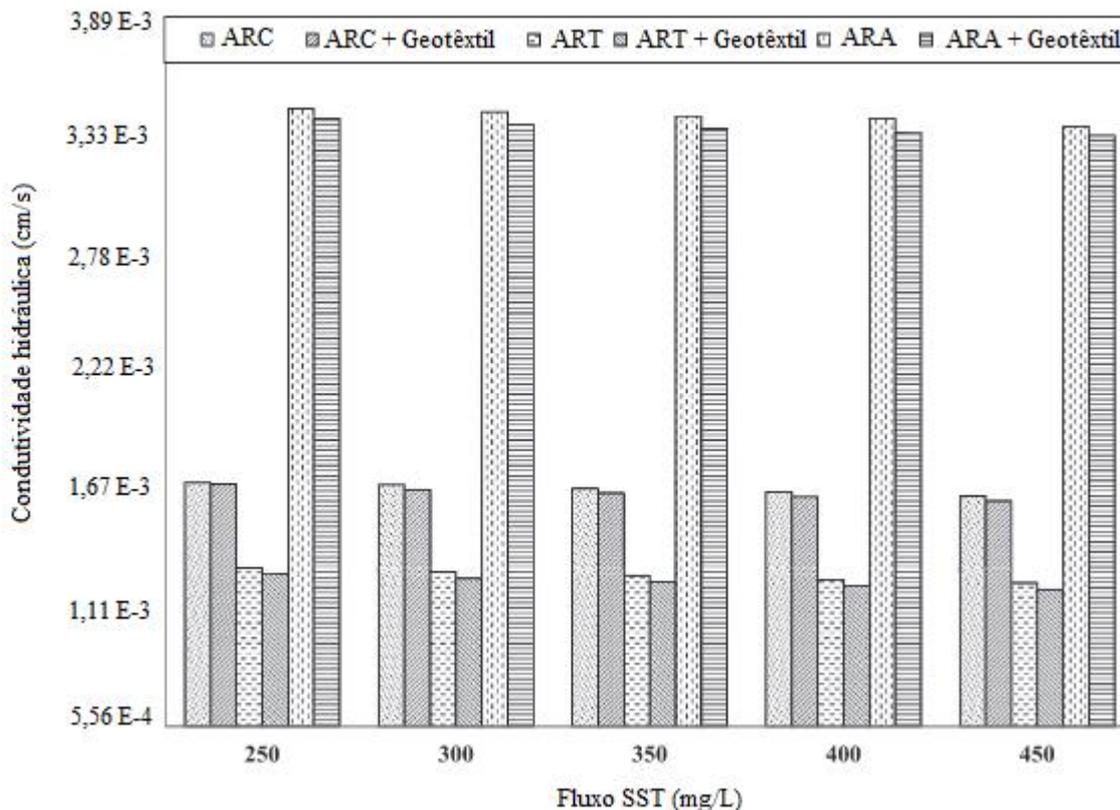
Autor (es)	Tipo de RCD-R	Material de Mistura	Nome da amostra	Grau de Compactação (%)	Coefficiente de Permeabilidade a 20° C k ₂₀ (cm/s)
Couto e Santos (2016)	'Pó de pedra' ¹	Agregado Reciclado de Concreto (ARC)	25% RCD-R	72,29	7,99 x 10 ⁻²
			75% ARC	85,59	1,03 x 10 ⁻³
				91,76	1,69 x 10 ⁻⁴
			50% RCD-R	66,08	1,96 x 10 ⁻¹
			50% ARC	83,76	1,14 x 10 ⁻³
				88,10	1,00 x 10 ⁻⁴
			75% RCD-R	65,63	6,66 x 10 ⁻²
			25% ARC	79,12	2,79 x 10 ⁻³
				83,37	7,58 x 10 ⁻⁵
					100% RCD-R
		0% ARC	72,04	1,21 x 10 ⁻²	
			80,55	1,48 x 10 ⁻³	
Rosa e Santos (2016)	'Areia grossa' ¹	Não se aplica	RCD-R 03	57,6	3,074 x 10 ⁻²
				64,9	8,178 x 10 ⁻³
				71,6	1,808 x 10 ⁻³
				77,2	1,835 x 10 ⁻⁴
Silva e Santos (2016)	Misto ¹	Não se aplica	RCD-R 01	78,1	1,41 x 10 ⁻²
				86,3	3,83 x 10 ⁻³
				95,8	3,06 x 10 ⁻⁴
			RCD-R 02	76,3	1,89 x 10 ⁻²
				89,9	1,53 x 10 ⁻³
				94,2	3,59 x 10 ⁻⁴
RCD-R 03	79,3	2,35 x 10 ⁻²			
	81,3	9,44 x 10 ⁻³			
			95,1	3,67 x 10 ⁻⁴	

Nota: (1) Nomenclatura utilizada pela usina de beneficiamento.

Com a perspectiva de empregar RCD-R em camadas de pavimentos permeáveis, Rahman *et al.* (2014) investigaram a permeabilidade de três tipos RCD-R: i) agregado reciclado de concreto (ARC), ii) agregado reciclado de tijolos (ART) e iii) agregado reciclado de asfalto (ARA). Investigando diferentes cenários, os autores observaram a permeabilidade oscilando entre 5,56 x 10⁻⁴ cm/s a 4,58 x 10⁻³ cm/s para os três tipos de RCD-R, sem e com associação a geotêxteis não tecido, quando submetidos a fluxos de soluções de poluentes em diferentes concentrações. O ART foi o RCD-R de menor permeabilidade (1,3 x 10⁻³ cm/s), enquanto o ARA foi o de maior permeabilidade (3,4 x 10⁻³ cm/s). A associação com o GTNT, de peso unitário igual a 500 g/m² não repercutiu em alterações significativas na permeabilidade dos materiais. Os autores concluíram que a permeabilidade dos RCD-R: i) aumentou com o uso de filtros de partículas maiores; ii) aumentou com a diminuição da densidade relativa do material; iii)

aumentou com a diminuição dos sedimentos presentes na solução de poluentes. Os resultados desse último cenário são apresentados na Figura 2.8.

Figura 2.8 - Permeabilidade dos RCD-R submetidos a fluxo de solução de poluentes - modificado pelo autor (RAHMAN et al. 2014).



2.4 GEOTÊXTEIS

Dentre os diversos tipos de geossintéticos, os geotêxteis apresentam-se bastante versáteis, uma vez que são capazes de desempenhar funções de: i) separação (BLACK; HOLTZ, 1999), ii) proteção (ABRAMENTO; WICKERT, 2006), iii) filtração (GIROUD, 1996; LAFLEUR, 1999), iv) drenagem (PALMEIRA; GARDONI, 2000; PALMEIRA; GARDONI, 2002;), v) reforço (PALMEIRA, 1981; SANTOS, 2011) e vi) controle de erosões (CARROL; RONDECAL; COLLIN, 1992). Os materiais poliméricos comumente utilizados na fabricação desses materiais são o poliéster (PET) e o polipropileno (PP), o que confere as propriedades de alta resistência química e a solventes, baixo peso e baixo custo (PALMEIRA, 2018).

Segundo Bueno e Vilar (2015), as principais propriedades dos geotêxteis necessárias em especificações de projetos são:

- Propriedades físicas: massa por unidade de área, espessura nominal e porosidade;

- Propriedades hidráulicas: permissividade, transmissividade, abertura de filtração e abertura aparente;
- Propriedades mecânicas: compressibilidade, resistência à tração, resistência ao puncionamento, resistência à propagação do rasgo, resistência ao estouro e fluência sob tração;
- Propriedades de durabilidade ou desempenho: resistência à tração confinada, fluência confinada, resistência de interface, resistência à abrasão, filtração de longa duração e danos de instalação.

De acordo com Bueno e Vilar (2015), para determinar as propriedades hidráulicas, faz-se os ensaios: i) permissividade (permeabilidade normal ao plano) e ii) transmissividade (permeabilidade planar). Para aplicações em filtração, os ensaios mais utilizados são para determinação da permissividade (ψ), que indica a facilidade de percolação do fluido, e ensaio de obtenção da abertura de filtração, que corresponde ao diâmetro equivalente da maior partícula capaz de atravessar o geotêxtil (SILVA, 2014; TREJOS GALVIS, 2016). Por outro lado, os ensaios de determinação da transmissividade do GT são mais usuais em aplicações de drenagem.

2.4.1 Ensaio de Permissividade (permeabilidade normal ao plano)

Tendo em vista que a permissividade do geotêxtil normalmente é muito elevada, a sua determinação é realizada de maneira muito semelhante à dos solos. No caso do geotêxtil não-tecido (GTNT), por ser um material compressível, observa-se o decréscimo da permissividade com o aumento de tensões normais, de forma que a condutividade hidráulica apresenta valores diferentes para esse material conforme sua espessura (PALMEIRA; GARDONI, 2002; SILVA, 2014; TREJOS GALVIS, 2016).

Os ensaios para a determinação da permissividade são normatizados pelas NBR ISO 11058 (ABNT, 2013) e pela ASTM D 5493 (ASTM, 2016), a qual é definida como:

$$\psi = \frac{k_n}{t_{GT}} \quad (2.1)$$

Onde: ψ é a permissividade (s^{-1}); k_n é o coeficiente de permeabilidade normal (m/s); e t_{GT} é a espessura do geossintético (m).

Além da sua obtenção por meio de ensaio, o coeficiente de permeabilidade normal dos GTNT pode ser calculado por modelos teóricos. Giroud (1996) propôs as seguintes expressões baseadas no método de Kozeny-Carman e na hipótese de fluxo laminar em tubos capilares, respectivamente:

$$k = \frac{\beta \rho_w g}{16 \eta_w} \times \frac{n_{GT}^3}{(1 - n_{GT})^2} \times d_f^2 \quad (2.2)$$

$$k = \frac{\rho_w g n_{GT} O_f^2}{32 \eta_w} \quad (2.3)$$

Onde: k é o coeficiente de permeabilidade; ρ_w é a massa específica do fluido; g é a aceleração da gravidade (9,81 m/s²); η_w é a viscosidade dinâmica do fluido; n_{GT} é a porosidade do geotêxtil; β é o fator de forma; d_f é o diâmetro das fibras do geotêxtil; e O_f é a abertura de filtração do geotêxtil.

O fator β é adimensional, sendo função da tortuosidade do caminho no meio. Giroud (1996) sugere um valor médio de $\beta = 0,11$ para GTNT. As Equações 2.2 e 2.3 mostraram-se bastante eficazes para a previsão de permeabilidade de geotêxtil sob pressão. Gardoni (2000) e Palmeira e Gardoni (2000) aferiram soluções teóricas apresentadas por Giroud (1996) e observaram que houve boa concordância com os resultados encontrados pelos ensaios de laboratório para mantas virgens não tecidas.

No entanto, imaginando uma condição de campo, a compressibilidade e a porosidade do geotêxtil podem ser significativamente reduzidas quando impregnado devido à presença de partículas. Diante disso, Giroud (1994) realizou um estudo acerca das características hidráulicas do geotêxtil, considerando a presença de partículas de solo aprisionadas em seus poros. O autor, de posse da equação de Kozeny-Carman para permeabilidade em meios porosos, derivou uma expressão para a permeabilidade de geotêxteis parcialmente colmatados, assumindo que as partículas de solo são uniformemente dispersas nos poros do geotêxtil. Palmeira e Gardoni (2000) modificaram e reescreveram essa expressão da seguinte forma:

$$k^* = \frac{\beta \rho_w g}{\eta_w} \frac{\left[n_{GT} - \lambda \frac{\rho_f}{\rho_s} (1 - n_{GT}) \right]^3}{\left(\frac{4}{d_f} + \lambda \frac{\rho_f}{\rho_s} \frac{6}{d_s} \right)^2 (1 - n_{GT})^2} \quad (2.4)$$

$$\lambda = \frac{M_s}{M_f} \quad (2.5)$$

$$\frac{d_s}{d_f} = \sqrt{\frac{\pi}{1 - n_{GT}} - 1} \quad (2.6)$$

Onde: k^* é o coeficiente de permeabilidade do geotêxtil parcialmente colmatado; d_s é o diâmetro das partículas de solo (assumidas esféricas) dentro do geotêxtil; ρ_f é a densidade das fibras do geotêxtil; ρ_s é a densidade das partículas de solo; M_f é a massa das fibras do geotêxtil; M_s é a massa das partículas de solo no geotêxtil; λ é o nível de impregnação do geotêxtil; e n_{GT} é a porosidade do geotêxtil sem considerar a presença das partículas.

2.4.2 Abertura de filtração

A abertura de filtração (O_f) de um geotêxtil é o parâmetro mais importante para definir o seu potencial de filtração, sendo o mais utilizado para o dimensionamento de filtro de geotêxteis (SILVA, 2014). Esta propriedade está diretamente relacionada com outras características físicas e hidráulicas dos geotêxteis. Um valor comumente utilizado para a abertura de filtração é o de O_{95} , que é o diâmetro obtido da curva granulométrica do material que passou pelo geotêxtil, correspondente a 95% passante. Para a determinação de O_f , Giroud (1996) propôs a seguinte equação semi-empírica:

$$\frac{O_f}{d_f} = \frac{1}{\sqrt{1 - n_{GT}}} - 1 + \frac{\xi n_{GT}}{(1 - n_{GT})t_{GT}/d_f} \quad (2.7)$$

$$\frac{O_f}{d_f} = \left[\frac{t_{GT}/d_f}{M_A/(\rho_f d_f)} \right]^{\frac{1}{2}} - 1 + \frac{\xi \left[1 - \frac{M_A/(\rho_f d_f)}{t_{GT}/d_f} \right]}{M_A/(\rho_f d_f)} \quad (2.8)$$

Onde: O_f é a abertura de filtração do geotêxtil; d_f é o diâmetro das fibras do geotêxtil; t_{GT} é a espessura do geotêxtil; M_A é a gramatura do geotêxtil; e ξ é um parâmetro adimensional que pode ser obtido pela calibração com dados de ensaio.

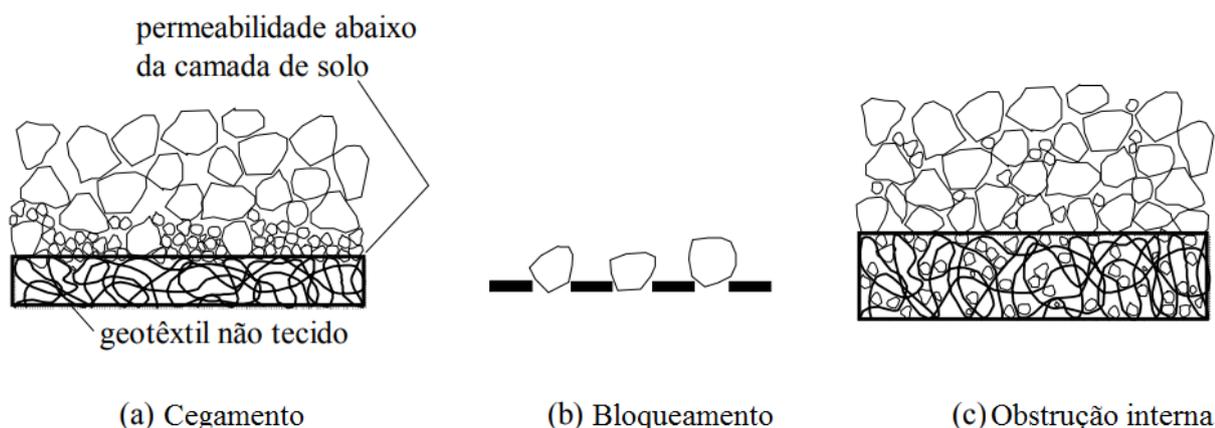
Giroud (1996) sugeriu um valor de ξ igual a 10 para geotêxteis não tecidos. Palmeira e Gardoni (2002) encontraram o valor ξ igual a 15 como o que apresentou melhor ajuste com os resultados de ensaios de laboratório para geotêxteis de poliéster. Este parâmetro pode ser obtido através de métodos diretos (peneiramento seco, peneiramento úmido e peneiramento hidrodinâmico) e indiretos (análise de imagens, intrusão de mercúrio, e *Bubble Point Test* – BBP).

2.4.3 Critérios de filtro

Os geotêxteis, quando usados como filtros, devem atender a critérios a fim de garantir um comportamento de projeto satisfatório. Os critérios de filtro envolvem a análise da capacidade de retenção (antipipping), permeabilidade, colmatção e durabilidade (TREJOS GALVIS, 2016). Vários autores propuseram critérios de retenção, permeabilidade, colmatção e durabilidade (CFG, 1986² *apud* PALMEIRA; GARDONI, 2002; GIROUD, 1994; PALMEIRA; GARDONI, 2002). Dessa forma, deve-se empregar aquele que seja mais adequado às condições da obra onde o geotêxtil será aplicado.

Outro fator a ser analisado para que o geotêxtil tenha bom desempenho como filtro é a estabilidade interna do solo. A colmatção de filtros geotêxteis pode ocorrer por cegamento, bloqueamento e obstrução interna. O cegamento consiste no acúmulo de partículas de solo com dimensões menores que as aberturas do filtro sobre sua superfície, formando uma camada de baixa permeabilidade. O mecanismo de cegamento pode ocorrer em solos internamente instáveis, pois estes solos estão sujeitos ao fenômeno da sufusão, que consiste no carreamento de partículas de solo menores pelos vazios entre partículas maiores (PALMEIRA, 2018). O bloqueamento das aberturas do filtro é mais passível de ocorrência em geotêxteis tecidos. A obstrução de poros pode surgir em decorrência de impregnação excessiva por partículas de solos (PALMEIRA, 2018). Os mecanismos de colmatção de geotêxteis são ilustrados na Figura 2.9.

Figura 2.9 - Mecanismos de colmatção de filtros geotêxteis – modificado pelo autor (PALMEIRA et al., 2005).



Kenney e Lau (1985) sugeriram um método gráfico para classificação da estabilidade de materiais granulares densos utilizados como filtros. Os autores comprovaram por meio de seus

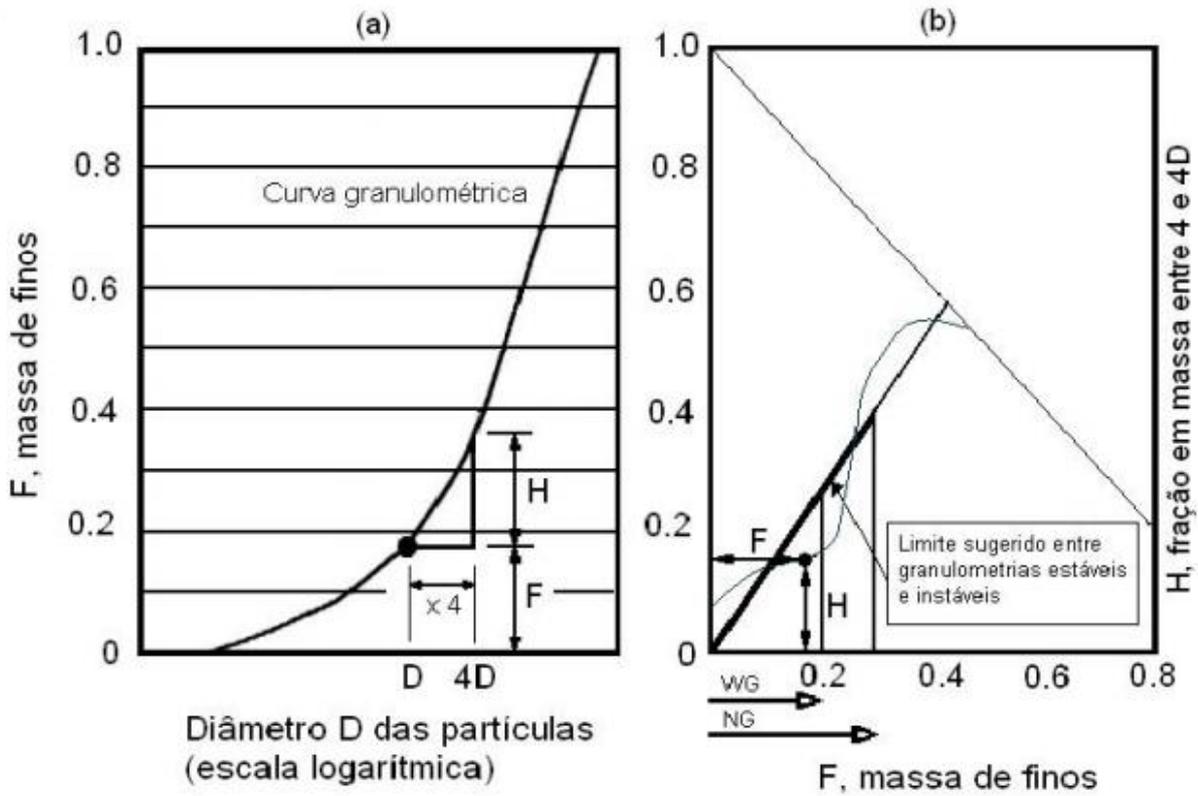
² CFG, 1986. Recommendations générales pour la réception et la mise en oeuvre des géotextiles: normes Françaises d'essais. Association Française de Normalization, French Committee on Geotextiles, - France, 32pp.

estudos que a estabilidade está principalmente relacionada com o formato da curva granulométrica do solo. O método sugerido é baseado nas variações de inclinações da curva granulométrica do solo.

A partir da Figura 2.10 é possível compreender melhor o método gráfico. No diagrama a esquerda na figura, identifica-se os eixos das ordenadas, que correspondem à fração F da massa de partículas menores que o diâmetro D , e o eixo das abscissas, correspondente aos diâmetros D das partículas em escala logarítmica. A curva granulométrica do material é plotada neste diagrama, seguida da identificação de um par aleatório de valores de D e F_1 correspondentes. Partindo desse par de valores iniciais, determina-se outro par de valores correspondentes, $4D$ e F_2 . No diagrama a direita na figura, o eixo das abscissas denominado de H é equivalente à fração da massa entre D e $4D$, e o eixo das ordenadas equivalente a F . Os valores de F_1 e da diferença entre F_1 e F_2 são plotados como um ponto, em que F equivale a F_1 e H equivale a $(F_2 - F_1)$. Repete-se esse procedimento até estabelecer a forma da curva $H \times F$. A reta $F + H = 1$ limita a curva $H \times F$ e a reta $H = 1,3F$ separa os materiais estáveis daqueles de granulometrias instáveis internamente, sendo os estáveis acima da reta e os instáveis abaixo da reta.

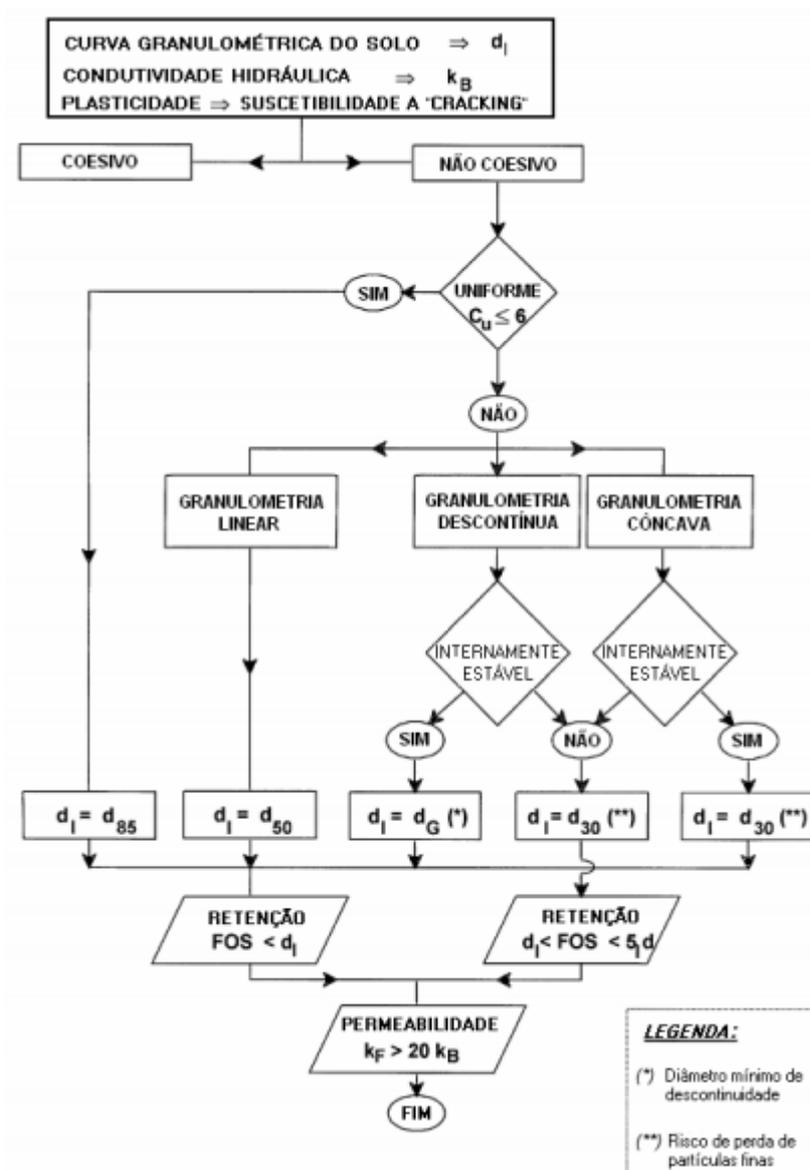
Segundo Kenney e Lau (1985), em solos bem graduados ($1 < C_C < 3$) a maior perda de partículas ocorre quando a curva $H \times F$ passa abaixo da reta $H = 1,3F$ no intervalo $0 \leq F \leq 0,2$. Em solos mal graduados ($C_C > 3$) e uniformes ($C_U < 2$) vale a afirmativa semelhante, porém no intervalo $0 \leq F \leq 0,3$.

Figura 2.10 - Método de descrição da forma da curva granulométrica - modificado por Muñoz (2005) (KENNEY; LAU, 1985).



Lafleur (1999) propôs um critério de dimensionamento de filtro que buscava aprimorar os critérios já existentes na época, uma vez que parte destes não considera solos com granulometria ampla. Esse critério baseia-se no perfil da curva granulométrica do material filtrante, assim como, na condição de estabilidade interna do solo. Muñoz (2005) elaborou um fluxograma de aplicação do critério de Lafleur (1999), o qual é apresentado na Figura 2.11.

Figura 2.11 - Fluxograma para critério de dimensionamento de Lafleur para solos com granulometria ampla - modificado por Munõz (2005) (LAFLEUR, 1999).



Na utilização do critério, atribui-se um índice de retenção (R_R) onde:

- Solos internamente estáveis: $R_R < 1$
- Solos internamente instáveis: $1 < R_R < 5$

Sendo:

$$R_R = \frac{O_f}{d_I} \quad (2.9)$$

Em que: O_f – abertura de filtração obtida por peneiramento hidrodinâmico; d_I – tamanho indicativo da partícula do solo base;

- D_{85} para solos uniformes ($C_U < 6$);
- D_{50} para solos linearmente graduados não uniformes ($C_U > 6$);
- D_{30} para solos com granulometria côncava;
- D_G para solos com granulometria descontínua (D_G é o diâmetro da descontinuidade).

Quanto à permeabilidade do geotêxtil, Lafleur (1999) estabeleceu:

$$k_{GT} > 20 \times k_s \quad (2.10)$$

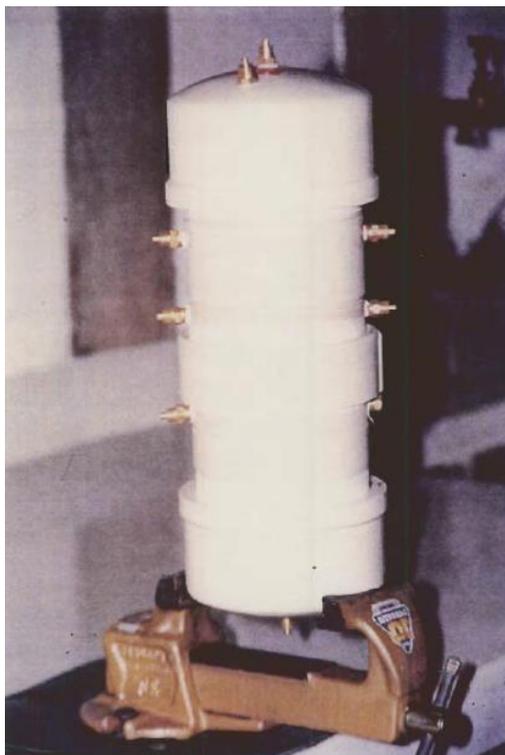
Onde: k_{GT} – permeabilidade do geotêxtil; k_s – permeabilidade do solo.

2.5 UTILIZAÇÃO DE GEOTÊXTEIS COMO FILTROS

Os geotêxteis têm sido utilizados como filtros pois reúne características e propriedades especiais que geralmente levam a aplicações com menos custos e execução mais rápida em comparação com os filtros granulares convencionais (PALMEIRA; TREJOS GALVIS, 2018). O geotêxtil permite a livre passagem de água através do solo enquanto retém as partículas sólidas.

A interação entre o solo e o filtro foi investigada por Gardoni (1995), que avaliou todos os elementos da interação: i) solos; ii) filtros e; iii) água. A autora fez a caracterização geotécnica dos solos, análises química e físico-química e utilizou filtros sintéticos e filtros granulares. Para avaliar o desempenho dos filtros sintéticos, realizou ensaios de filtração do tipo Razão entre Gradientes (GR) sem aplicação de cargas. O equipamento desenvolvido por Gardoni (1995) pode ser visto na Figura 2.12.

Figura 2.12 - Cilindro porta-amostras construído para ensaio de filtração solo-geotêxtil - (GARDONI, 1995).



Para os ensaios de permeabilidade, a metodologia utilizada pela autora foi preconizada pela norma ASTM D 4491 (ASTM, 1991³ *apud* GARDONI, 1995). Os ensaios foram realizados com amostras de geotêxteis virgens e amostras submetidas ao ensaio de filtração solo-geotêxtil sem a aplicação de tensões normais.

Outros autores realizaram ensaios de filtração do tipo razão de gradiente (GR, do inglês *gradient ratio*) com equipamentos semelhantes, com a mesma finalidade de avaliar o potencial de colmatção e a capacidade de retenção de geotêxteis em contato com o solo (SHI; 1993; FANNIN *et al.*, 1994⁴ *apud* GARDONI, 2000; FANNIN *et al.*, 1995⁵ *apud* GARDONI, 2000). Por meio do ensaio o nível de colmatção do geotêxtil pode ser inferido da medida de gradientes hidráulicos em diferentes locais ao longo do sistema solo-geotêxtil durante o ensaio de filtração. A ASTM D 4491 (1991) define a razão entre gradientes (GR) como:

$$GR = \frac{i_{9/12}}{i_{7/9}} \quad (2.11)$$

³ ASTM (1991). Standard Test Method for Water Permeability of Geotextiles by Permittivity, D 4491-91. ASTM Standard on Geosynthetics, Philadelphia, USA, 5 p.

⁴ FANNIN, R. J.; VAID, Y. P.; SHI, Y. C. (1994). Critical evaluation of the gradient ratio test. *Geotechnical Testing Journal*, 17 (1): 35-42

⁵ FANNIN, R. J.; CHOY, H. W. (1995). Factors influencing the long-term flow capacity of geonets, *Geosynthetic'95*, pp. 267-280

Onde: $i_{9/12}$ é o gradiente hidráulico entre os piezômetros 9 e 12, no trecho da amostra incluindo o geotêxtil e a camada de solo imediatamente acima com 25 mm de espessura, e $i_{7/9}$ é o gradiente hidráulico no solo ensaiado, medido ao longo do trecho compreendido entre 25 e 75 mm acima do nível do geotêxtil, entre os piezômetros 7 e 9 (Figura 2.13).

Fannin *et al.* (1994⁴ *apud* GARDONI, 2000) introduziram a definição de razão entre gradientes modificada (GR_{Mod}), definida numa região mais próxima da amostra de geotêxtil (8 mm) e, portanto, obtendo uma medida do mecanismo de colmatação mais dependente do comportamento do geotêxtil. A GR_{Mod} é definida por:

$$GR_{Mod} = \frac{i_{10/12}}{i_{7/9}} \quad (2.12)$$

Onde: $i_{10/12}$ é o gradiente hidráulico entre os piezômetros 10 e 12 e $i_{7/9}$ é o gradiente hidráulico no solo ensaiado, medido ao longo do trecho compreendido entre 25 e 75 mm acima do nível do geotêxtil, entre os piezômetros 7 e 9 (Figura 2.13).

Em um outro estudo, Gardoni (2000) propôs uma nova definição para razão entre gradientes, pois investigou a influência da aplicação de tensões normais aplicadas ao topo do permeâmetro durante este ensaio. A proposta da autora é que o gradiente na interface solo-geotêxtil fosse definido em uma região mais próxima do geotêxtil (3 mm), na tentativa de uma melhor aferição do mecanismo de colmatação do geotêxtil (Equação 2.13). Os valores obtidos de GR_{3mm} podem ser bem maiores que os propostos pela ASTM (1991) e por Fannin *et al.* (1994⁴ *apud* GARDONI, 2000).

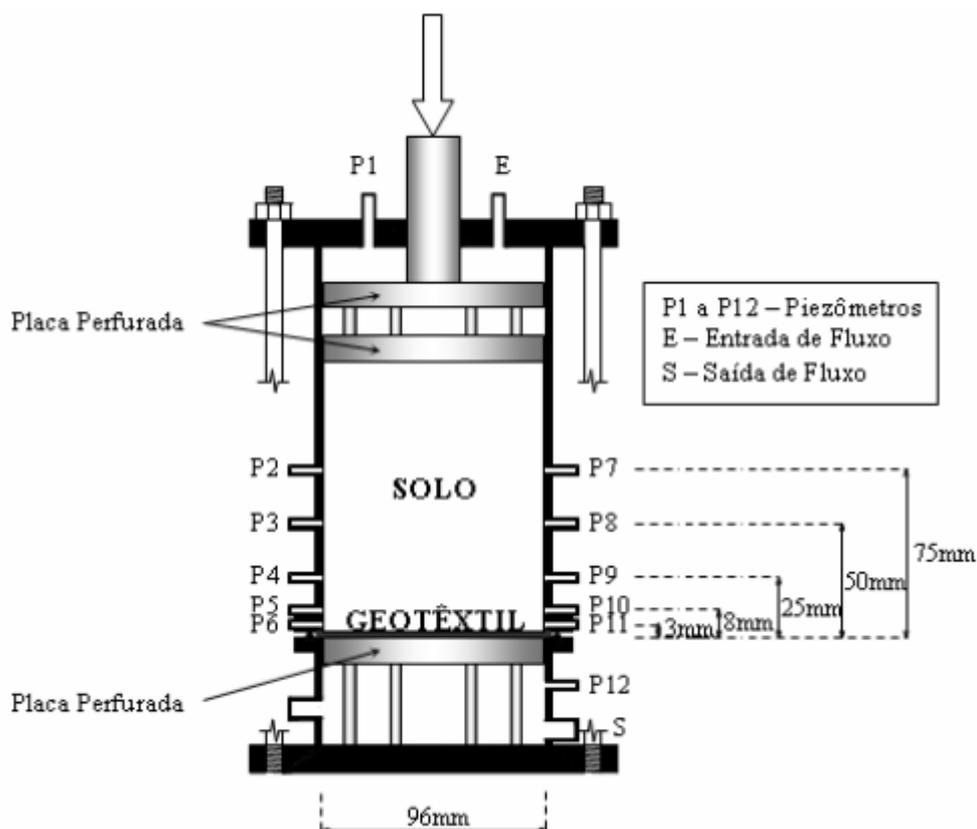
$$GR_{3mm} = \frac{i_{11/12}}{i_{7/9}} \quad (2.13)$$

Onde: $i_{11/12}$ é o gradiente hidráulico entre os piezômetros 11 e 12, no trecho da amostra incluindo o geotêxtil e a camada de solo imediatamente acima com 3 mm de espessura, e $i_{7/9}$ é o gradiente hidráulico no solo ensaiado, medido ao longo do trecho compreendido entre 25 e 75 mm acima do nível do geotêxtil, entre os piezômetros 7 e 9 (Figura 2.13).

O equipamento construído na Universidade de Brasília (UnB) baseou-se no projeto desenvolvido na *University of British Columbia* (SHI; 1993; FANNIN *et al.*, 1994⁴ *apud* GARDONI, 2000; FANNIN *et al.*, 1995⁵ *apud* GARDONI, 2000) tendo como referência a proposta de padronização da metodologia de ensaio de permeabilidade do sistema solo-

geotêxtil intitulada razão entre gradientes (GR). O esquema do equipamento construído por Gardoni (2000) pode ser visto na Figura 2.13.

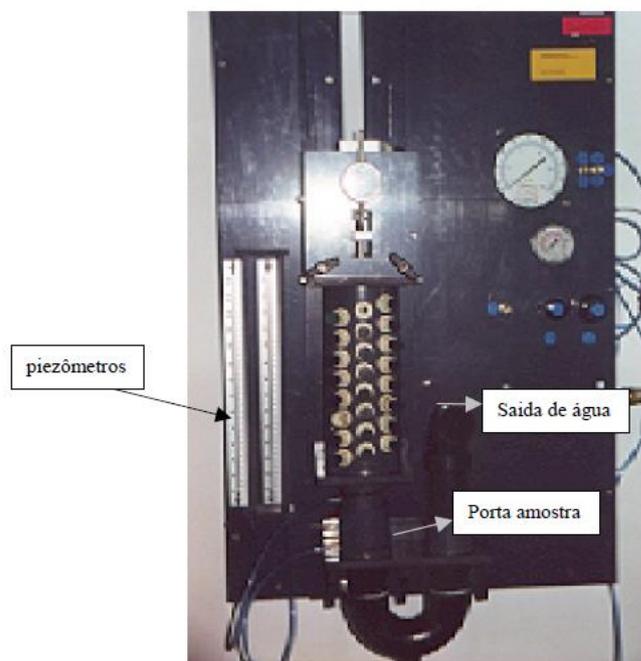
Figura 2.13 - Ensaio de filtração solo-geotêxtil do tipo Razão entre Gradientes (GR) - (GARDONI, 2000).



A metodologia para execução desse ensaio com a utilização de permeâmetro de pequenas dimensões proposta por Gardoni (2000) consiste, basicamente, em colocar a amostra de geossintético a ser ensaiado sobre uma placa perfurada apoiada no fundo do permeâmetro e em seguida montar o corpo de prova, que receberá o carregamento. A amostra de geossintético que será utilizada no ensaio deve ser previamente saturada e mantida nesta condição durante a montagem do ensaio. Ao final do ensaio, o solo que passou através da amostra de geotêxtil deve ser coletado para posterior análise granulométrica. O solo da amostra deve ser levado à estufa para secar sendo também posteriormente feita a sua análise granulométrica.

Em seu estudo, Gardoni (2000) realizou ensaios de permeabilidade com o geotêxtil utilizando um permeâmetro do *Geosynthetics Technology Center* (SAGEOS), Canadá. O equipamento é composto basicamente por um permeâmetro, um sistema de abastecimento de água deaerada à carga constante e um sistema aplicador de tensão, que utiliza ar comprimido. Este ensaio também é conhecido como ensaio de permissividade. O equipamento pode ser visualizado na Figura 2.14.

Figura 2.14 - Equipamento ensaio de permissividade - (GARDONI, 2000).



Palmeira e Gardoni (2002) apresentaram a influência de tensões normais em propriedades físicas e hidráulicas dos GTNT relevantes à filtração e drenagem. Realizaram diferentes tipos de ensaios para determinar: i) a espessura, ii) a porosidade, iii) a permissividade, iv) a transmissividade e v) o tamanho dos poros com variações de tensão normal aplicada entre 0 a 2000 kPa, de acordo com o tipo de ensaio. Os tipos de ensaios aplicados pelos autores foram: i) permissividade, ii) transmissividade, iii) análises de tamanho de poros com porosímetro e iv) análises de imagens. Palmeira e Gardoni (2002) fizeram comparações entre modelos teóricos de predições das características hidráulicas e resultados obtidos em ensaios laboratoriais, verificando maior acurácia para o método de predizer a permeabilidade do geotêxtil apresentado por Giroud (1996).

Palmeira *et al.* (2005) realizaram ensaio de razão entre gradientes, com o equipamento desenvolvido por Gardoni (2000), utilizado para verificar a compatibilidade entre o solo e o geotêxtil e avaliar o potencial de colmatção do filtro do geotêxtil. Os resultados de Palmeira *et al.* (2005) revelaram que os valores de permissividade e transmissividade dos GTNT são dependentes das características destes materiais e da tensão normal atuante. A presença de partículas de solo no interior do geotêxtil reduziu sua compressibilidade e permissividade, no entanto, os resultados de transmissividade mostraram que as amostras de geotêxteis impregnadas apresentaram valores dentro da faixa de variação obtida em amostras virgens, tendo esse comportamento provavelmente associado a menor compressibilidade do geotêxtil

impregnado. Os valores de permeabilidade encontrados nos ensaios foram semelhantes aos obtidos por expressões teóricas para amostras impregnadas com solo sob tensão.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais e métodos adotados neste estudo. São apresentados os procedimentos adotados durante as coletas de amostras de RCD-R, bem como na sua caracterização geotécnica. São apresentadas também as especificações fornecidas pela empresa fabricante dos geotêxteis utilizados. Finalmente, o capítulo apresenta os ensaios utilizados para determinar as propriedades hidráulicas, nas condições investigadas, do RCD-R com e sem a associação com geotêxteis.

3.1 MATERIAIS

Para avaliar a permeabilidade do RCD-R, utilizou-se dois tipos de material reciclado e uma areia natural, essa última para fins de comparação. Para avaliar o efeito da associação com geotêxtil não tecido (GTNT) na permeabilidade dos RCD-R, empregou-se materiais de duas massas por unidade de área.

3.1.1 Areia Natural

A areia natural utilizada foi comprada em armazém de materiais para construção. Foram comprados 3 (três) sacos de aproximadamente 25 kg de areia lavada de granulometria média, totalizando 75 kg (Figura 3.1). Após o processo de secagem ao ar até atingir a umidade higroscópica, a massa total foi de aproximadamente 55 kg.

Figura 3.1 - Saco de areia lavada de granulometria média – (Próprio autor).



3.1.2 Resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R)

Os resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) utilizados neste estudo foram: i) o pó de entulho e ii) a areia cinza. O pó de entulho (PE) – adotado como material principal de estudo – e areia cinza (AC) foram coletados numa usina de beneficiamento de RCD instalada na cidade de Aparecida de Goiânia-GO. Para a coleta, foram seguidos os procedimentos preconizados pelas NBR 10007– Amostragem de Resíduos Sólidos (ABNT, 2004) e NBR Norma Mercosul (NM) 26 – Agregados – Amostragem (ABNT, 2009).

No total, foram coletadas 6 (seis) amostras de pó de entulho. As 5 (cinco) primeiras amostras foram coletadas em intervalos de 7 a 14 dias, com o objetivo de analisar a existência de variabilidades das características do material. Durante as primeiras coletas, foram obtidas quantidades de 60 a 85 kg de material. Posteriormente, realizou-se a última coleta, de aproximadamente 450 kg de material, para a realização dos ensaios caracterização física e mecânica e de permeabilidade. A Tabela 3.1 apresenta os dados das coletas. A Figura 3.2 mostra os locais de coleta das amostras de pó de entulho.

Tabela 3.1 - Cronograma de coletas realizadas – (Próprio autor).

Coleta (Amostra)	Dia	Massa (kg)*
PE 01	26/10/2018	60,0
PE 02	09/11/2018	67,0
PE 03	23/11/2018	78,0
PE 04	30/11/2018	85,0
PE 05	07/12/2018	82,0
PE 06	17/05/2019	447,0
AC 01	07/12/2018	80,0

Nota: (*) massa determinada após secagem ao ar até atingir a umidade higroscópica

Figura 3.2 - Pontos de coleta de pó de entulho (PE 02) – (Próprio autor).



A areia cinza foi analisada com o intuito de estudar as suas propriedades hidráulicas e compará-las com as dos outros materiais investigados (pó de entulho e areia natural), dado que as demais propriedades desse material já vem sendo objeto de vários outros estudos na EECA-UFG. Diante disso, foi realizada apenas uma coleta desse material. Após secagem ao ar até a umidade higroscópica, a amostra apresentou uma massa total igual a 80 kg. As informações da coleta da areia cinza constam na Tabela 3.1, sendo essa a amostra denominada AC 01. Os pontos de coleta são apresentados na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Pontos de coleta na pilha de areia cinza - (Próprio autor).



Optou-se por utilizar o pó de entulho como o material principal desta pesquisa, uma vez que não há relatos de estudos realizados com o intuito de determinar as propriedades hidráulicas desse material. Cabe ressaltar também que esse produto tem sido comercializado por um valor inferior pela usina de beneficiamento, uma vez que se trata do material acumulado próximo ao equipamento de britagem e esteiras durante o processo de reciclagem.

3.1.3 Geotêxtil não tecido (GTNT)

Foram utilizados 2 (dois) tipos de geotêxtil não tecido (GTNT), manufaturados pelo mesmo fabricante, com filamentos contínuos de poliéster (PET) e processo de fixação das fibras por meio de agulhagem. A diferença entre os GTNT consistiu na massa por unidade de área, sendo selecionados um de 200 g/m² e outro de 300 g/m². As informações fornecidas pelo fabricante constam na Tabela 3.2. Os GTNT ensaiados (Figura 3.4) encontravam-se armazenados no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB), onde foram realizados outros estudos com esses materiais (GARDONI, 2000; SILVA, 2014; TREJOS GALVIS, 2016; MORAES FILHO, 2018; e MELO, 2018).

Tabela 3.2 - Principais propriedades dos geotêxteis não tecidos fornecidas pelo fabricante (MELO, 2018) – modificado pelo autor.

Nome	Geotêxtil	Material	M_A (g/m ²)	t_{GT} (mm)	O_{95} (mm)	k_n (cm/s)	Ψ (s ⁻¹)
GTNT ₂₀₀	OP-20	PET	200	1,9	0,100	0,30	2,0
GTNT ₃₀₀	OP-30	PET	300	2,3	0,090	0,26	1,5

Notas: M_A = massa por unidade de área (gramatura), t_{GT} = espessura nominal (ABNT NBR 12569), O_{95} = abertura de filtração, k_n = permeabilidade normal ao plano, ψ = permissividade.

Figura 3.4 - Tipos de geotêxteis utilizados - (Próprio autor).



3.2 MÉTODOS

Os métodos empregados na caracterização geotécnica e na determinação das propriedades hidráulicas dos diferentes tipos de RCD-R e da areia natural são apresentados nos tópicos a seguir. Apresenta-se, também, as metodologias utilizadas na análise da água empregada nos ensaios de permeabilidade, na análise granulométrica com uso de granulômetro a laser, bem como a metodologia aplicada nas análises de imagem por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

3.2.1 Caracterização geotécnica do Pó de Entulho, Areia Cinza e Areia Natural

As amostras de pó de entulho, areia cinza e de areia natural foram caracterizadas no Laboratório de Mecânica dos Solos, da Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA) da Universidade Federal de Goiás (UFG), conforme as normas usualmente utilizadas para ensaio de solos. As normas adotadas são apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Normas empregadas na caracterização geotécnica do pó de entulho, areia cinza e da areia natural - (Próprio autor).

Procedimentos Técnicos (normas)
NBR 6457: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização (ABNT, 2016f)
NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água (ABNT, 2016a) ^a
NBR 6459: Solo: determinação do limite de liquidez (ABNT, 2016c) ^a
NBR 7180: Solo: determinação do limite de plasticidade (ABNT, 2016d) ^a
NBR 7181: Solo: análise granulométrica (ABNT, 2016b) ^b
NBR 7182: Solo: ensaio de compactação (ABNT, 2016e) ^{a,c}

Nota: ^a Preparação de amostra com secagem prévia; ^b Sedimentação, peneiramento fino e grosso; ^c O ensaio de compactação foi realizado com energia Proctor Normal, sem reuso de material, em cilindro grande.

Em uma das amostras do pó de entulho (PE 06) foi realizado ensaio de cisalhamento, em caixa porta amostra de pequenas dimensões (60 x 60 mm), com o material preparado na umidade ótima de compactação e grau de compactação igual a 90%, na condição não inundada. A velocidade de cisalhamento do ensaio foi 0,61 mm/min e as tensões normais aplicadas foram 50, 100 e 200 kPa.

Diante da impossibilidade de realizar o ensaio de compactação com a areia cinza e a areia natural, foram realizados os ensaios de índice de vazios máximo e mínimos, conforme o método 1A da norma D4253 (ASTM, 2016a) e o método A da norma D4254 (ASTM, 2016b), respectivamente. Os ensaios de índices de vazios máximo e mínimo foram realizados no Laboratório de Infraestrutura (INFRALAB) da Universidade de Brasília (UnB).

3.2.2 Preparação das amostras de geotêxtil

As amostras de geotêxtil foram preparadas por Melo (2018), seguindo os procedimentos da NBR ISO 9862 (ABNT, 2013). Foi necessário descartar as duas primeiras voltas do rolo de GTNT₂₀₀ e GTNT₃₀₀, retirando assim as porções do material possivelmente alteradas pela exposição e manuseio. Descartados essas porções, o procedimento a seguir foi adotado para ambos os materiais:

1º - Cortou-se as mantas nas dimensões 2,10 x 1,10 m, sendo a menor dimensão limitada pela largura da bancada disponível para a acomodação das mesmas (Figura 3.5). Foram obtidas duas mantas para cada tipo de GTNT;

- 2° - Colocou-se a manta em uma superfície limpa e seca, deixando o material em repouso por 24 horas;
- 3° - Conforme recomendações da NBR ISO 10319 (ABNT, 2013), a faixa com largura 100 mm ao longo do perímetro da manta foi descartada. Em seguida, definiu-se o número máximo de espécimes que caberiam numa faixa de 2100 mm de comprimento. Assim, foram 6 (seis) espécimes por faixa e 3 (três) faixas por malha, totalizando 18 espécimes por malha;
- 4° - Para traçar a malha foram utilizadas canetas permanentes, limitando uma faixa de 150 mm nas bordas laterais. Depois de limitadas as bordas, traçou-se cinco verticais distando 300 mm uma das outras. Por fim, traçou-se 4 (quatro) retas horizontais distando 300 mm entre si;
- 5° - Todos os espécimes foram identificados com um código e tiveram uma seta que indicava o sentido da fabricação (rolo). Apenas depois dessa identificação e marcação foram recortados os espécimes;
- 6° - Todos os espécimes foram pesados e suas massas por unidade de área equivalentes determinadas;
- 7° - A princípio, utilizou-se a escolha aleatória dos espécimes, proposta por Gardoni (1995), conforme empregado por pesquisas anteriores (GARDONI, 2000; SILVA, 2014; TREJOS GALVIS, 2016; MORAES FILHO, 2018). No entanto, durante a avaliação da massa por unidade de área realizada num espécime de 300 mm x 300 mm, observou-se que a variabilidade dessa propriedade já garantia a aleatoriedade desejada. Sendo assim, priorizou-se os espécimes que apresentavam os valores de massa por unidade de área iguais e, posteriormente, os que apresentavam a menor variação ($\pm 10\%$) do valor especificado pelo fabricante (200 e 300 g/m²).

Figura 3.5 - Traçado da malha para recorte dos espécimes de 300 mm x 300 mm - (MELO, 2018).



Após os procedimentos realizados por Melo (2018), foram desenhados com canetas permanentes 4 (quatro) círculos com 96 mm de diâmetro em cada espécime de 300 x 300 mm de GTNT. Esse procedimento foi realizado em 8 (oito) espécimes de GTNT₂₀₀ e em 8 espécimes de GTNT₃₀₀, de modo a obter 32 (trinta e duas) amostras circulares de 96 mm de cada tipo de GTNT.

Foram então identificadas cada um das 32 (trinta e duas) amostras circulares de cada tipo de GTNT, sendo posteriormente escolhidos aleatoriamente 12 (doze) amostras de cada tipo de GTNT para a realização dos ensaios de permeabilidade a carga constante dos RCD-R (pó de entulho e areia cinza) e areia natural associados aos GTNT. As amostras escolhidas foram então recortadas e, em seguida, lavadas em água destilada para retirada de quaisquer impurezas que pudessem estar impregnadas. Deixou-se secar por 24 horas em ambiente limpo e externo ao laboratório para que não ocorresse a impregnação de impurezas nas amostras de GTNT.

Por fim, as amostras de GTNT foram impregnadas com silicone em seu perímetro (Figura 3.6), possibilitando a impermeabilização lateral dos GTNT, de modo a evitar vazamentos durante a realização dos ensaios.

Figura 3.6 - GTNT com bordas impregnadas por silicone.



3.2.3 Ensaio de permeabilidade a carga constante

Os ensaios de permeabilidade à carga constante foram realizados, no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB), com a utilização do permeâmetro desenvolvido por Gardoni (2000). O equipamento consiste em um permeâmetro cilíndrico, feito de aço inoxidável, com 12 orifícios distribuídos ao longo da altura do cilindro, para medições de carga hidráulica. A distância entre os orifícios e a superfície da amostra de geotêxtil varia entre 3 mm e 75 mm. Os orifícios foram localizados em pontos específicos para a definição dos valores de razão entre gradientes (GR) por diferentes autores. Contudo, ressalta-se que não foram realizados ensaios do tipo razão entre gradientes nesta pesquisa. O equipamento pode ser visto nas Figuras 3.7 e 3.8.

Figura 3.7 - Esquema do permeâmetro de Gardoni (2000) - (BESSA DA LUZ, 2004).

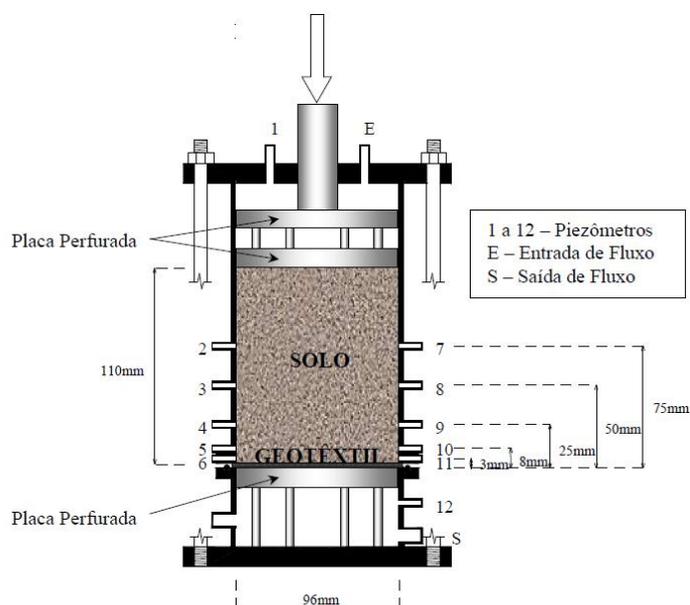


Figura 3.8 - Permeômetro de Gardoni (2000) - (Próprio autor).



Legenda: 1 – Reservatório de água; 2 – Permeômetro; 3 – Filtro de areia.

Optou-se pelo permeômetro desenvolvido por Gardoni (2000) em relação ao permeômetro de carga constante convencional porque o primeiro permite a aplicação de cargas verticais no topo do permeômetro durante a realização do ensaio, o que permite simular condições observadas no campo. Dessa forma, foi possível analisar o quanto a aplicação de tensões normais pode influenciar a permeabilidade dos RCD-R (pó de entulho e areia cinza) e da areia natural, sem ou com a associação aos GTNT. A preparação e execução dos ensaios permeabilidade – exceto a aplicação de tensões normais – foram realizadas conforme os procedimentos técnicos preconizados na NBR 13292 (ABNT, 1995b). Nos ensaios em que os RCD-R (pó de entulho e areia cinza) e a areia natural foram associados aos GTNT, as amostras de geotêxtil foram colocadas na parte inferior do permeômetro, logo abaixo dos materiais granulares; e, entre o GTNT e uma placa perfurada (localizada na base do permeômetro), foi instalado papel filtro, de modo a garantir o não carreamento de finos. Foram realizados 36 (trinta e seis) ensaios de permeabilidade à carga constante, conforme apresentado na Tabela 3.4.

A água utilizada nos ensaios foi proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Brasília/DF. Antes de chegar ao reservatório de água a carga constante utilizado nos ensaios, a água passava por um filtro de areia. O filtro e reservatório podem ser visualizados na Figura 3.8.

Tabela 3.4 - Relação de ensaios de permeabilidade à carga constante – (Próprio autor).

Tensão vertical (kPa)	Material	GTNT
0	Areia Natural	N.A.
50		
100		
200		
0	Areia Natural	GTNT ₂₀₀
50		
100		
200		
0	Areia Natural	GTNT ₃₀₀
50		
100		
200		
0	Pó de Entulho	N.A.
50		
100		
200		
0	Pó de Entulho	GTNT ₂₀₀
50		
100		
200		
0	Pó de Entulho	GTNT ₃₀₀
50		
100		
200		
0	Areia Cinza	N.A.
50		
100		
200		
0	Areia Cinza	GTNT ₂₀₀
50		
100		
200		
0	Areia Cinza	GTNT ₃₀₀
50		
100		
200		

Nota: N.A. = Não se aplica.

3.2.4 Ensaio de granulometria após o ensaio de permeabilidade à carga constante

A fim de analisar eventual quebra de grãos em decorrência da aplicação de tensões normais durante o ensaio de permeabilidade à carga constante, após a realização de cada ensaio extraiu-se do corpo de prova amostras do topo (imediatamente abaixo da placa de aplicação de tensão), meio (altura média do corpo de prova) e base (imediatamente acima da placa perfurada) para análise de granulometria. Essas amostras foram colocadas em cápsulas, levadas à estufa, onde permaneceram por 24 horas, e, posteriormente, realizou-se o peneiramento grosso das amostras

com aproximadamente 40 g. A porção passante na peneira de abertura 2,0 mm foi ensaiada com o uso de um granulômetro a laser, uma vez que essa é a limitação do equipamento. Os ensaios de granulometria a laser foram realizados no Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB).

3.2.5 Ensaios para análise de água utilizada nos ensaios de permeabilidade à carga constante

Com propósito de verificar a presença de sólidos e outras impurezas na água utilizada nos ensaios de permeabilidade a carga constante, foram coletadas 02 (duas) amostras de água da rede pública de abastecimento da cidade de Brasília/DF. O local de coleta foi o Laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB), sendo o ponto de coleta o reservatório de água do permeâmetro. Antes de cada coleta, foi realizada a limpeza do filtro e do reservatório, com auxílio de esponja, água e sem a utilização de sabão. A primeira coleta ocorreu no dia 06 de novembro de 2019, antes do início da bateria de 12 (doze) ensaios de permeabilidade à carga constante dos RCD-R (pó de entulho e areia cinza) e da areia natural associados ao GTNT₂₀₀. A segunda coleta ocorreu no dia 18 de novembro de 2019, antes de iniciar a última bateria de 12 (doze) ensaios de permeabilidade à carga constante dos RCD-R (pó de entulho e areia cinza) e da areia natural associados ao GTNT₃₀₀.

Após a coleta, as amostras foram armazenadas em geladeira conforme recomendações da *American Public Health Association* (APHA, 2017). A análise da água utilizada nos ensaios de permeabilidade à carga constante se justifica para verificar a eventual presença de impurezas ou substâncias que poderiam vir a ficar impregnadas nos GTNT. Todos os ensaios de análise das amostras de água coletadas foram realizados no Laboratório de Análises de Águas (LAnA), da Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA), da Universidade Federal de Goiás (UFG).

Os ensaios realizados na análise da água, assim como as normas empregadas, são apresentados na Tabela 3.5. Ressalta-se que a NBR 13292 (ABNT, 1995b) permite o uso de água da rede pública em ensaios de permeabilidade à carga constante, devendo a água estar livre de partículas sólidas suspensas. Observou-se que a água atende aos padrões de potabilidade, e não apresentam partículas sólidas dissolvidas e impurezas em quantidade suficiente para influenciar resultados dos ensaios de permeabilidade à carga constante dos materiais.

Tabela 3.5 - Resultados das análises de água - (Próprio autor).

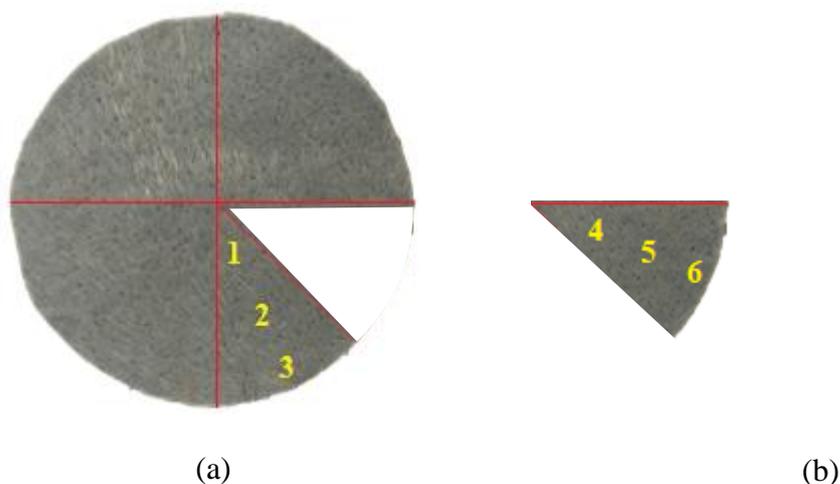
Análise	Amostra 1	Amostra 2	Valor limite	Norma
Cor (uH)	4,5	4,1	15,0	
Turbidez (UTN)	2,05	1,98	5,0	
pH	7,13 (22,3°C)	7,06 (23,2°C)	6,0 a 9,5	Portaria nº 2.914 (BRASIL, 2011)
Ferro Total (mg/L)	0,01	0,01	0,3	
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)	13,0	5,0	1.000	
Condutividade (µS/cm)	38,08	33,92	50 a 1.500	(APHA, 2017)

3.2.6 Ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e de Espectroscopia de raios x por dispersão em energia (EDS)

Após a realização dos ensaios de permeabilidade dos RCD-R (pó de entulho e areia cinza) e da areia natural associados aos geotêxteis não tecido (GTNT), amostras de GTNT foram avaliadas com o intuito de verificar a ocorrência de colmatação (entupimento) devido à presença de partículas finas, o que poderia causar a obstrução superficial e interna do geotêxtil. Para isso, realizou-se ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), os quais foram realizados no Centro Regional para o Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (Crti) da Universidade Federal de Goiás (UFG), Campus Samambaia, em Goiânia-GO.

As amostras circulares de GTNT foram divididas em quatro setores de círculo, tendo um dos setores sido recortado. Em seguida, esse 1/4 de círculo foi recortado ao meio, de modo que fosse ensaiado as duas faces: i) a que esteve em contato com o material (RCD-R ou areia natural) e ii) a que esteve em contato com o papel filtro (instalado acima da placa perfurada). Foram estabelecidos três pontos de análise em cada uma das faces: i) próximo ao centro; ii) entre o centro e a borda; e iii) próximo à borda. Os números 1, 2 e 3 (Figura 3.9 a) mostram as localizações dos pontos de análise da face do GTNT que esteve em contato com o material (RCD-R ou areia natural); já os números 4, 5 e 6 (Figura 3.9 b) mostram as localizações dos pontos de análise da face do GTNT que esteve em contato com o papel filtro, ou seja no verso do GTNT.

Figura 3.9 – Localização dos pontos de análise de imagens por MEV: a) face em contato com os materiais (RCD-R ou areia natural) e b) face em contato com o papel filtro (verso do GTNT) - (Próprio autor).



De modo a acomodar o GTNT no equipamento, foram recortados quadrados de aproximadamente 4 mm de aresta em cada um dos 6 (seis) pontos de análise de cada amostra. Em seguida, os quadrados de GTNT foram levados à estufa (temperatura 70°C), para secagem por um período de 24 horas. Após a secagem, dessas amostras foram colocadas em um recipiente com tampa, sendo o fundo preenchido por sílica gel azul. Acima da sílica gel azul foi colocado um papel toalha, onde foram depositadas as amostras quadradas de geotêxtil, devidamente identificadas.

Os ensaios foram realizados em um microscópio eletrônico de varredura de baixo vácuo, não sendo necessário o procedimento de recobrimento com carbono ou pó de ouro para a realização da análise de imagens. Realizou-se, também, espectroscopia de raios x por dispersão em energia (EDS) para caracterização química das partículas eventualmente impregnadas nos filamentos do GTNT.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados e análises da caracterização geotécnica dos RCD-R e da areia natural, com a avaliação das suas variabilidades. São também apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de permeabilidade à carga constante, da análise granulométrica das amostras submetidas aos ensaios de permeabilidade e dos ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

4.1. CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DOS MATERIAIS

Neste item são apresentados os resultados e análises dos ensaios de distribuição granulométrica, massa específica dos sólidos passante na peneira de 4,8 mm, limites de consistência, compactação, índices de vazios máximo e mínimo e cisalhamento direto.

4.1.1. Análise Granulométrica

As curvas de distribuição granulométrica com e sem o uso de defloculante foram muito semelhantes para a areia natural (AN). Essa constatação se deu devido ao fato da AN ser um material originado de leito de rio e, assim, não conter agregações de partículas que pudessem ser rompidas com a atuação do defloculante. Pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), a amostra ensaiada não atende ao critério granulométrico para ser classificada como uma ‘areia pura’, pois apresenta mais de 5% de finos e, também, não atende ao critério para ser classificada como uma ‘areia com finos’ pois tem menos de 12% de finos. Segundo a ABNT (1995), a AN é classificada como ‘areia média’. As curvas de distribuição granulométrica da AN podem ser vistas na Figura 4.1. Os resumos dos resultados são apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2.

Figura 4.1 - Curvas de distribuição granulométrica da areia natural - (Próprio autor).

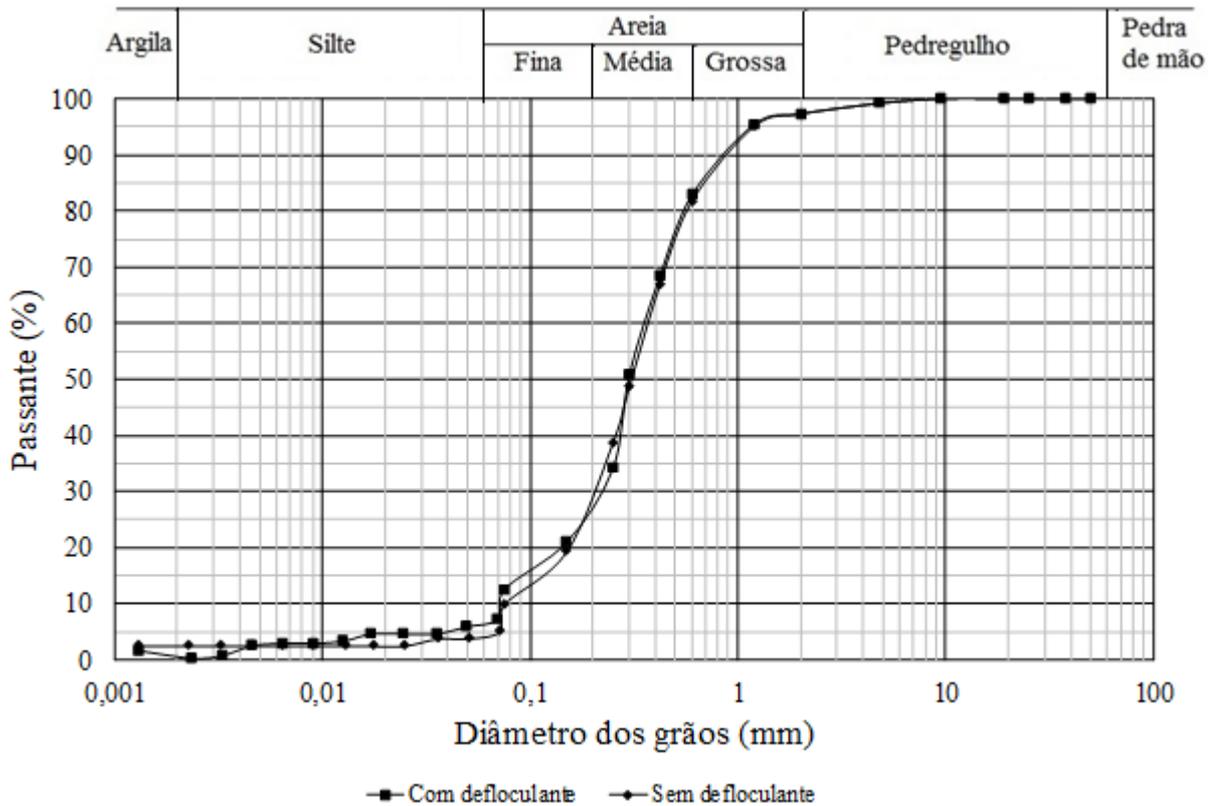


Tabela 4.1 - Frações granulométricas da areia natural - (Próprio autor).

	Argila	Silte	Areia			Pedregulho
			Fina	Média	Grossa	
Sem defloculante	0,51%	2,00%	26,45%	52,77%	15,52%	2,75%
Com defloculante	0,71%	5,83%	20,98%	55,31%	14,42%	2,75%

Tabela 4.2 - Propriedades granulométricas da areia natural - (Próprio autor).

	Sem defloculante	Com defloculante
D_{10} (mm)	0,0758	0,0725
D_{15} (mm)	0,116	0,097
D_{35} (mm)	0,231	0,253
D_{50} (mm)	0,309	0,297
D_{60} (mm)	0,375	0,363
D_{85} (mm)	0,747	0,703
$C_U = D_{60}/D_{10}$	4,95	5,00
$C_C = D_{30}^2/D_{60}.D_{10}$	1,48	1,82

Os resultados da areia cinza (AC) revelaram curvas de distribuição granulométrica com e sem defloculante com diferenças na fração ‘silte’ – de 0,002 mm a 0,06 mm – (Figura 4.2), sendo a maior variação ocorreu entre 0,01 mm e 0,02 mm. Observou-se que o material não se enquadra nas classificações pelo SUCS, dado que ele atende aos critérios de granulometria para ser classificada como uma ‘areia argilosa’, pois possui mais de 12% de finos (percentual passante na peneira de 0,075 mm de abertura), mas seu comportamento é não plástico. Diante disso, o material não atendeu a todos os critérios estabelecidos pelo SUCS para classificação como ‘areia argilosa’ ou ‘areia siltosa’. Segundo a ABNT (1995), a AC pode ser classificada como uma ‘areia siltosa’. Na Tabela 4.3 constam os percentuais das frações granulométricas da AC, e na Tabela 4.4 são apresentados os seus índices granulométricos, como coeficiente de uniformidade (C_U) e coeficiente de curvatura (C_C).

Figura 4.2 - Curvas de distribuição granulométrica da areia cinza - (Próprio autor).

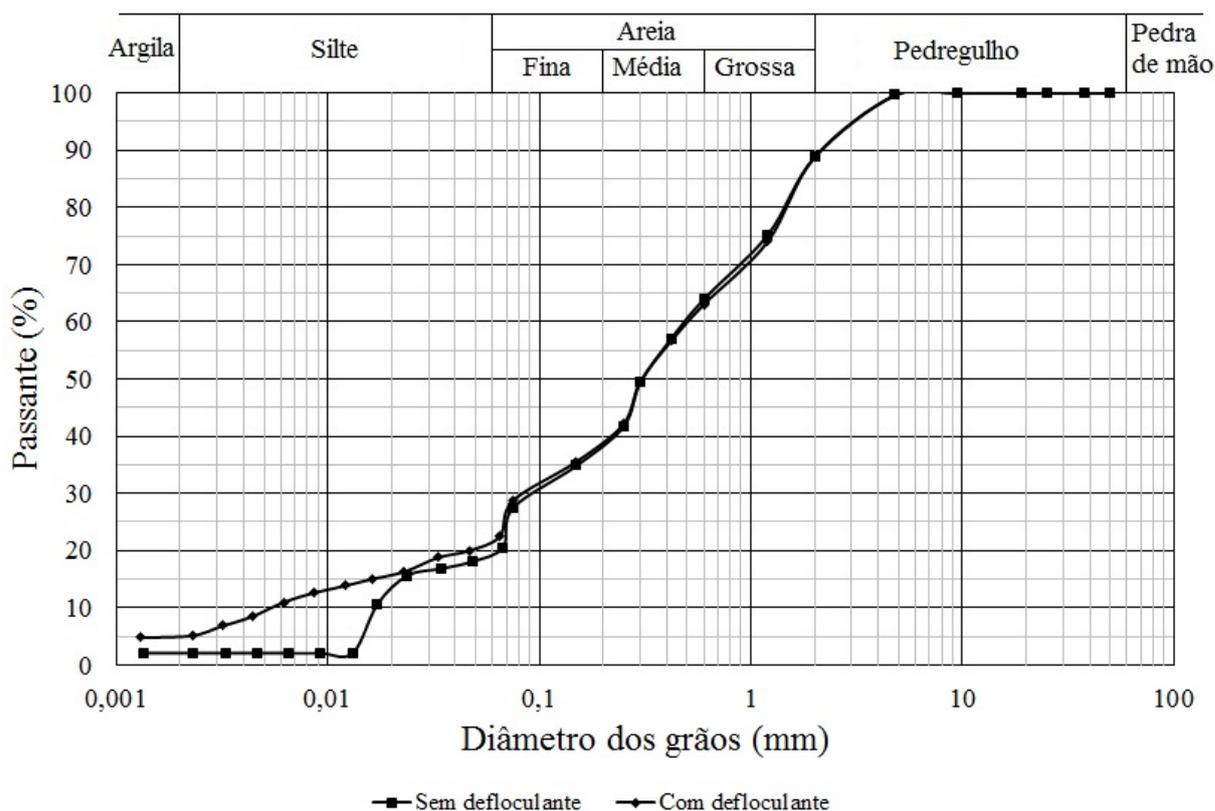


Tabela 4.3 - Frações granulométricas da areia cinza, segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995a) - (Próprio autor).

Amostra	Argila	Silte	Areia			Pedregulho	Pedra de Mão	Matacão
			Fina	Média	Grossa			
Sem defloculante	2,02%	17,56%	18,68%	25,75%	24,81%	11,18%	0,00%	0,00%
Com defloculante	5,06%	16,76%	17,05%	24,21%	25,74%	11,18%	0,00%	0,00%

Tabela 4.4 - Propriedades granulométricas da areia cinza - (Próprio autor).

	Sem defloculante	Com defloculante
D ₁₀ (mm)	0,0169	0,0055
D ₁₅ (mm)	0,023	0,016
D ₃₅ (mm)	0,152	0,144
D ₅₀ (mm)	0,309	0,308
D ₆₀ (mm)	0,495	0,513
D ₈₅ (mm)	1,775	1,775
C _U = D ₆₀ /D ₁₀	29,30	93,74
C _C = D ₃₀ ² /D ₆₀ .D ₁₀	1,22	2,81

As curvas de distribuição granulométricas (sem defloculante) das seis amostras de pó de entulho (PE) apresentaram-se bastante próximas, o que revela que, mesmo sem ter um procedimento específico para a produção desse material, o mesmo apresentou uma baixa variabilidade. De acordo com o SUCS, as seis amostras deste pó de entulho podem ser classificadas como uma ‘areia argilosa com pedregulho’; segundo a ABNT (1995), o pó de entulho pode ser classificado como uma ‘areia pedregulhosa’.

O ensaio revelou que todas as amostras tiveram material integralmente passante nas peneiras com malha de 50 mm de abertura, com quatro amostras passando totalmente na peneira com malha de 38 mm de abertura (Figura 4.3). Observou-se que o material apresentou um incremento de variação do percentual de material passante na fração abaixo da peneira de abertura 0,075 mm (sedimentação sem o uso de defloculante). Enquanto o coeficiente de variação na porção acima da peneira de abertura 0,075 mm apresentou um valor máximo igual a 11 %, na porção inferior ela variou de 9 a 61% (Figura 4.4). A Tabela 4.5 apresenta as informações sobre os percentuais da distribuição granulométrica sem defloculante.

Figura 4.3 - Curvas de distribuição granulométricas (sem defloculante) do pó de entulho – (Próprio autor).

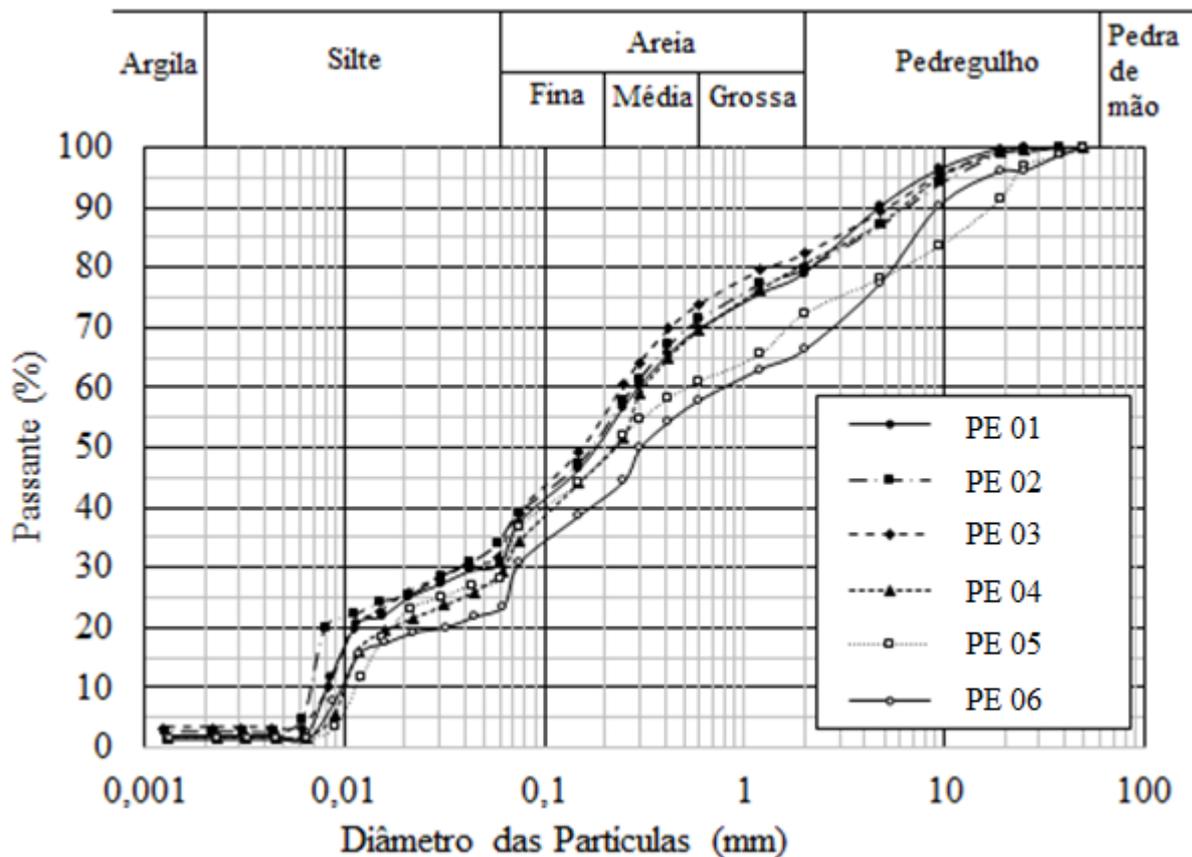


Figura 4.4 - Coeficiente de variação do percentual passante em função da abertura da peneira (pó de entulho sem defloculante) – (Próprio autor).

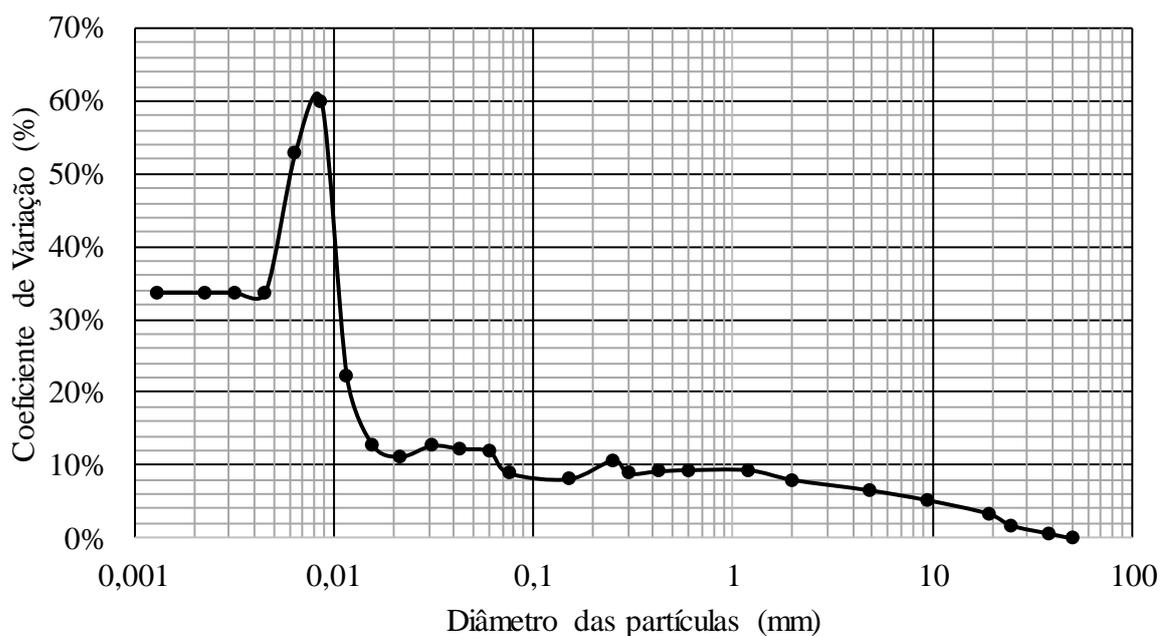


Tabela 4.5 - Frações granulométricas (sem defloculante) do pó de entulho, segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995a) – (Próprio autor).

Amostra	Argila	Silte	Areia			Pedregulho	Pedra de Mão	Matacão
			Fina	Média	Grossa			
PE 01	2,11%	28,64%	20,93%	18,14%	9,24%	20,94%	0,00%	0,00%
PE 02	2,71%	31,79%	18,16%	18,75%	8,37%	20,22%	0,00%	0,00%
PE 03	3,34%	28,96%	22,54%	19,09%	8,38%	17,69%	0,00%	0,00%
PE 04	1,77%	27,09%	19,05%	21,71%	11,00%	19,38%	0,00%	0,00%
PE 05	1,59%	26,47%	20,02%	13,00%	11,26%	27,66%	0,00%	0,00%
PE 06	1,46%	21,94%	18,19%	16,34%	8,35%	33,72%	0,00%	0,00%
Média	2,16%	27,48%	19,82%	17,84%	9,43%	23,27%	0,00%	0,00%
Desvio Padrão	0,007	0,033	0,017	0,029	0,014	0,062	-	-
Coefficiente de Variação (%)	33,74%	11,96%	8,65%	16,47%	14,41%	26,46%	-	-

A partir das curvas de distribuição granulométrica das amostras, extraiu-se informações como o coeficiente de uniformidade do material e o coeficiente de curvatura, como pode ser visto nas Tabela 4.6 (sem defloculante).

Tabela 4.6 - Propriedades granulométricas do pó de entulho (sem defloculante) - (Próprio autor).

Sem defloculante	PE 01	PE 02	PE 03	PE 04	PE 05	PE 06
D ₁₀ (mm)	0,0081	0,0068	0,0084	0,0102	0,0115	0,0097
D ₁₅ (mm)	0,01	0,007	0,01	0,011	0,014	0,012
D ₃₅ (mm)	0,069	0,062	0,059	0,08	0,072	0,115
D ₅₀ (mm)	0,184	0,175	0,157	0,228	0,225	0,304
D ₆₀ (mm)	0,296	0,279	0,246	0,321	0,531	0,842
D ₈₅ (mm)	3,506	4,025	3,079	3,832	11,28	7,547
$C_U = D_{60}/D_{10}$	36,53	40,92	29,34	31,58	46,33	86,80
$C_C = D_{30}^2/D_{60} \cdot D_{10}$	1,05	0,76	0,75	1,24	0,67	0,66

A granulométrica das amostras de PE ensaiadas com defloculante revelou curvas mais próximas (Figura 4.5), o que repercutiu em menores valores de coeficiente de variação, variando de 0 a 14% (Figura 4.6). O uso de defloculante repercutiu também no maior percentuais de finos (silte e argila), revelando a presença marcante de solo da região – reconhecido por ser um solo argiloso (CARDOSO, 2010) – na composição do pó de entulho. A Tabela 4.7 apresenta com as frações da distribuição granulométrica do ensaio com defloculante. Na Tabela 4.8 podem ser vistos coeficiente de uniformidade e de curvatura do material (com defloculante).

Figura 4.5 - Curvas de distribuição granulométricas (com defloculante) do pó de entulho – (Próprio autor).

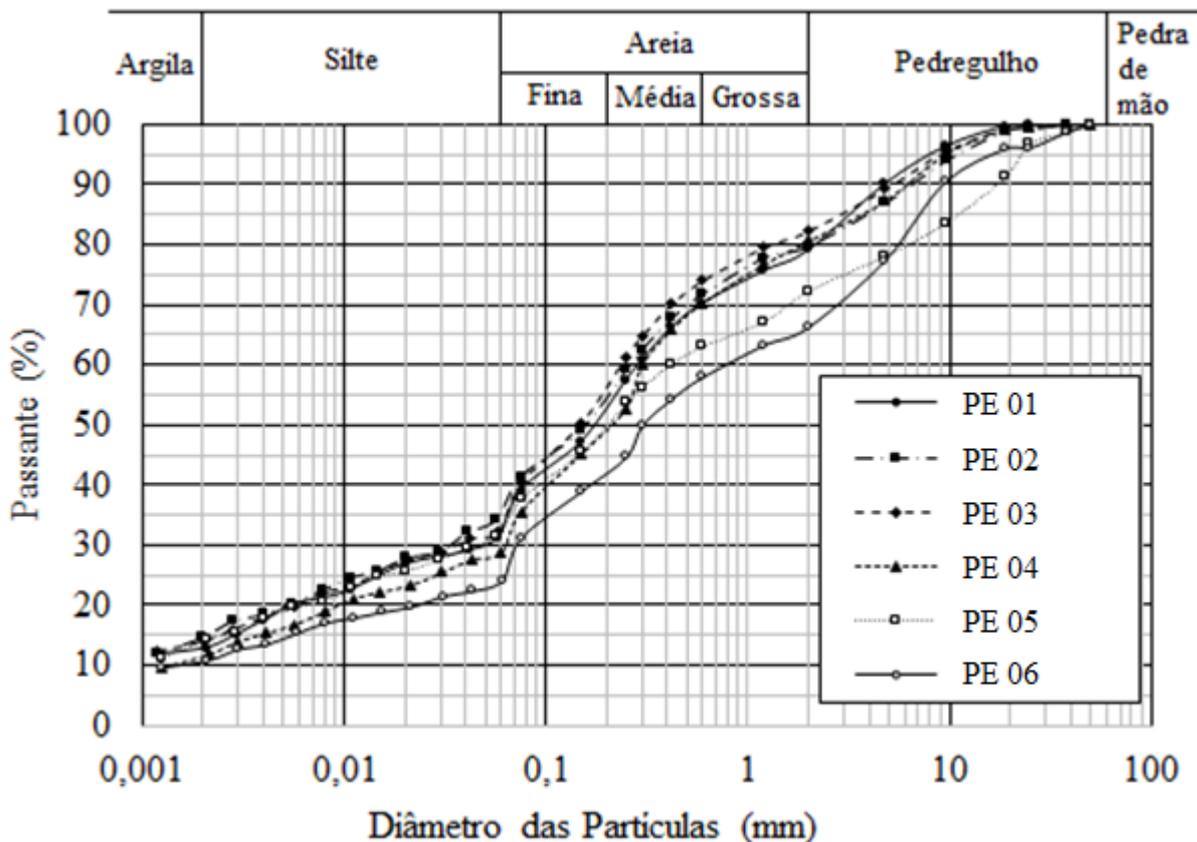


Figura 4.6 - Coeficiente de variação do percentual passante em função da abertura da peneira (pó de entulho com defloculante) – (Próprio autor).

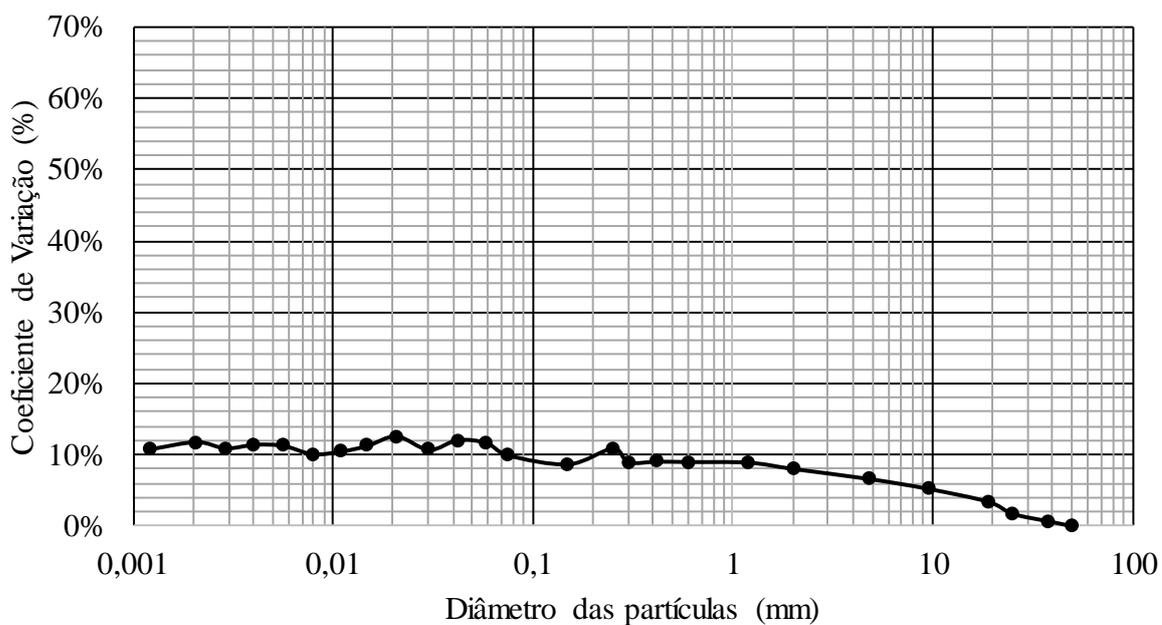


Tabela 4.7 - Frações granulométricas (com defloculante) do pó de entulho, segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995a) – (Próprio autor).

Amostra	Argila	Silte	Areia			Pedregulho	Pedra de Mão	Matacão
			Fina	Média	Grossa			
PE 01	12,79%	19,43%	20,12%	17,95%	8,77%	20,94%	0,00%	0,00%
PE 02	14,65%	20,86%	18,71%	17,66%	7,90%	20,22%	0,00%	0,00%
PE 03	14,07%	18,87%	22,89%	18,23%	8,25%	17,69%	0,00%	0,00%
PE 04	11,55%	17,17%	20,29%	21,37%	10,24%	19,38%	0,00%	0,00%
PE 05	14,10%	18,48%	17,00%	13,52%	9,24%	27,66%	0,00%	0,00%
PE 06	10,72%	13,40%	17,72%	16,15%	8,29%	33,72%	0,00%	0,00%
Média	12,98%	18,04%	19,46%	17,48%	8,78%	23,27%	0,00%	0,00%
Desvio Padrão	0,016	0,026	0,021	0,026	0,009	0,062	-	-
Coefficiente de Variação (%)	12,14%	14,26%	10,91%	14,79%	9,71%	26,46%	-	-

Tabela 4.8 - Propriedades granulométricas do pó de entulho (com defloculante) - (Próprio autor).

Com defloculante	PE 01	PE 02	PE 03	PE 04	PE 05	PE 06
D ₁₀ (mm)	0,0012	0,0012	0,0012	0,0014	0,0012	0,0015
D ₁₅ (mm)	0,003	0,002	0,002	0,004	0,003	0,005
D ₃₅ (mm)	0,066	0,059	0,064	0,074	0,067	0,112
D ₅₀ (mm)	0,177	0,158	0,148	0,213	0,205	0,302
D ₆₀ (mm)	0,287	0,262	0,238	0,299	0,414	0,830
D ₈₅ (mm)	3,506	4,025	3,079	3,832	11,28	7,547
C _U = D ₆₀ /D ₁₀	235,20	220,44	199,79	213,92	334,73	562,83
C _C = D ₃₀ ² /D ₆₀ .D ₁₀	6,67	3,59	4,56	9,42	3,78	4,30

4.1.2. Massa Específica dos Sólidos

Os resultados obtidos nos ensaios de determinação de massa específica dos grãos passante na peneira de 4,8 mm de abertura revelaram valores iguais a 2,713 g/cm³, para a areia natural (AN); 2,713 g/cm³, para a areia cinza (AC); e um valor médio de 2,704 g/cm³, para o pó de entulho (PE), com um coeficiente de variação igual a 0,22%. Percebeu-se que os dois tipos de RCD-R ensaiados (pó de entulho e areia cinza) apresentam valores de massa específica semelhantes ao da AN, o que se apresenta como um fator positivo para o uso desses materiais reciclados em obras geotécnicas. O ensaio de determinação de massa específica dos grãos retidos na peneira de 4,8 mm de abertura não foi realizado, pois todos os materiais investigados apresentaram baixas quantidades de material nessa fração.

Notou-se que a massa específica encontrada para a AC foi bastante próxima ao obtido para o PE. Vale ressaltar que o valor observado de 2,704 g/cm³ mostra-se bastante próximo aos de outros RCD-R produzidos na mesma usina de beneficiamento reportados em pesquisas

anteriores (FLEURY, 2018; SILVESTRE, 2019). Observa-se que esse resultado mostrou-se também próximo aos obtidos em pesquisas anteriores que caracterizaram o solo da região (BRITTO; SANTOS, 2019). Os valores obtidos nos ensaios de massa específica dos sólidos para as amostras de pó de entulho são apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Massa específica dos sólidos do pó de entulho – (Próprio autor).

Amostra	Massa específica dos sólidos (ρ_s) (g/cm ³)
PE 01	2,707
PE 02	2,704
PE 03	2,694
PE 04	2,705
PE 05	2,712
PE 06	2,703
Média	2,704
Desvio Padrão	0,006
Coefficiente de Variação (%)	0,22%

4.1.3. Limites de Consistência

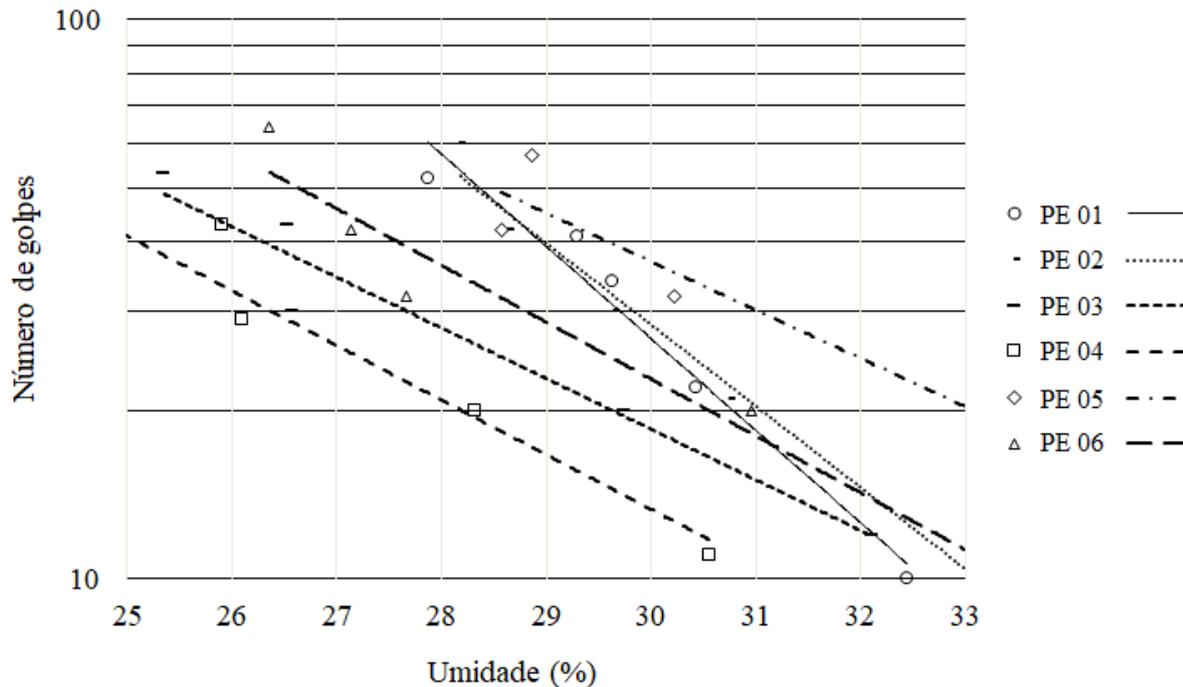
A areia natural (AN) apresentou comportamento não plástico. Esse comportamento se deu devido ao baixo teor de finos do material. O mesmo comportamento foi observado na areia cinza (AC), o que faz com que ambos os materiais (areia natural e areia cinza) sejam semelhantes nesse quesito. Esse resultado, abre a perspectiva de uso desse material reciclado em obras que não permitam o uso de materiais com plasticidade.

Diferentemente dos resultados do demais materiais, o pó de entulho (PE) apresentou comportamento plástico. Todas as amostras de pó de entulho ensaiadas apresentaram resultados de limites de liquidez e plasticidade, reforçando a observação da presença de solo da região na composição desse resíduo. No entanto, verificou-se que os valores de limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP) e de índice de plasticidade (IP) apresentaram baixo coeficiente de variação para as amostras ensaiadas. O valor médio de limite de liquidez e plasticidade foram 30% e 20%, respectivamente, com índice de plasticidade médio de 10%. Observou-se, que as amostras de PE apresentaram índice de atividade (das argilas) normal, ou seja, entre 0,75 e 1,25, exceto a amostra PE 03, que revelou comportamento inativo, ou seja, abaixo de 0,75. Os resultados são apresentados na Tabela 4.10. O comportamento das amostras submetidas ao ensaio de limite de liquidez pode ser visualizado na Figura 4.7.

Tabela 4.10 - Índices de consistência do pó de entulho – (Próprio autor).

Amostra	Limite de Liquidez (LL) (%)	Limite de Plasticidade (LP) (%)	Índice de Plasticidade (IP) (%)	Índice de Atividade (IA)
PE 01	30	20	10	0,78
PE 02	30	19	11	0,75
PE 03	29	21	8	0,57
PE 04	27	17	10	0,87
PE 05	32	21	11	0,78
PE 06	30	20	10	0,93
Média	30	20	10	0,78
Desvio Padrão	1,657	1,506	1,362	0,123
Coefficiente de Variação (%)	5,59%	7,66%	13,55%	15,76%

Figura 4.7 - Resultados do Ensaio de Limite de Liquidez (LL) para o pó de entulho – (Próprio autor).



4.1.4. Compactação

Os resultados obtidos no ensaio de compactação do pó de entulho apresentaram um valor médio de massa específica seca máxima igual a $1,730 \text{ g/cm}^3$, com coeficiente de variação de 1,25%; e valor médio de umidade ótima de compactação de 16,93%, com coeficiente de variação de 4,81% (Tabela 4.11). As curvas de compactação do material são apresentadas na Figura 4.8. Observa-se que os valores obtidos são compatíveis com os de outros RCD-R (Tabela 2.3) e, também, com o solo de Goiânia-GO (BRITTO; SANTOS, 2019). O comportamento observado é favorável a utilização do pó de entulho em obras geotécnicas.

Figura 4.8 - Curva de compactação das amostra de pó de entulho – (Próprio autor).

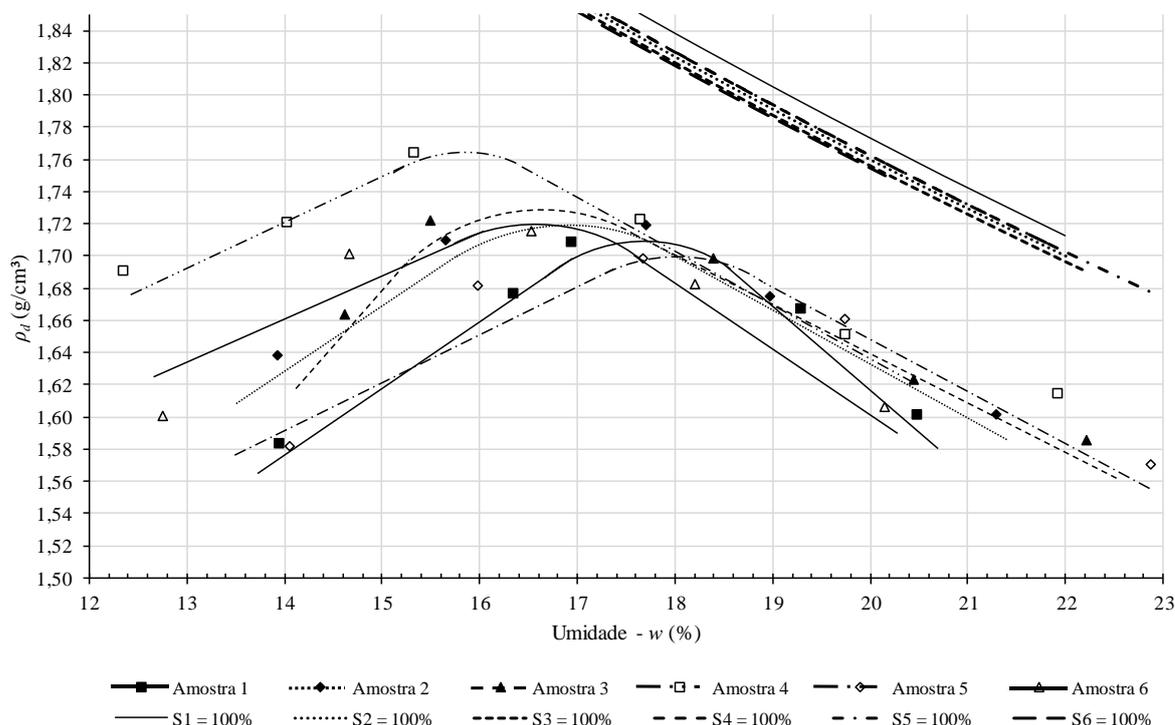


Tabela 4.11 - Resumo dos ensaios de compactação do pó de entulho – (Próprio autor).

Amostra	$\rho_{d\text{máx}}$ (g/cm ³)	w _{ót} (%)
PE 01	1,718	17,7
PE 02	1,725	16,7
PE 03	1,738	16,5
PE 04	1,770	15,9
PE 05	1,710	18,1
PE 06	1,720	16,7
Média	1,730	16,93
Desvio Padrão	0,022	0,814
Coeficiente de Variação (%)	1,25%	4,81%

4.1.5. Índices de Vazios Máximo e Mínimo

Os resultados obtidos nos ensaios de índices de vazios máximo e mínimo da areia natural (AN) são representados na Figura 4.9 e resumidos nas Tabelas 4.12 e 4.13. Os índices de vazios máximo e mínimo de uma areia permitem determinar qual nível de compactidade este material se encontra, ou seja, fofo ou compacto. Usualmente as areias uniformes de grãos arredondados apresentam valores típicos de índices de vazios mínimo e máximo de 0,45 e 0,75, respectivamente. A areia natural utilizada na pesquisa tem granulometria uniforme, e seus

índices de vazios mínimo e máximo se mostram compatíveis aos de areias uniformes de grãos arredondados.

Figura 4.9 - Índices de vazios máximo e mínimo da areia natural - (Próprio autor).

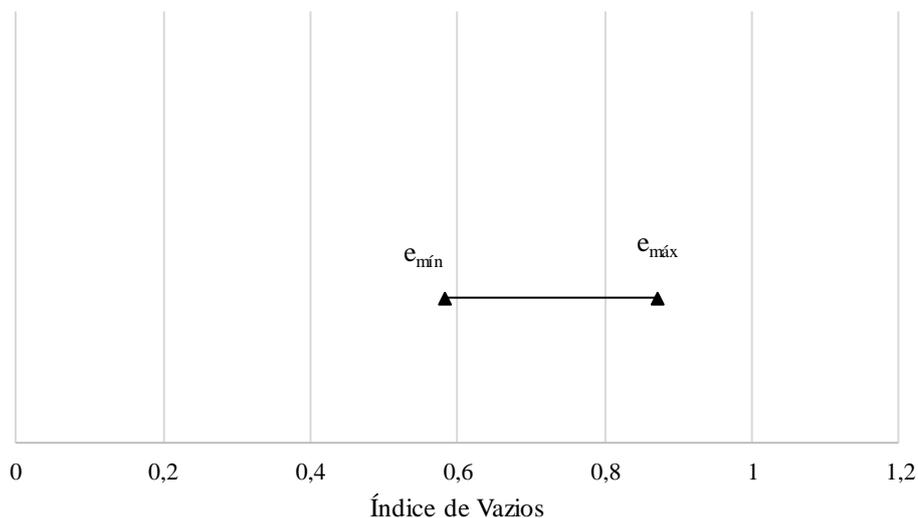


Tabela 4.12 - Resultados do ensaio de determinação de índice de vazios máximo para areia natural - (Próprio autor).

Leitura	Massa específica – ρ (g/cm ³)	Índice de Vazios Máximo - $e_{\text{máx}}$	Índice de Vazios Máximo Médio - $e_{\text{máx}}$
1	1,455	0,86	
2	1,438	0,89	0,87
3	1,453	0,87	

Tabela 4.13 - Resultados do ensaio de determinação de índice de vazios mínimo para areia natural - (Próprio autor).

Leitura	Massa específica – ρ (g/cm ³)	Índice de Vazios Mínimo - $e_{\text{mín}}$	Índice de Vazios Mínimo Médio - $e_{\text{mín}}$
1	1,725	0,57	
2	1,703	0,59	0,58
3	1,712	0,58	

A areia cinza (AC) não apresenta granulometria uniforme, mas seus resultados de índices de vazios mínimo e máximo mostrou-se muito próximo aos valores típicos de areias uniformes de grãos angulares – cujos valores de índice de vazios mínimo e máximo são de 0,70 e 1,10, respectivamente. Por ser um material reciclado oriundo da britagem de materiais de concreto e argamassa, é possível que seus grãos realmente sejam mais angulares do que arredondados. Os resultados obtidos nos ensaios de índices de vazios máximo e mínimo da AC são apresentados na Figura 4.10 e estão resumidos nas Tabelas 4.14 e 4.15.

Figura 4.10 - Índices de vazios máximo e mínimo da areia cinza - (Próprio autor).

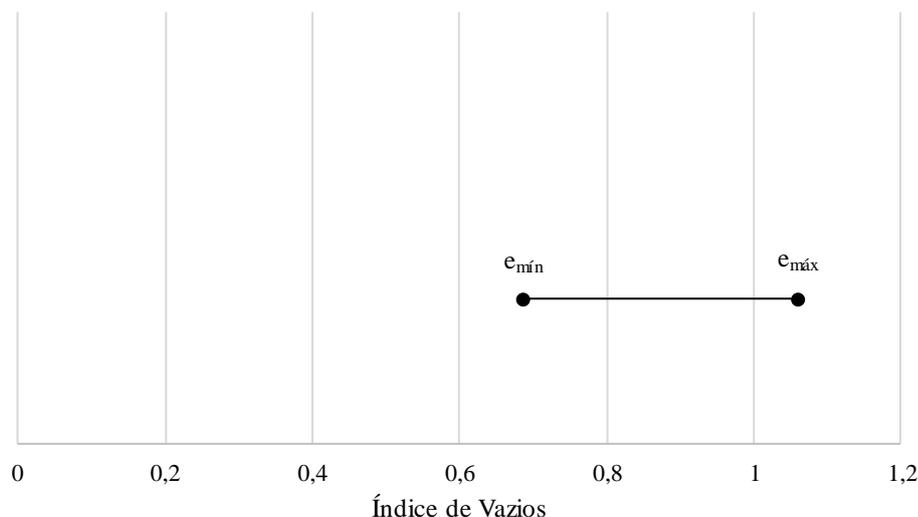


Tabela 4.14 - Resultados do ensaio de determinação de índice de vazios máximo para areia cinza - (Próprio autor).

Leitura	Massa específica – ρ (g/cm ³)	Índice de Vazios Máximo - $e_{máx}$	Índice de Vazios Máximo Médio - $e_{máx}$
1	1,325	1,05	
2	1,325	1,05	1,06
3	1,303	1,08	

Tabela 4.15 - Resultados do ensaio de determinação de índice de vazios mínimo para areia cinza - (Próprio autor).

Leitura	Massa específica – ρ (g/cm ³)	Índice de Vazios Mínimo - $e_{mín}$	Índice de Vazios Mínimo Médio - $e_{mín}$
1	1,606	0,69	
2	1,619	0,68	0,69
3	1,600	0,70	

4.1.6. Cisalhamento Direto

O ensaio de cisalhamento direto revelou a existência de uma tensão de pico, indicando a ruptura do material, seguida por uma tensão residual. Os resultados também indicam que inicialmente houve uma redução de volume do corpo de prova para as três tensões aplicadas, seguida de uma dilatação (aumento de volume) antes de atingir a resistência de pico. Esse tipo de comportamento é comumente observado em areias compactas, onde o entrosamento entre as partículas é maior. As curvas obtidas no ensaio de cisalhamento direto do pó de entulho (PE) são apresentadas nas Figuras 4.11 (Tensão vs. Deslocamento) e 4.12 (deslocamento vertical vs. deslocamento horizontal).

Figura 4.11 - Curva Tensão vs. Deslocamento do ensaio de cisalhamento direto para PE 06 – (Próprio autor).

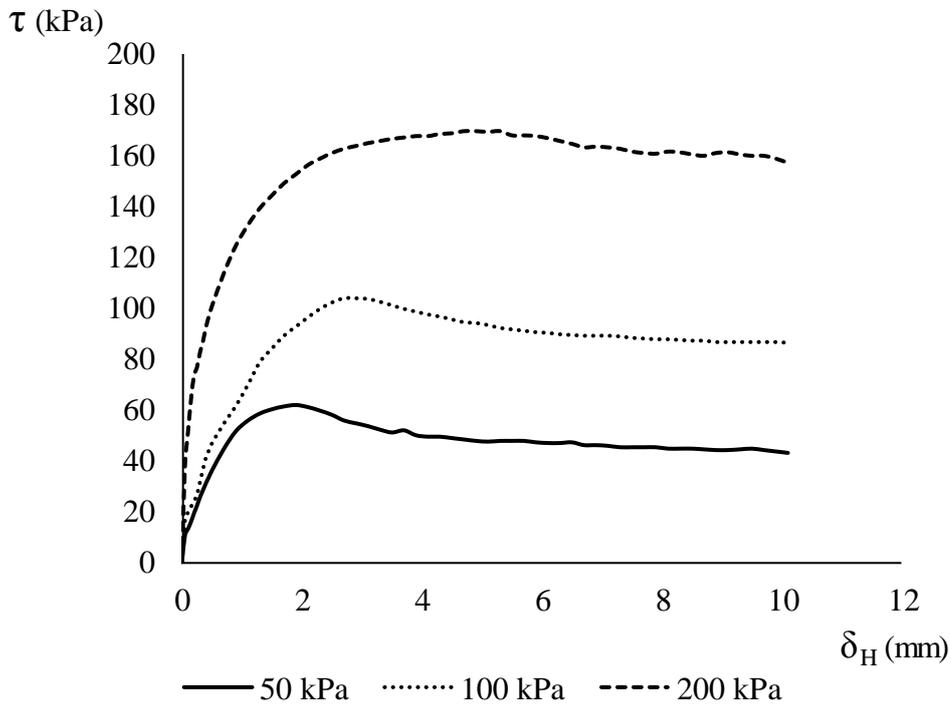
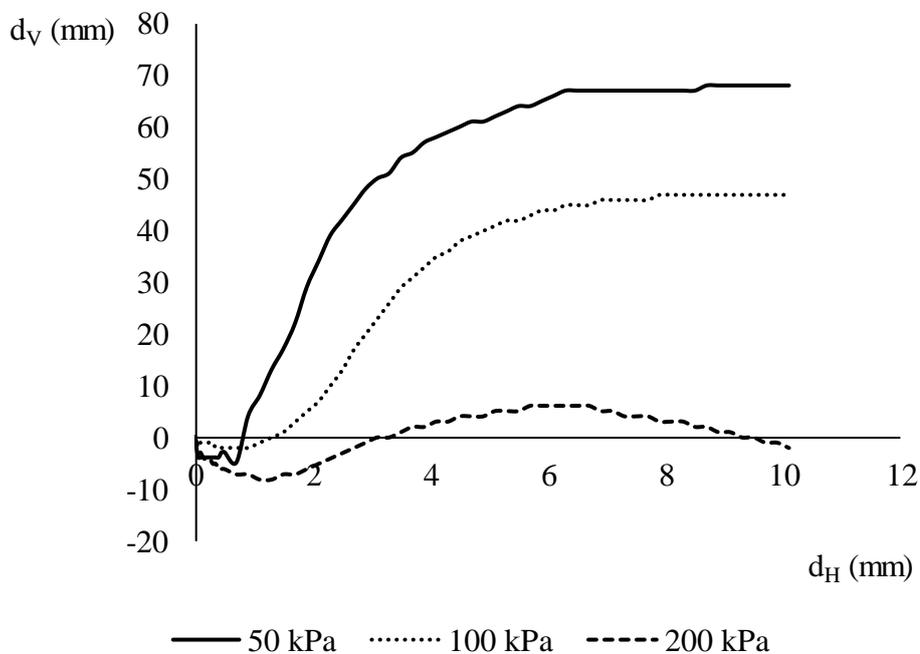


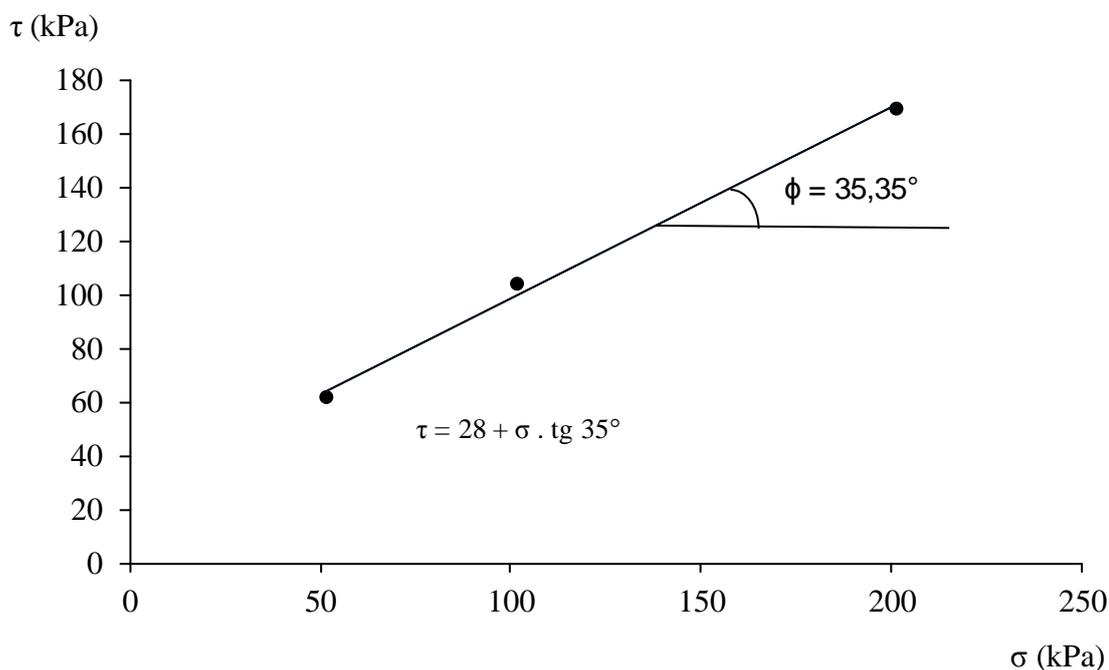
Figura 4.12 - Curva Deslocamento Vertical vs. Deslocamento Horizontal do ensaio de cisalhamento direto para PE 06 - (Próprio autor).



O ensaio de cisalhamento do PE revelou um intercepto de coesão aproximadamente igual a 28 kPa e um ângulo de atrito (ϕ) próximo de 35° . Os resultados de ângulo de atrito mostram-se próximos aos encontrados por estudos anteriores que também caracterizaram RCD-R: bica

corrida (SANTOS; 2009), misto (SANTOS; PALMEIRA; BATHURST, 2013), areia reciclada (ARAÚJO NETO, 2017). A coesão do PE mostrou-se um pouco maior que a dos autores citados, pois há uma maior fração argila na composição do PE do que nos RCD-R investigados pelos autores citados. O resultado obtido para o PE revela que o material tem um bom comportamento mecânico, o que viabilizaria o seu uso como material de construção em várias aplicações geotécnicas. A envoltória é apresentada na Figura 4.13.

Figura 4.13 - Envoltória de resistência da amostra PE 06 - (Próprio autor).



4.2. ENSAIOS DE PERMEABILIDADE SEM GEOTÊXTIL

Inicialmente realizou-se ensaios de permeabilidade à carga constante nos dois tipos de RCD-R (pó de entulho e areia cinza) e na areia natural sem a associação com geotêxtil. Buscou-se obter as propriedades hidráulicas dos materiais nessa condição para diferentes valores de tensão normal aplicada (0, 50, 100 e 200 kPa) durante o ensaio empregando o permeâmetro de Gardoni (2000).

4.2.1. Ensaios de Permeabilidade da Areia Natural

Os resultados do ensaio de permeabilidade revelaram que a areia natural (AN) apresentou uma redução de permeabilidade com o incremento de tensões aplicadas ao topo do permeâmetro (Figura 4.14), o qual também ocasionou aumento da compactidade relativa do material (Figura 4.15). Contudo, a ordem de grandeza de 10^{-3} cm/s – permeabilidade característica de areias finas – permaneceu a mesma para todas as tensões aplicadas, tendo sido observado que o incremento de tensão de 100 kPa para 200 kPa praticamente não alterou o valor de permeabilidade do material. Vale ressaltar que a AN é uma ‘areia média’, e o valor típico de permeabilidade para materiais com essa granulometria é da ordem de 10^{-2} cm/s, diferente do que foi observado no ensaio. Tal redução de permeabilidade pode estar associada a compactidade relativa do material durante o ensaio. Nota-se que para a tensão de 0 kPa, a permeabilidade da AN foi mais próxima a ordem de grandeza de 10^{-2} cm/s que nas demais tensões. Os resultados estão resumidos na Tabela 4.16.

Figura 4.14 - Permeabilidade da areia natural - (Próprio autor).

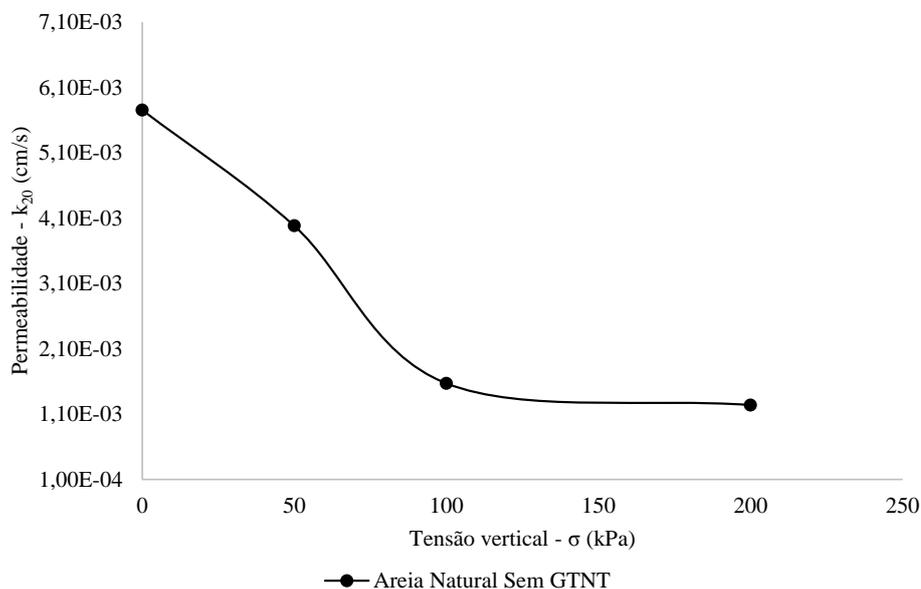


Figura 4.15 - Compacidade relativa da areia natural no ensaio de permeabilidade a carga constante - (Próprio autor).

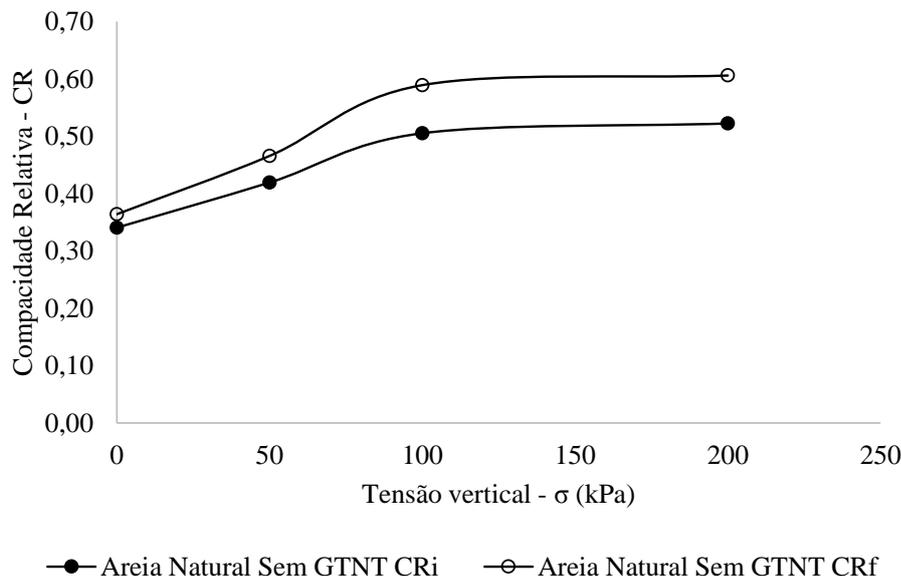


Tabela 4.16 - Resumo dos resultados obtidos no ensaio de permeabilidade da areia natural - (Próprio autor).

Tensão (σ) KPa	Compacidade Relativa Inicial CRi	Compacidade Relativa Final CRf	Permeabilidade (k_{20}) cm/s
0	0,34	0,36	$5,76 \times 10^{-3}$
50	0,42	0,47	$3,98 \times 10^{-3}$
100	0,51	0,59	$1,57 \times 10^{-3}$
200	0,52	0,61	$1,24 \times 10^{-3}$

4.2.2. Ensaios de Permeabilidade da Areia Cinza

A análise dos resultados mostrou que a areia cinza apresentou um comportamento com pouca oscilação, mantendo valores quase constantes, não sofrendo variações consideráveis em sua permeabilidade, mesmo diante dos incrementos na tensão normal aplicada ao topo do permeâmetro e, conseqüente, aumento na compacidade relativa do material. Os resultados obtidos nos ensaios são apresentados nas Figuras 4.16 e 4.17 e resumidos na Tabela 4.17.

A permeabilidade da areia cinza permaneceu na ordem de grandeza de 10^{-3} cm/s em todos os níveis de tensão aplicados ao topo. Seus valores de permeabilidade mostraram-se semelhantes aos de areias finas, embora tenha em sua composição uma maior presença de areias média e grossa. Isso revela que a simples aplicação de valores correlacionados à análise granulométrica de solos pode repercutir em valores equivocados de permeabilidade de areias recicladas.

Figura 4.16 - Permeabilidade da areia cinza - (Próprio autor).

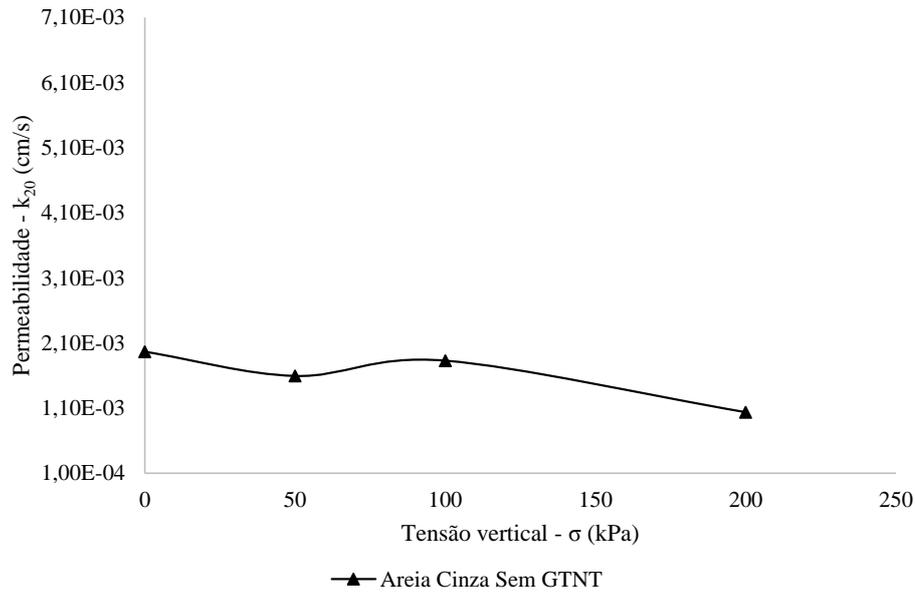


Figura 4.17 - Compacidade relativa da areia cinza no ensaio de permeabilidade a carga constante - (Próprio autor).

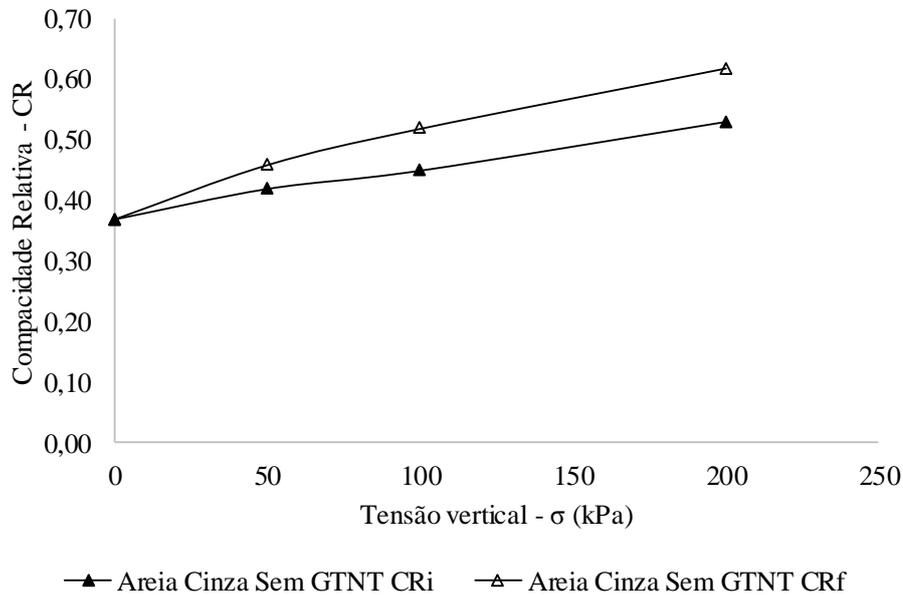


Tabela 4.17 - Resumo dos resultados obtidos no ensaio de permeabilidade da areia cinza - (Próprio autor).

Tensão (σ) kPa	Compacidade Relativa Inicial CRi	Compacidade Relativa Final CRf	Permeabilidade (k_{20}) cm/s
0	0,37	0,37	$1,97 \times 10^{-3}$
50	0,42	0,46	$1,59 \times 10^{-3}$
100	0,45	0,52	$1,83 \times 10^{-3}$
200	0,53	0,62	$1,04 \times 10^{-3}$

4.2.3. Ensaios de Permeabilidade do Pó de Entulho

Os resultados do pó de entulho revelaram uma redução na permeabilidade diante do aumento de tensão normal aplicada e consequente aumento do grau de compactação da amostra. Contudo, observou-se que essa redução ocorreu de maneira acentuada até 50 kPa; e praticamente não houve alteração da permeabilidade até a tensão de 200 kPa. Verificou-se a redução de permeabilidade da ordem de 10^{-3} para 10^{-4} cm/s, lembrando que os coeficientes de permeabilidade da ordem de 10^{-3} cm/s são comumente encontrados em materiais classificados como ‘areia fina’, e da ordem de 10^{-4} cm/s para ‘silte’. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 4.18 e 4.19 e resumidos na Tabela 4.18.

Embora os resultados obtidos nos ensaios de permeabilidade tenham se mostrado adequados para a classificação granulométrica do material, deve-se atentar para o efeito que o carregamento causou na permeabilidade. Vale ressaltar também que a permeabilidade do pó de entulho mostrou-se próxima às permeabilidades de outros RCD-R de granulometria e grau de compactação semelhantes apresentados em trabalhos anteriores: areia pedregulhosa (COUTO; SANTOS, 2016), areia pedregulhosa (ROSA; SANTOS, 2016); areia com pedregulhos (SILVA; SANTOS, 2016) – apresentados anteriormente na Tabela 2.8.

Figura 4.18 - Permeabilidade do pó de entulho - (Próprio autor).

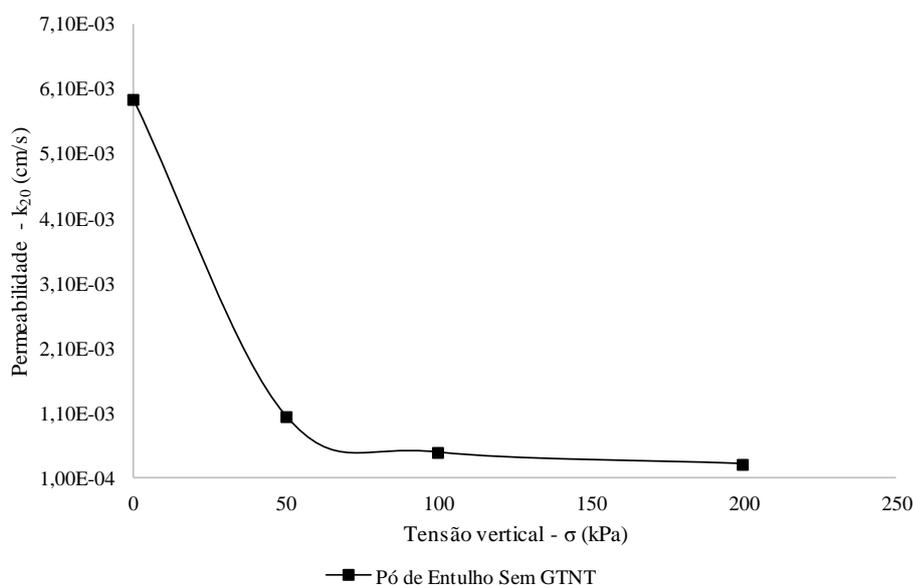


Figura 4.19 - Grau de compactação do pó de entulho no ensaio de permeabilidade a carga constante - (Próprio autor).

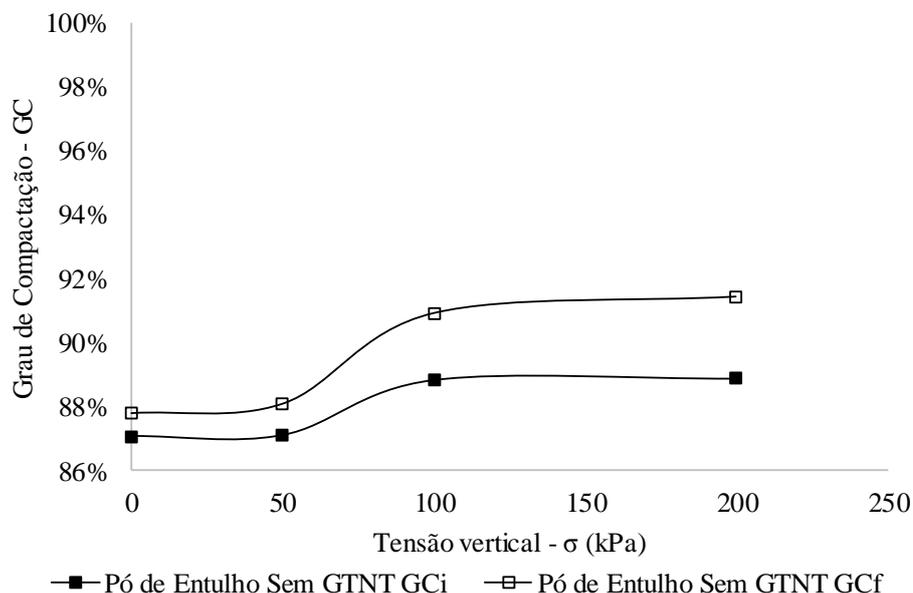


Tabela 4.18 - Resumo dos resultados obtidos no ensaio de permeabilidade do pó de entulho - (Próprio autor).

Tensão (σ) kPa	Grau de Compactação Inicial (GCi) (%)	Grau de Compactação Final (GCf) (%)	Permeabilidade (k_{20}) cm/s
0	87,08	87,79	$5,95 \times 10^{-3}$
50	87,11	88,08	$1,05 \times 10^{-3}$
100	88,85	90,93	$4,83 \times 10^{-4}$
200	88,90	91,45	$3,06 \times 10^{-4}$

4.2.4. Comparativo entre as permeabilidades dos materiais reciclados e a areia natural

A comparação dos resultados dos materiais reciclados e da areia natural, mostrou que o pó de entulho foi o material que apresentou maior sensibilidade à aplicação de tensões no topo do permeâmetro, variando sua ordem de grandeza de 10^{-3} cm/s para 10^{-4} cm/s. Uma explicação para essa redução consiste no baixo grau de compactação decorrente da introdução do material dentro de permeâmetro, uma vez que a NBR 13292 (ABNT, 1995b) prevê o simples lançamento do material, com auxílio de funil com bico de 25 mm de diâmetro, a uma altura de aproximadamente 10 mm em queda livre para a formação das camadas. Uma outra explicação para tal comportamento está no fato do pó de entulho ser internamente instável, o que significa ter suscetibilidade ao fenômeno da sufusão, que é uma movimentação das partículas finas do

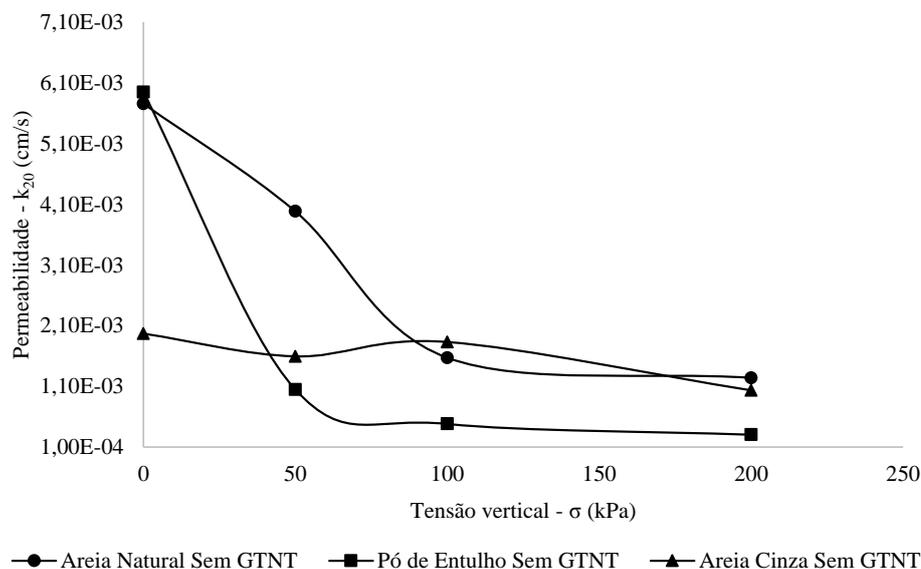
material entre os vazios das maiores partículas dentro do permêmetro ao aplicar um fluxo. Dessa forma, a redução dos vazios de uma porção do material, dificulta a passagem do fluxo de água, repercutindo também na redução da permeabilidade do material.

Observou-se que a areia cinza (AC) apresentou um comportamento distinto dos demais materiais. Os valores de permeabilidade oscilaram pouco com a aplicação de tensão normal, permanecendo na mesma ordem de grandeza (10^{-3} cm/s) em todos os estágios de tensão. Contudo, tal valor é normalmente relacionado a areias finas, o que não é o caso da areia cinza, uma vez que esse material apresenta maiores porções de areias média e grossa. O comportamento da areia cinza mostrou-se semelhante ao de areias finas, o que pode ser uma influência da presença significativa de silte (17%) na sua composição.

Por outro lado, verificou-se que a areia natural apresentou um comportamento semelhante ao do pó de entulho, apresentando uma queda de permeabilidade mais acentuada até o valor de 100 kPa de tensão, e, a partir dessa tensão, praticamente manteve o valor de permeabilidade até a tensão de 200 kPa. O aumento de tensão repercutiu em um aumento da compacidade relativa da areia, reduzindo seus vazios, dificultando a passagem do fluxo d'água, reduzindo a permeabilidade do material. Porém, a redução apesar de acentuada, não alterou a ordem de grandeza da permeabilidade.

Tendo em vista que os dois tipos de RCD-R (pó de entulho e areia cinza) apresentaram valores de permeabilidade próximos ao da areia natural, pode-se vislumbrar o uso desses materiais em obras geotécnicas que necessitem de características semelhantes às de areias, desde que esses materiais reciclados apresentem as demais propriedades adequadas a específica aplicação. O gráfico comparativo entre as permeabilidades dos três materiais, para todos os níveis de tensão investigados, é apresentado na Figura 4.20.

Figura 4.20 - Permeabilidade dos materiais - (Próprio autor).



4.3. ENSAIOS DE PERMEABILIDADE COM GEOTÊXTIL

Os ensaios de permeabilidade à carga constante foram realizados nos dois tipos de RCD-R (pó de entulho e areia cinza) e na areia natural associados aos geotêxteis de 200 e 300 g/m². As tensões aplicadas ao topo de permeâmetro foram as mesmas dos ensaios sem geotêxtil, ou seja, 0, 50, 100 e 200 kPa. Não foram realizadas análises dos critérios de filtro para a escolha dos geotêxteis, sendo eles escolhidos de acordo com a disponibilidade no Laboratório de Geotecnia da UnB.

4.3.1. Ensaios de Permeabilidade da Areia Natural

A permeabilidade da areia natural (AN) mostrou-se praticamente constante quando associada ao GTNT₂₀₀ e submetida a aplicação de tensão no topo do permeâmetro. Na associação com o GTNT₃₀₀, a permeabilidade da areia natural sofreu uma redução em sua ordem de grandeza com a aplicação de tensão no topo de permeâmetro, porém não acentuada se considerados os valores obtidos nos ensaios.

Quando comparada com a condição sem geotêxtil, observou-se que a associação com o GTNT₂₀₀ apresentou baixa influência na permeabilidade da areia natural quando se nota que a ordem de grandeza dos resultados (10^{-3} cm/s) foi a mesma. Já o GTNT₃₀₀ apresentou maior influência na permeabilidade, reduzindo sua ordem de grandeza para 10^{-4} cm/s, típico de siltes.

Resultados mostram que a permeabilidade da AN associada ao GTNT₂₀₀ foi quase constante, mesmo variando a tensão aplicada ao topo do permeâmetro, resultado semelhante ao observado com a associação ao GTNT₃₀₀. Essa quase constância na permeabilidade da areia natural pode ser explicada pelo fato de o material apresentar estabilidade interna segundo o critério de Kenney e Lau (1985). Os critérios de retenção e permeabilidade de Lafleur (1999) são atendidos pelos dois geotêxteis quando utilizados com a areia natural, como pode ser visto na Tabela 4.19. Os resultados de permeabilidade da areia natural são expressos nas Figuras 4.22 e 4.23 e resumidos na Tabela 4.20. Na Figura 4.21, pode-se conferir sua estabilidade interna segundo Kenney e Lau (1985).

Figura 4.21 - Critério de Kenney e Lau (1985) aplicado a areia natural - (Próprio autor).

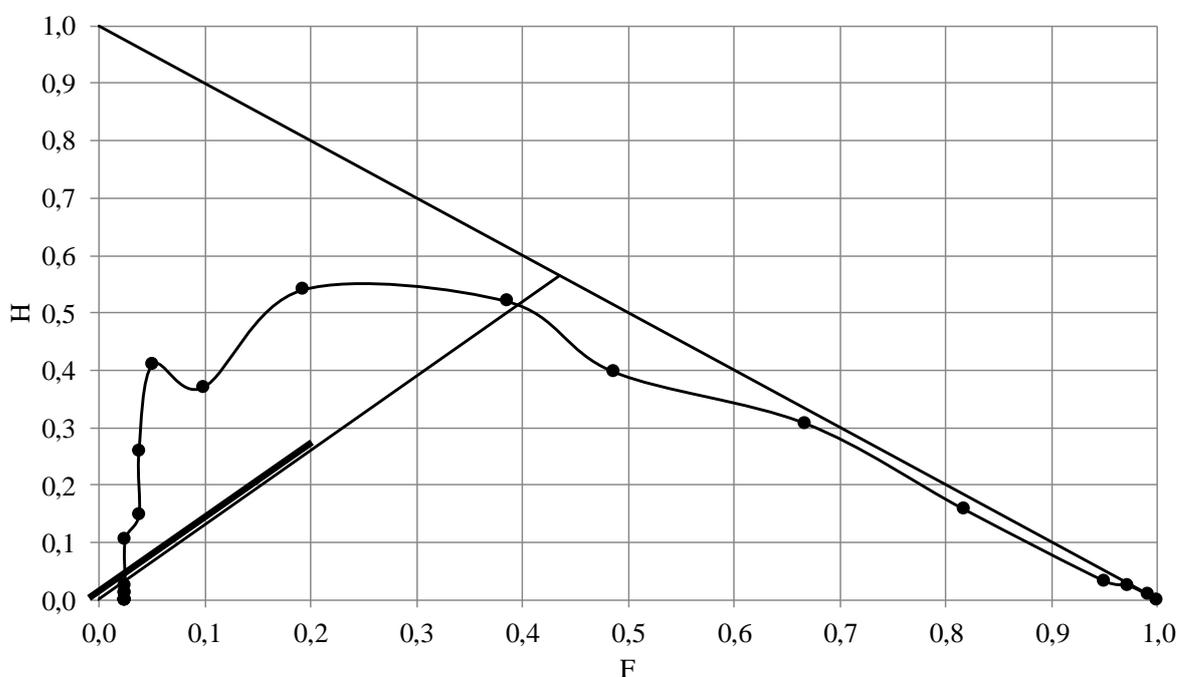


Figura 4.22 - Permeabilidade da areia natural associada aos geotêxteis - (Próprio autor).

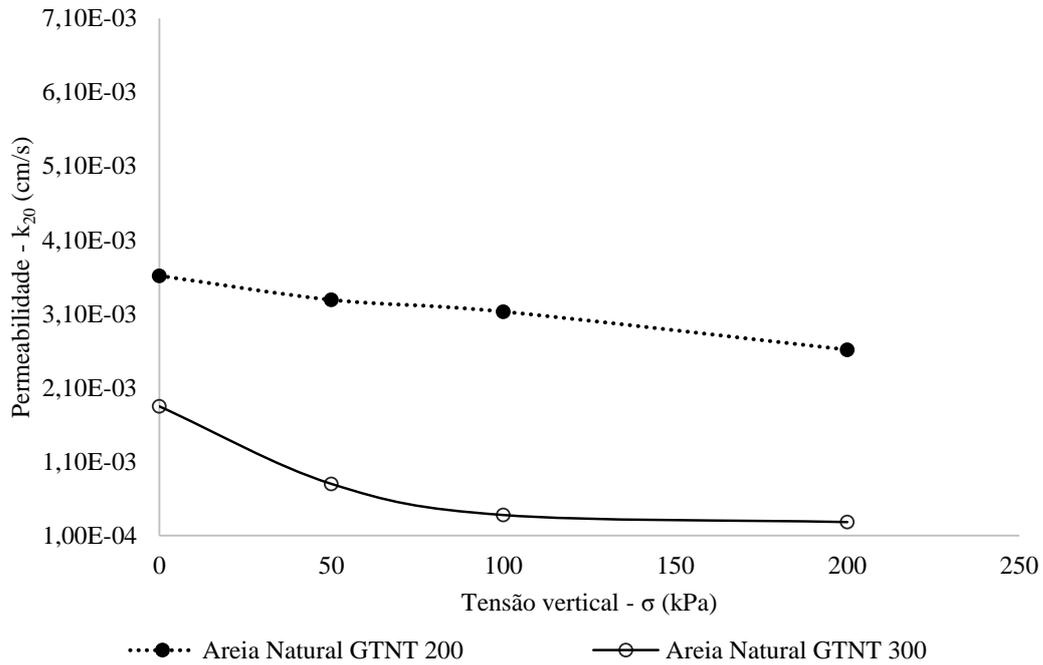


Figura 4.23 - Compacidade relativa da areia natural associada aos geotêxteis no ensaio de permeabilidade a carga constante - (Próprio autor).

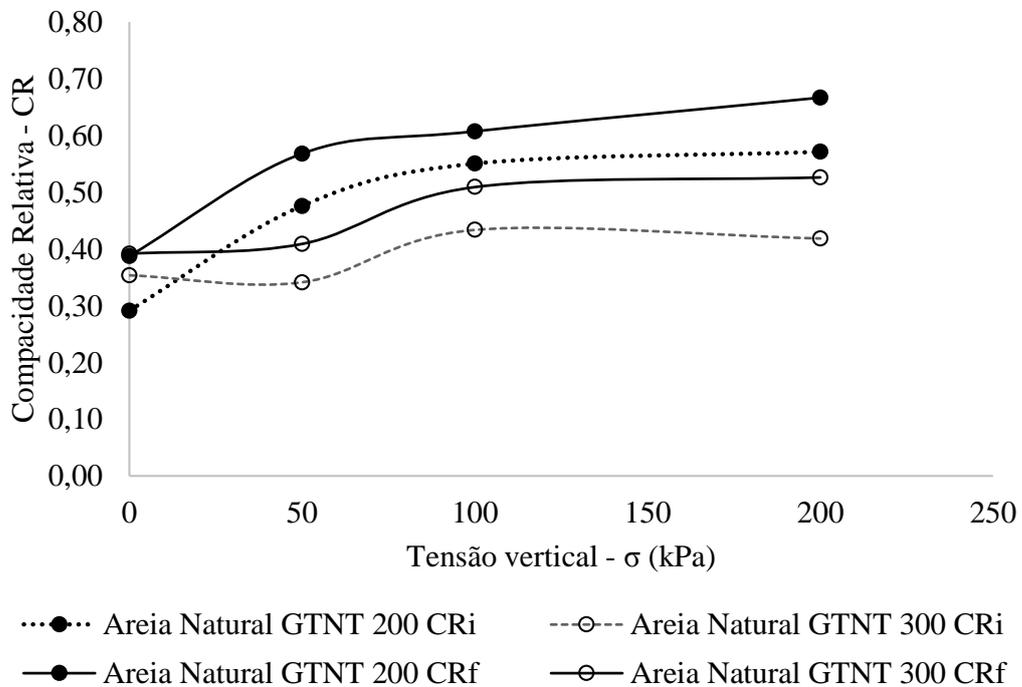


Tabela 4.19 - Critérios de Lafleur (1999) para GTNT associado a AN - (Próprio autor).

Geotêxtil	Retenção	Permeabilidade	Condição
	$O_{95} \text{ (mm)} < D_{85} \text{ (mm)}$	$k_{GT} > 20 \times k_s$	
GTNT ₂₀₀	$0,1 < 0,747$	$0,003 > 0,00115$	Atendido
GTNT ₃₀₀	$0,09 < 0,747$	$0,0026 > 0,00115$	Atendido

Tabela 4.20 - Resumo dos resultados obtidos no ensaio de permeabilidade da areia natural associada aos geotêxteis - (Próprio autor).

Tensão (σ) kPa	Compacidade Relativa Inicial CRi	Compacidade Relativa Final CRf	Permeabilidade (k_{20}) cm/s	Geotêxtil
0	0,29	0,39	$3,62 \times 10^{-3}$	
50	0,48	0,57	$3,29 \times 10^{-3}$	
100	0,55	0,61	$3,13 \times 10^{-3}$	
200	0,57	0,67	$2,61 \times 10^{-3}$	
0	0,35	0,39	$1,85 \times 10^{-3}$	GTNT ₃₀₀
50	0,34	0,41	$8,00 \times 10^{-4}$	
100	0,43	0,51	$3,78 \times 10^{-4}$	
200	0,42	0,53	$2,83 \times 10^{-4}$	

4.3.2. Ensaios de Permeabilidade da Areia Cinza

Assim como nos ensaios sem geotêxtil, a permeabilidade de areia cinza associada aos geotêxteis também reduziu com a aplicação de tensão normal ao topo do permeâmetro, devido ao aumento da compacidade relativa do material. Porém, a redução da permeabilidade foi menos acentuada nos ensaios com a presença de geotêxteis, se considerados os valores obtidos.

Outro fator que pode explicar a redução na permeabilidade da areia cinza é a condição de instabilidade interna do material segundo o critério de Kenney e Lau (1985), conforme ilustrado na Figura 4.24. Embora o material esteja muito próximo da condição de estabilidade (o gráfico mostra a curva bem próxima ao limite), a instabilidade interna torna a areia cinza um material com um certo potencial de sufusão, o que acarreta a movimentação de partículas menores entre os vazios das partículas maiores, seguindo o fluxo de água. Como o fluxo foi descendente e o geotêxtil foi inserido na base do permeâmetro, as partículas menores podem ter se movimentado dentro dos canais de fluxo dificultando a passagem da água e se acumulando próximo na base do corpo de prova, próximo à superfície do GTNT, o que repercutiu na redução, mesmo que pouco acentuada, de permeabilidade do material (Tabela 4.21). Contudo, considerando o

critério de dimensionamento de Lafleur (1999), a areia cinza atendeu as exigências diante do emprego dos dois geotêxteis (GTNT₂₀₀ e GTNT₃₀₀), conforme apresentado na Tabela 4.22.

Ressalta-se que, sem a aplicação de tensão, a permeabilidade da areia cinza mostrou-se semelhante sem ou com a associação do GTNT₂₀₀ e GTNT₃₀₀. Nessa condição de tensão, a associação com os GTNT não repercutiu em grandes reduções na permeabilidade da AC, pois os valores obtidos estão próximos ao limite entre as ordens de grandeza em questão (10^{-3} cm/s e 10^{-4} cm/s). Os resultados podem ser visualizados nas Figura 4. 25 e 4.26 e na Tabela 4.21.

Figura 4.24 - Critério de Kenney e Lau (1985) aplicado à areia cinza - (Próprio autor).

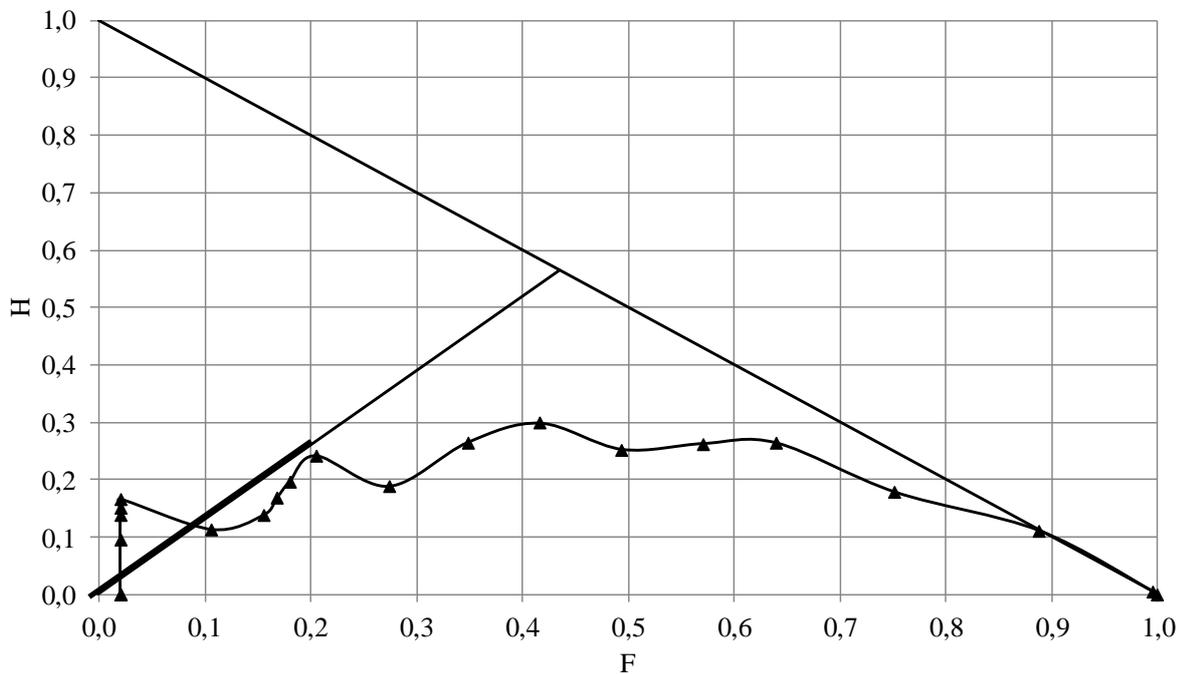


Figura 4.25 - Permeabilidade da areia cinza associada aos geotêxteis - (Próprio autor).

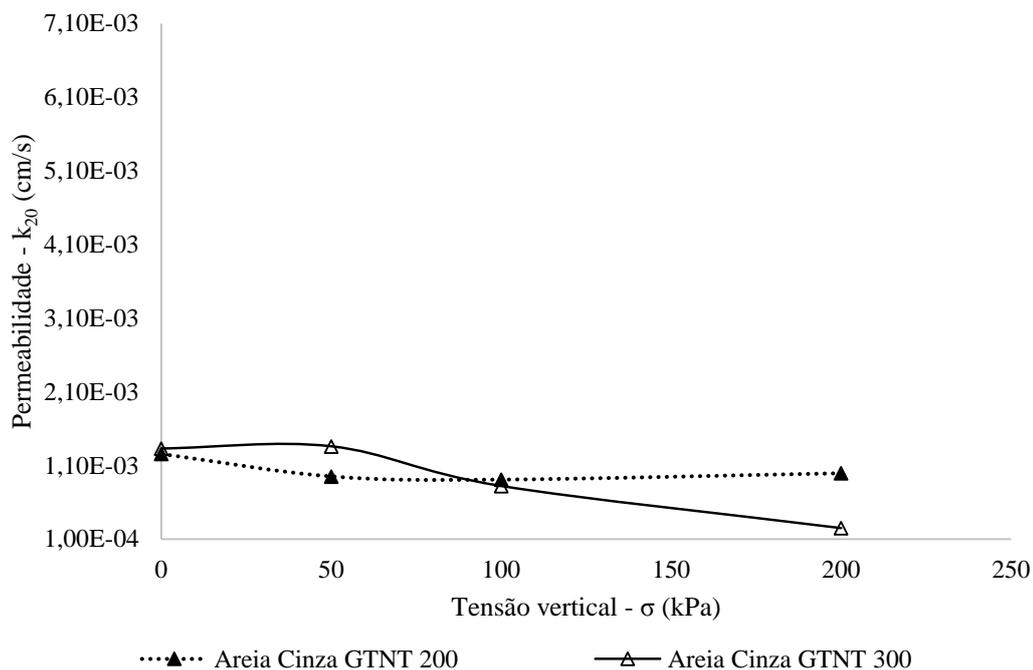


Figura 4.26 - Compacidade relativa da areia cinza associada aos geotêxteis no ensaio de permeabilidade a carga constante - (Próprio autor).

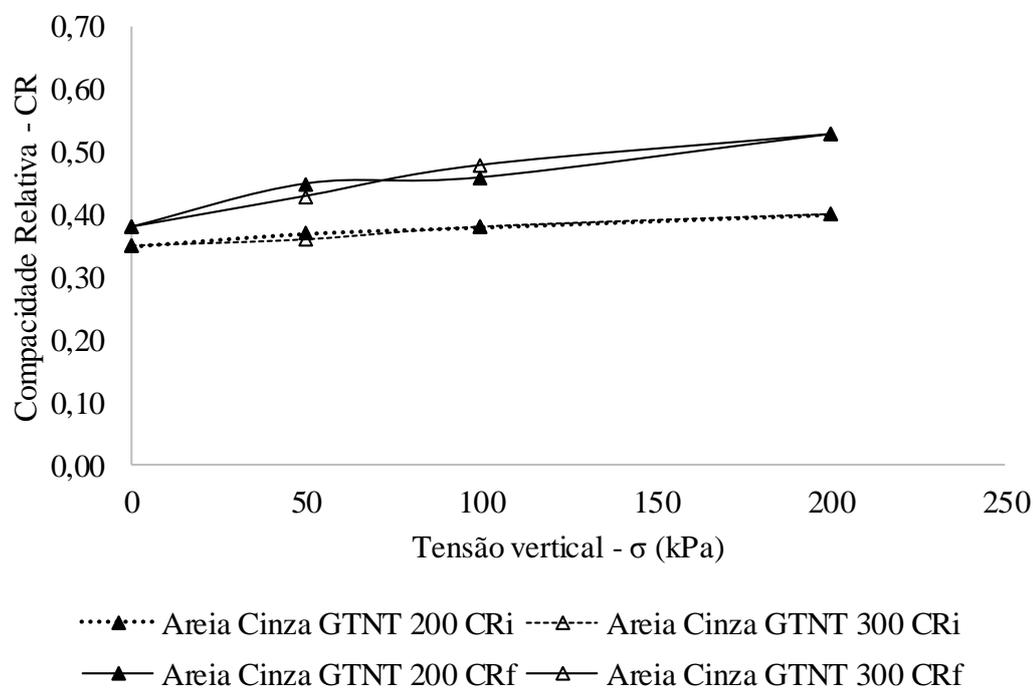


Tabela 4.21 - Resumo dos resultados obtidos no ensaio de permeabilidade da areia cinza associada aos geotêxteis - (Próprio autor).

Tensão (σ) kPa	Compacidade Relativa Inicial CRi	Compacidade Relativa Final CRf	Permeabilidade (k_{20}) cm/s	Geotêxtil
0	0,35	0,38	$1,26 \times 10^{-3}$	GTNT ₂₀₀
50	0,37	0,45	$9,51 \times 10^{-4}$	
100	0,38	0,46	$9,08 \times 10^{-4}$	
200	0,40	0,53	$9,95 \times 10^{-4}$	
0	0,35	0,38	$1,33 \times 10^{-3}$	GTNT ₃₀₀
50	0,36	0,43	$1,36 \times 10^{-3}$	
100	0,38	0,48	$8,21 \times 10^{-4}$	
200	0,40	0,53	$2,48 \times 10^{-4}$	

Tabela 4.22 - Critérios de Lafleur (1999) para GTNT associado a AC - (Próprio autor).

Geotêxtil	Retenção $O_{95} \text{ (mm)} < 5 \times D_{30} \text{ (mm)}$	Permeabilidade $k_{GT} > 20 \times k_s$	Condição
GTNT ₂₀₀	$0,1 < 0,389$	$0,003 > 0,00039$	Atendido
GTNT ₃₀₀	$0,09 < 0,389$	$0,0026 > 0,00039$	Atendido

4.3.3. Ensaios de Permeabilidade do Pó de Entulho

O comportamento do pó de entulho nos ensaios com geotêxteis foi semelhante ao do ensaio sem geotêxtil. Notou-se uma sensível redução na permeabilidade do pó de entulho quando associado aos geotêxteis. Assim como nos ensaios sem geotêxtil, a permeabilidade do pó de entulho reduziu com o aumento da tensão normal aplicada ao topo do permeâmetro e consequente aumento do grau de compactação da amostra (Figura 4.29).

A redução da permeabilidade também pode estar associada ao fato de o material ser internamente instável (Figura 4.27) conforme aplicação do método gráfico de Kenney e Lau (1985). Essa instabilidade interna do pó de entulho torna-o um material suscetível a ocorrência da sufusão, que pode concentrar pequenas partículas em pontos próximos ao geotêxtil no fundo do permeâmetro, o que poderia causar a sua colmatação por cegamento.

Com a associação do geotêxtil, o principal ponto de destaque foi a estabilização mais rápida da permeabilidade do pó de entulho – que é internamente instável – quando ensaiado com o geotêxtil de 200 g/m² (GTNT₂₀₀) em relação a permeabilidade do material ensaiado sem

geotêxtil. No ensaio do o GTNT₂₀₀ é possível ver a formação de um patamar na curva de permeabilidade versus tensão (Figura 4.28). Percebeu-se que o GTNT₃₀₀ também estabilizou a permeabilidade do PE, porém não com um patamar tão definido quanto o observado no ensaio com o GTNT₂₀₀ (Figura 4.28). 4.28 e resumidos na Tabela 4.23.

Considerando-se o critério de dimensionamento de filtro de Lafleur (1999), o pó de entulho não atendeu ao critério por se tratar de um material coesivo – reiterando que esse critério foi desenvolvido para solos não coesivos. O comparativo entre as permeabilidades dos materiais estudados associados aos geotêxteis pode ser visto na Figura 4.30.

Figura 4.27 - Critério de Kenney e Lau (1985) aplicado ao pó de entulho - (Próprio autor).

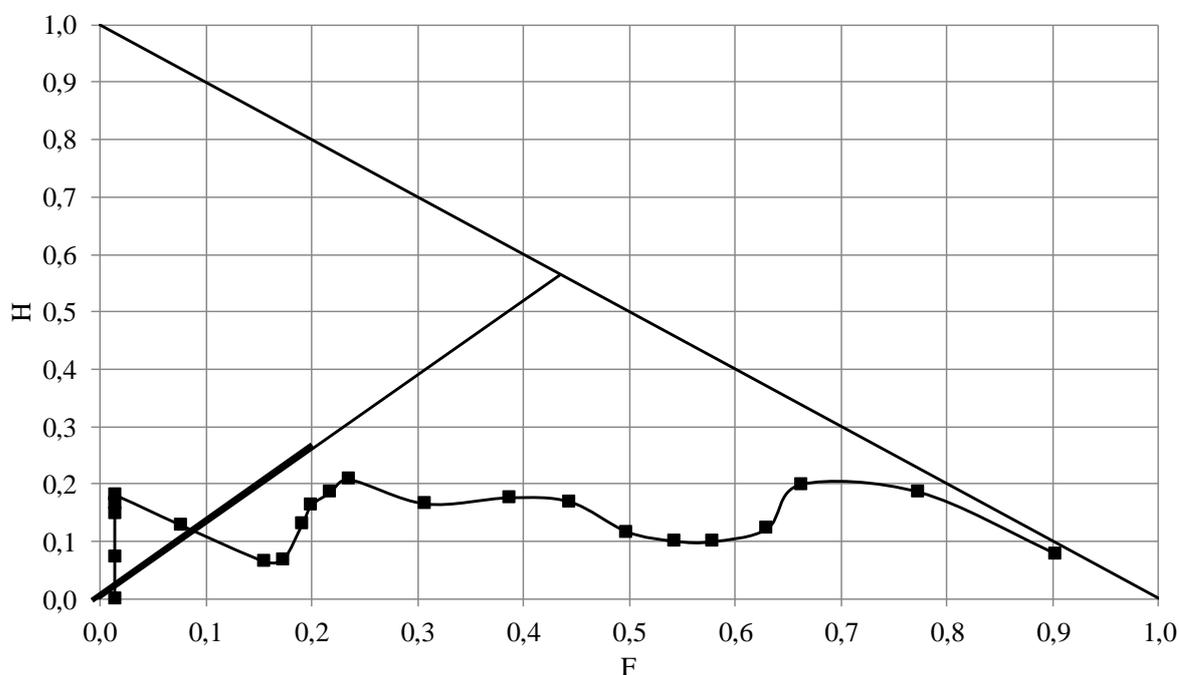


Figura 4.28 - Permeabilidade do pó de entulho associado aos geotêxteis - (Próprio autor).

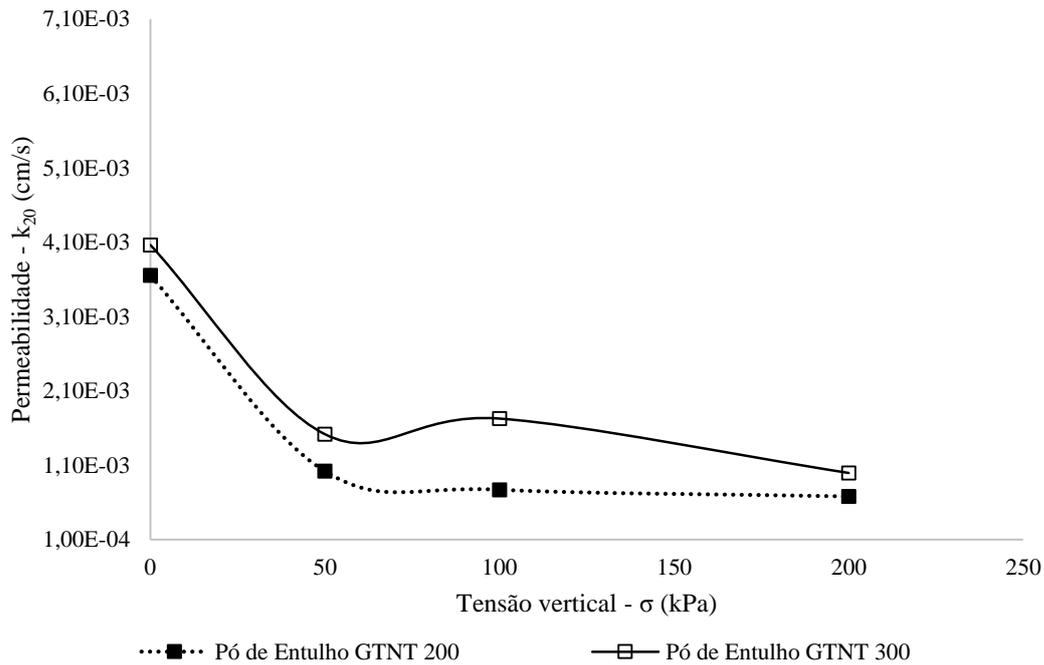


Figura 4.29 - Grau de compactação do pó de entulho associado aos geotêxteis no ensaio de permeabilidade a carga constante - (Próprio autor).

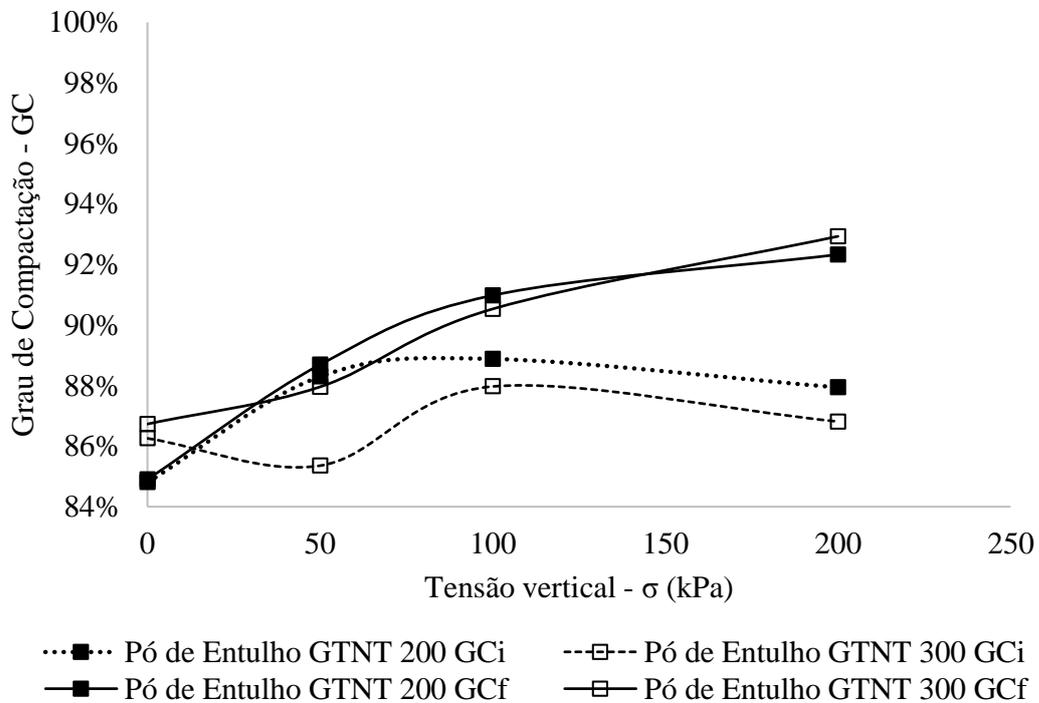
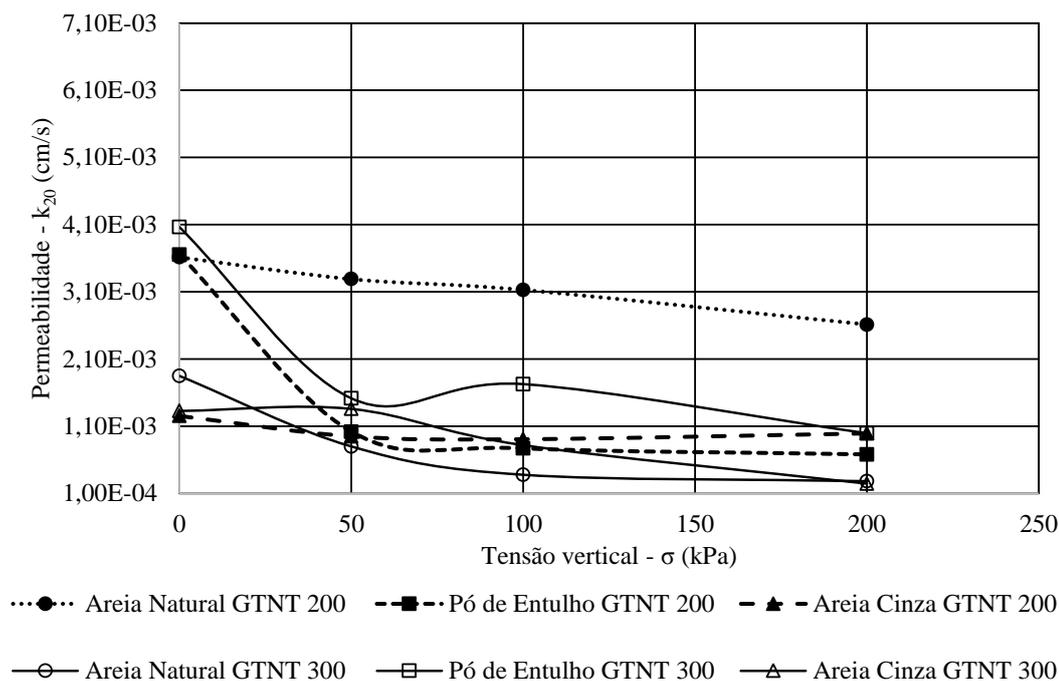


Tabela 4.23 - Resumo dos resultados obtidos no ensaio de permeabilidade do pó de entulho associado aos geotêxteis - (Próprio autor).

Tensão (σ) kPa	Permeabilidade (k_{20}) cm/s	Material	Geotêxtil
0	$3,65 \times 10^{-3}$	Pó de Entulho	GTNT ₂₀₀
50	$1,02 \times 10^{-3}$		
100	$7,70 \times 10^{-4}$		
200	$6,80 \times 10^{-4}$		
0	$4,06 \times 10^{-3}$	Pó de Entulho	GTNT ₃₀₀
50	$1,52 \times 10^{-3}$		
100	$1,73 \times 10^{-3}$		
200	$9,95 \times 10^{-4}$		

Figura 4.30 - Permeabilidade de todos os materiais associados aos geotêxteis - (Próprio autor).

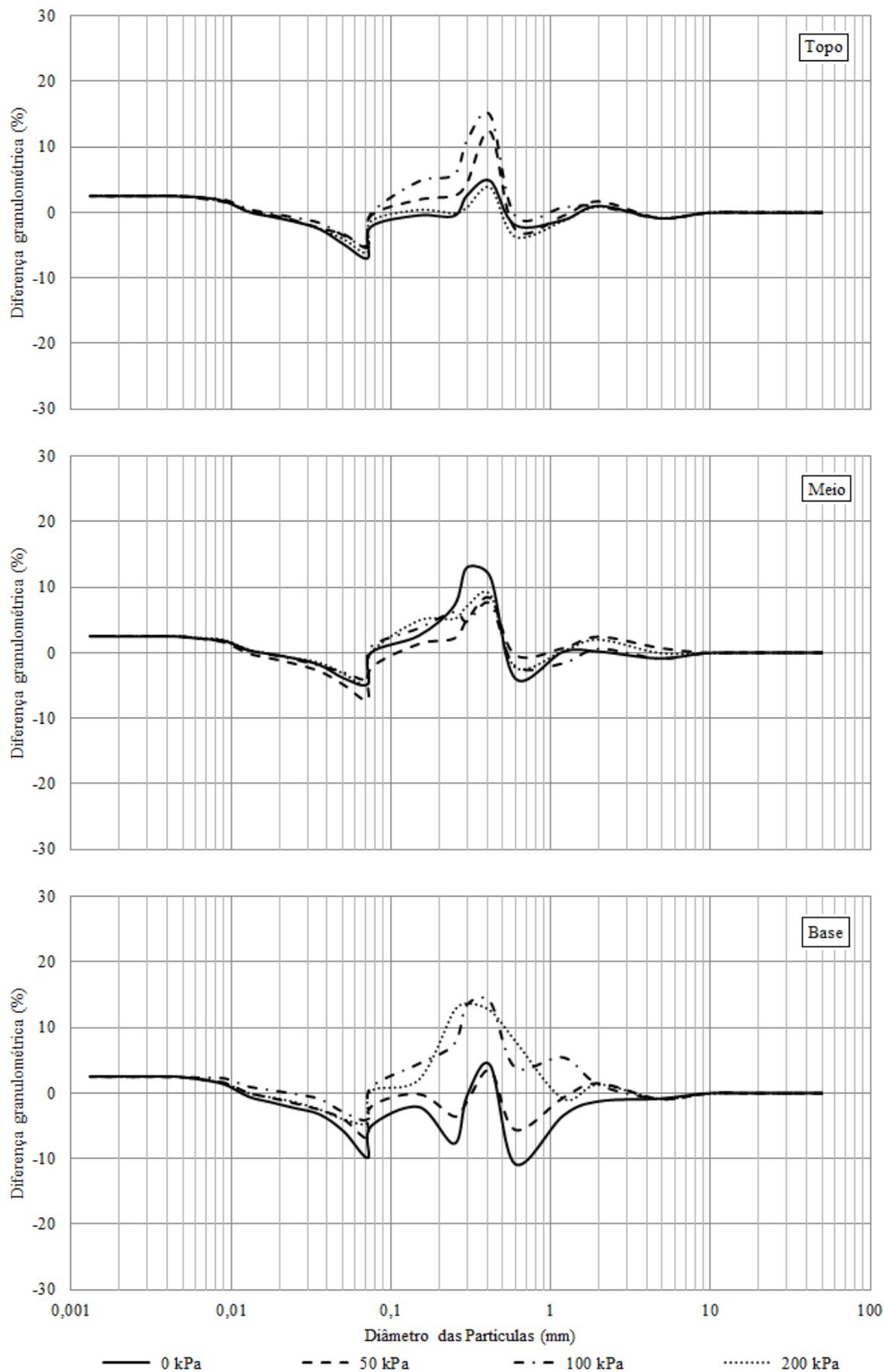


4.4. ENSAIOS DE GRANULOMETRIA NO GRANULÔMETRO A LASER

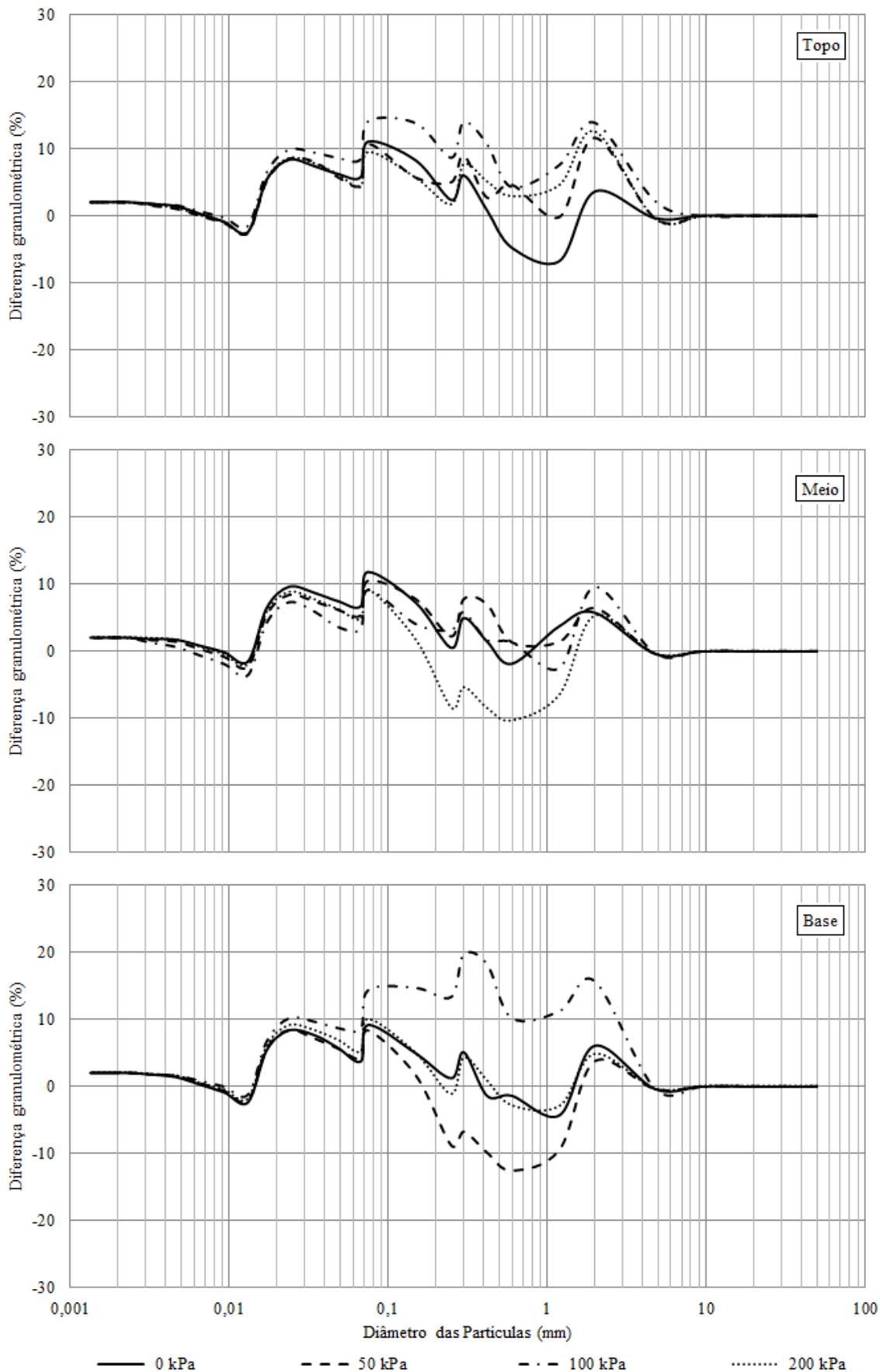
Os resultados das análises granulométricas após os ensaios de permeabilidade com aplicação de tensão mostraram que a areia natural apresentou uma menor variação de suas curvas granulométricas no topo e no meio do corpo de prova. As maiores mudanças entre as curvas

granulométricas inicial e final (após o ensaio de permeabilidade) ocorreu na base do corpo de prova (Figura 4.31), predominantemente, na fração ‘areia’ – segundo a ABNT (1995), de 0,06 mm a 2,0 mm. Essa diferença pode ser atribuída a movimentação (sufusão) dos grãos no interior do corpo de prova durante o ensaio de permeabilidade, ou quebra dos grãos. Tal comportamento é visualizado nas frações entre 0,01 e 0,075 mm e 0,6 e 2,0 mm para a areia natural em todas as regiões do corpo de prova (topo, meio e base).

Figura 4.31 – Diferença granulométrica (% INICIAL – % FINAL) da areia natural após ensaio de permeabilidade – (Próprio autor).



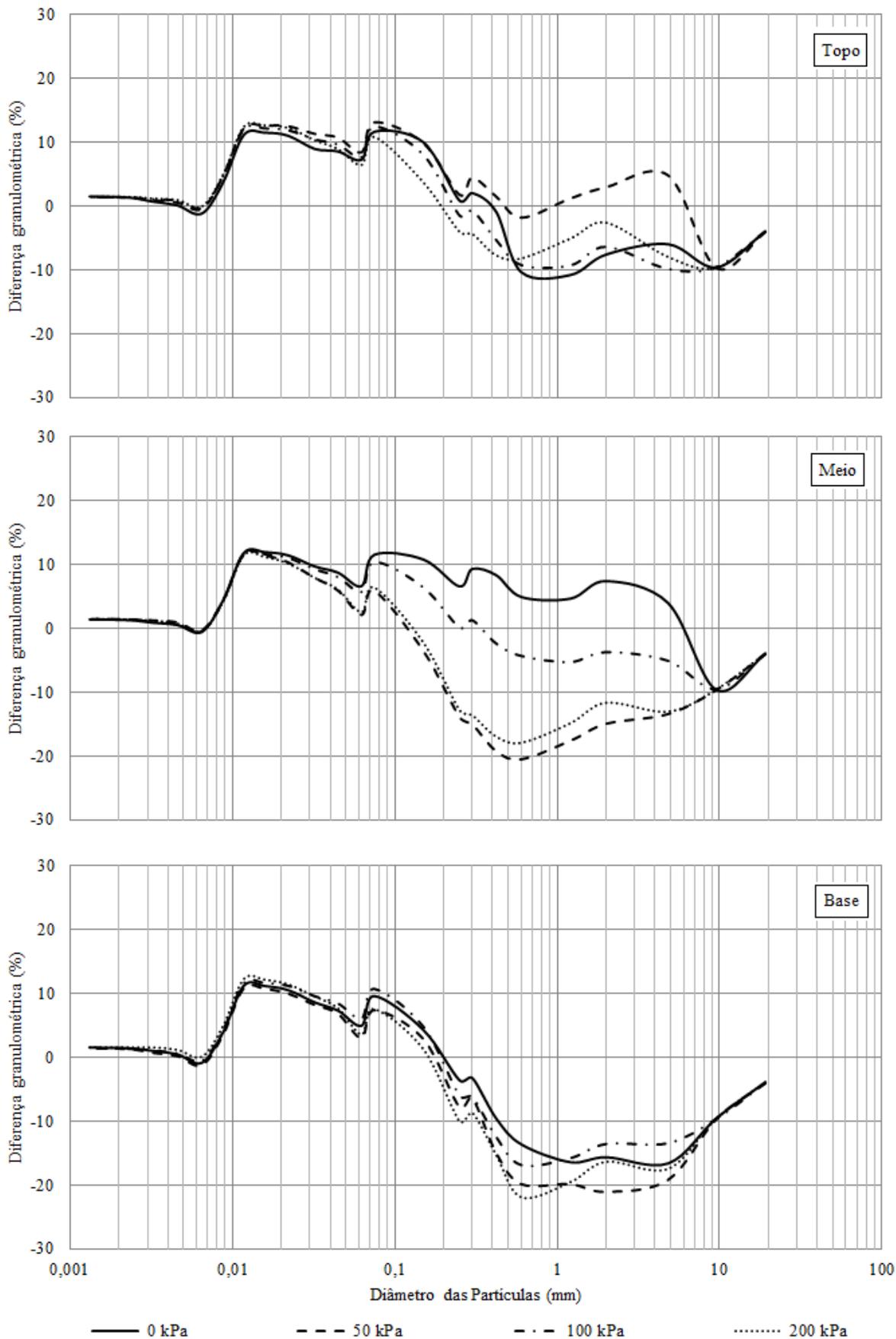
Verificou-se que a areia cinza apresentou uma variação um pouco maior que a areia natural, quando analisado o material do topo do corpo de prova após ensaio de permeabilidade, principalmente na fração 'areia'. Assim como a areia natural, a areia cinza também apresentou uma menor variação granulométrica na porção central do corpo de prova. Pode-se entender que a região central sofreu menos interferência da tensão por não estar em contato direto com a placa de aplicação de carga e nem com a placa da base do permeâmetro. Ao analisar o material da base do corpo de prova após o ensaio de permeabilidade, notou-se que a areia cinza apresentou uma variação pouco maior (da ordem de 14%) que no meio (11%) e no topo (8%). Assim como na areia natural, a variação ocorreu predominantemente na fração 'areia', como pode ser visto na Figura 4.32.

Figura 4.32 – Diferença granulométrica ($\%_{\text{INICIAL}} - \%_{\text{FINAL}}$) da areia cinza após ensaio de permeabilidade – (Próprio autor).

O pó de entulho após o ensaio de permeabilidade apresentou uma variação um pouco maior que os materiais anteriores. A variação no topo ocorreu predominantemente na fração ‘areia’ e com o valor da ordem de 12%, mas percebeu-se uma baixa variação (valor máximo de 2%) na fração ‘silte’ – segundo a ABNT (1995) de 0,002 a 0,06 mm.

Diferente da areia natural e da areia cinza, onde a variação na porção central do corpo de prova foi menor em relação ao topo, o pó de entulho apresentou uma variação pouco maior (valor máximo de 21%), predominantemente, na fração ‘areia’. Ao analisar a base, percebe-se que houve a maior variação entre as três regiões do corpo de prova para o pó de entulho (valor máximo de 23%), novamente na fração ‘areia’. Percebe-se que a tensão de 50 kPa foi a responsável pela maior variação no centro do corpo de prova. Para a base, a tensão de 200 kPa foi a que repercutiu maior variação, como visto na Figura 4.33.

Figura 4.33 - Diferença granulométrica (% INICIAL - % FINAL) do pó de entulho após ensaio de permeabilidade - (Próprio autor).



Verificou-se que o pó de entulho apresentou maiores valores de variação em relação às areias cinza e natural. Tal comportamento pode ser explicado pela sua granulometria menos uniforme que os demais materiais, podendo ter ocorrido a movimentação de partículas no interior do corpo de prova durante os ensaios de permeabilidade à carga constante. A quebra dos grãos seria outra explicação para esse comportamento, mas não é possível nesse caso fazer uma distinção entre os dois mecanismos.

Percebe-se, também, que o pó de entulho apresentou valores positivos para as frações mais finas do material (valor máximo de 13%) e valores negativos na porção mais grossa do material (valor máximo de 23%). Esse comportamento mostrou-se bem distinto às areias natural e cinza, que apresentaram predomínio de valores negativos nas frações mais finas e valores positivos nas frações mais grossas. Tal comportamento pode estar relacionado a não uniformidade do pó de entulho, que é mais acentuada que a da areia cinza, que também não é uniforme e, também, com a movimentação de partículas, devido ao fluxo de água, dentro do permeâmetro durante o ensaio de permeabilidade à carga constante, que pode ocasionar a concentração de partículas de determinada dimensão em uma região do corpo de prova.

4.5. ENSAIO DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) E ESPECTROSCOPIA DE RAIOS X POR DISPERSÃO EM ENERGIA (EDS)

Realizou-se imagens de amostras virgens de GTNT₂₀₀, a fim de analisar as condições do material sintético não submetido ao ensaio de permeabilidade à carga constante. Foram analisados os mesmos 6 (seis) pontos de interesse. A análise das imagens revelou aberturas de poros próximas ao tamanho estipulado em catálogo (0,100 mm), conforme pode ser estimado com a escala na legenda das imagens. Percebeu-se pequenas partículas impregnadas em pontos isolados da manta (Figura 4.34). Tal fato pode estar associado ao local de armazenamento das amostras, exposto a partículas suspensas, e mesmo sendo lavadas em água destilada antes do ensaio. Realizou-se espectroscopia de raios x por dispersão em energia (EDS) nas poucas partículas encontradas para saber qual tipo de material estava impregnado nas amostras virgens. Percebe-se a presença de alumínio (Al), silício (Si) e sódio (Na), sugerindo partículas de areia. O resultado do EDS pode ser visto na Figura 4.35.

Figura 4.34 - Imagens amostra virgem de GTNT₂₀₀

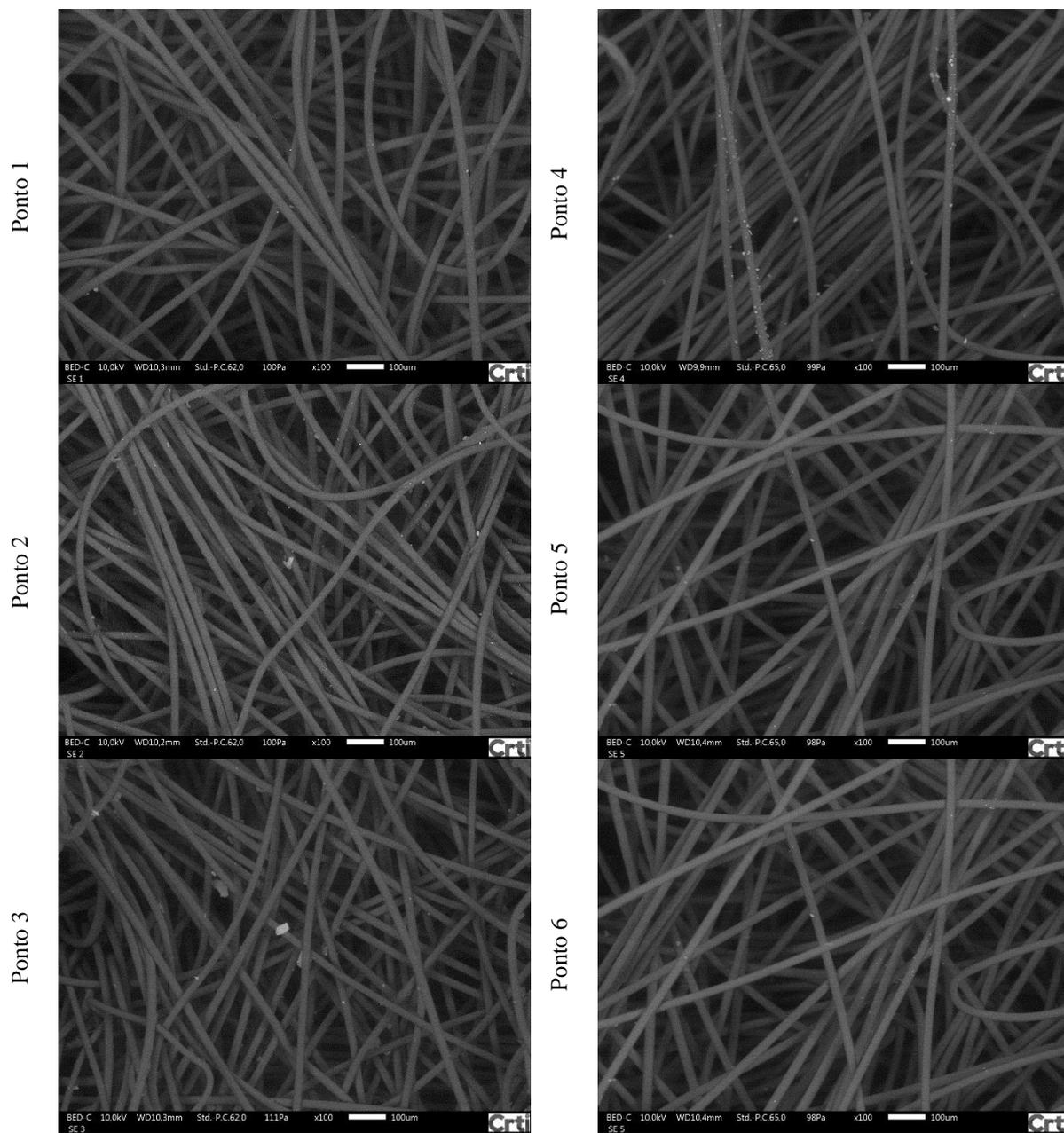
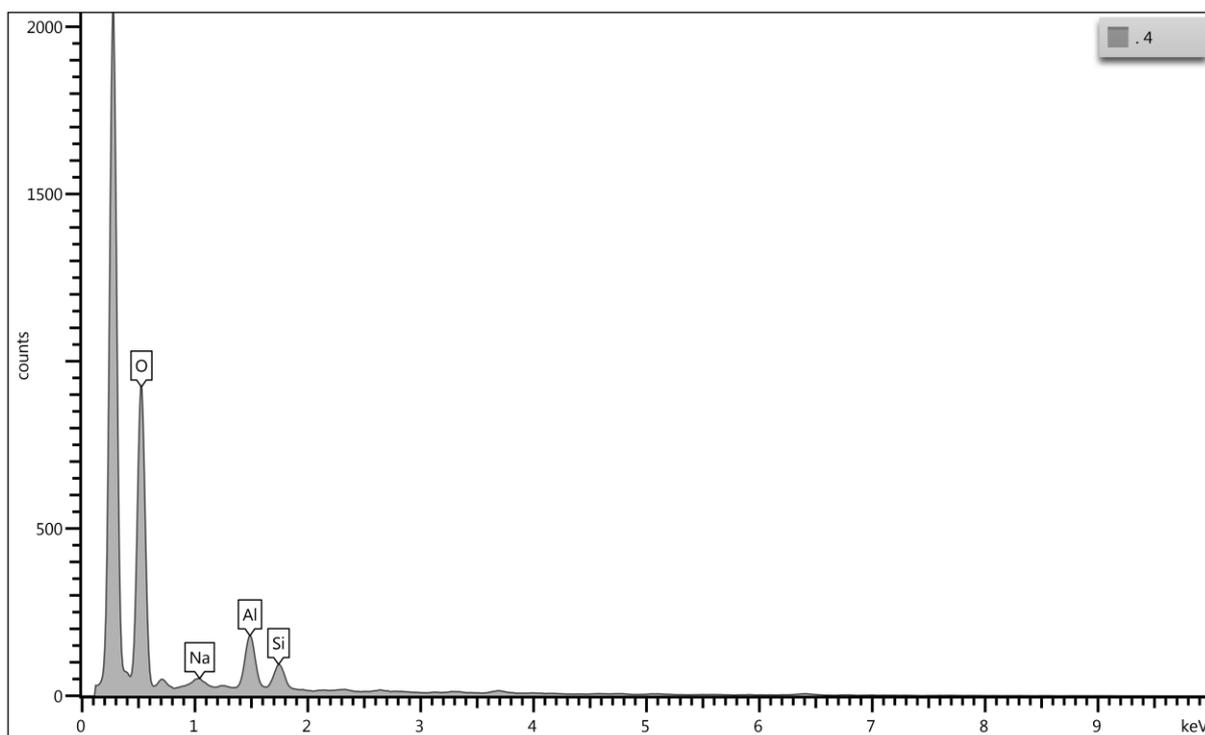
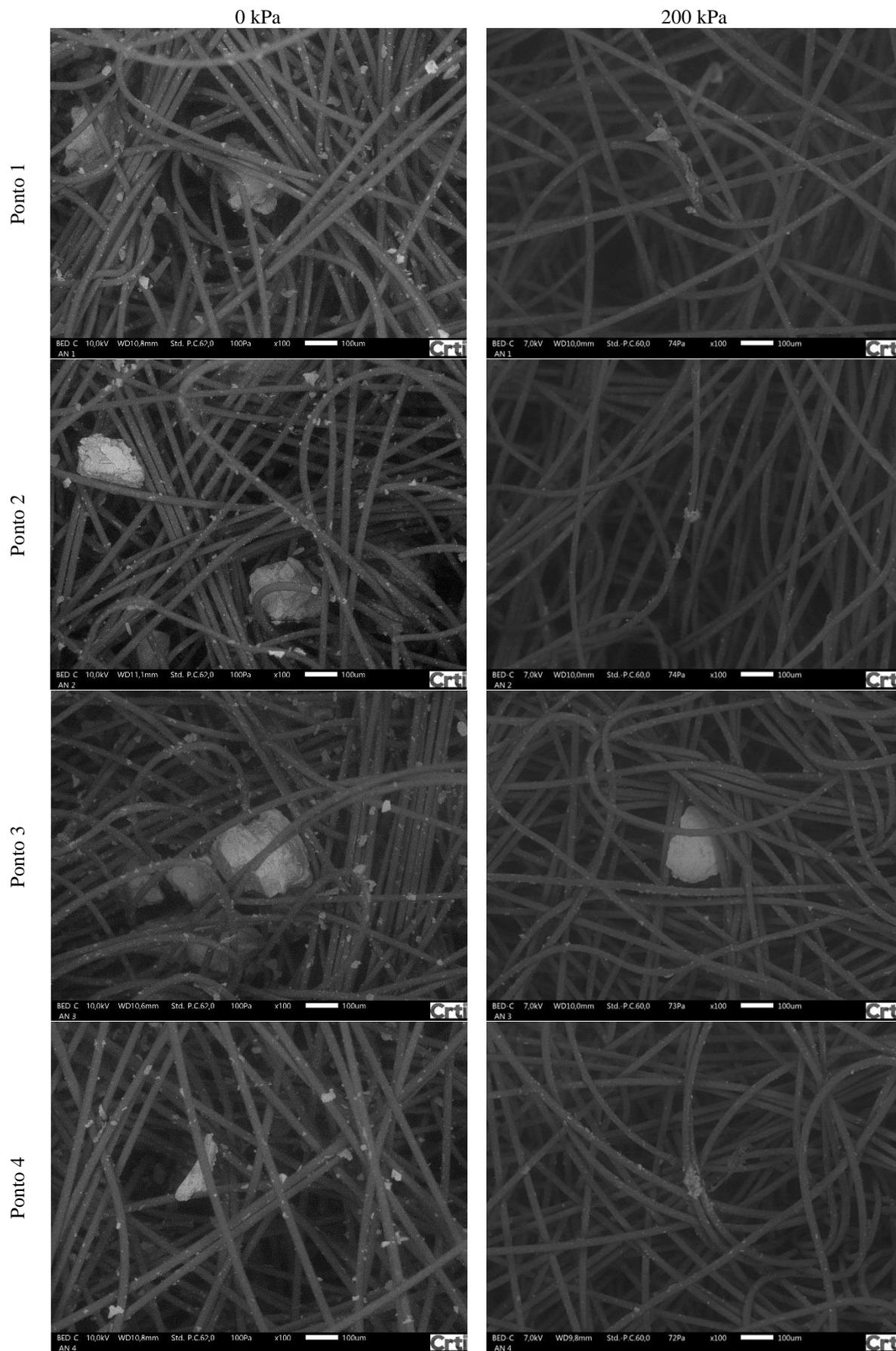


Figura 4.35 - EDS das partículas encontradas na amostra virgem



Notou-se uma maior presença de partículas de areia natural emaranhadas e impregnadas nas fibras para a tensão de 0 kPa nos pontos 1 a 3 em relação a tensão de 200 kPa (Figura 4.36). Isso pode ser explicado pela existência de maiores espaços vazios na amostra não submetida à tensão. Ao analisar os pontos 4 a 6, percebeu-se que, para a tensão de 0 kPa, um maior número de partículas conseguiu atingir a face em contato com o papel filtro; enquanto que, com a aplicação de tensão 200 kPa, apenas algumas partículas de menores dimensões conseguiram atravessar o GTNT₂₀₀, formando pequenos aglomerados. Contudo, notou-se através das imagens que não houve uma maior concentração de grãos que pudessem indicar a ocorrência colmatção do geotêxtil. Os resultados do EDS nas partículas de areia natural (AN) impregnadas nas fibras revelou o predomínio de silício (Si) e alumínio (Al), componentes de quartzo e sílica (SiO₂), estando coerente devido à composição mineralógica típica de areias naturais, como ilustrado na Figura 4.37.

Figura 4.36 - Imagens GTNT₂₀₀ associado à areia natural nas tensões de 0 e 200 kPa - (Próprio autor).

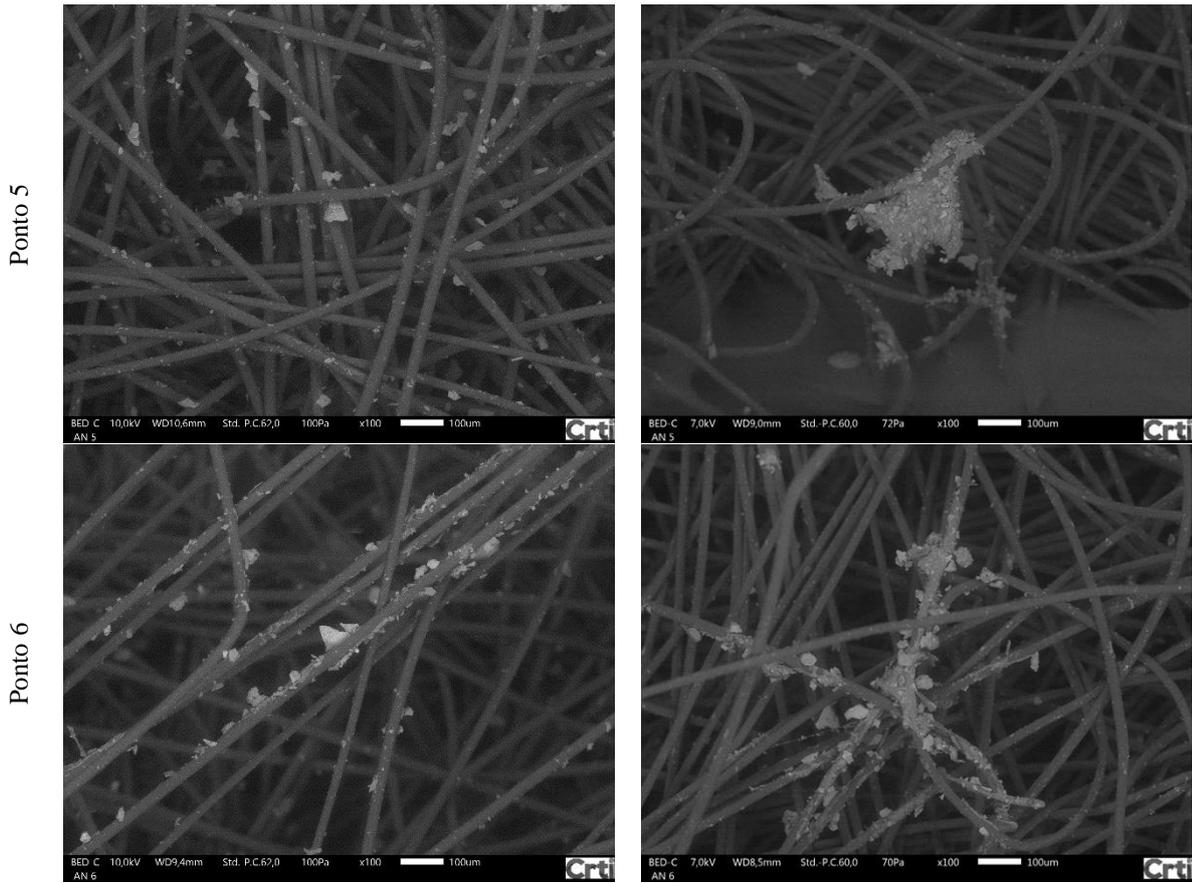
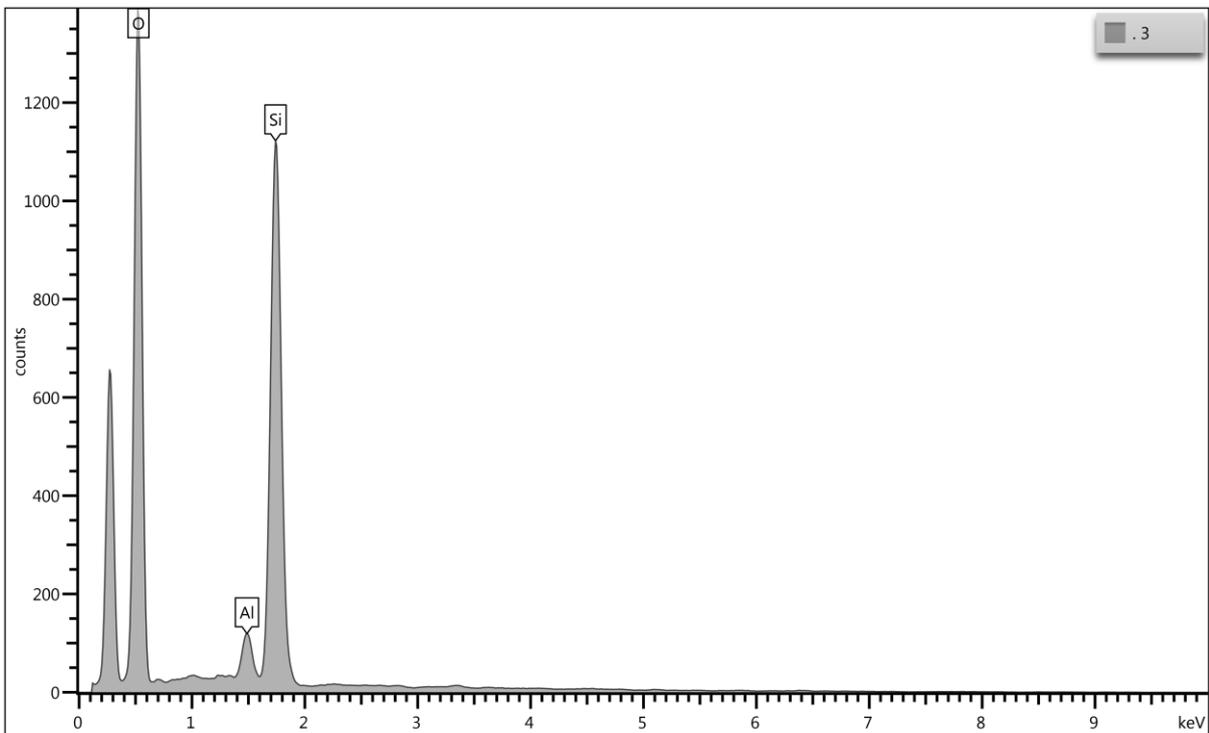


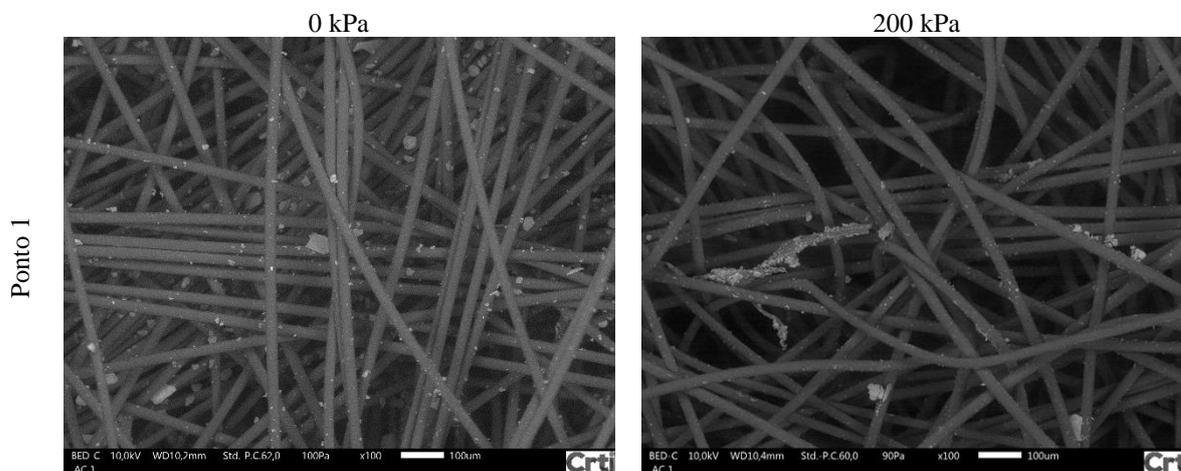
Figura 4.37 - EDS da areia natural - (Próprio autor).



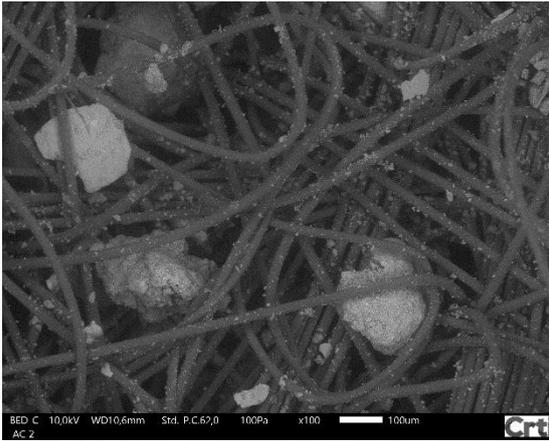
As imagens da areia cinza associada ao GTNT₂₀₀ mostram uma grande presença de materiais finos impregnados nos filamentos, o que pode ser explicado pelo fato do material ter uma maior parcela de materiais finos (< 0,075 mm). Especificamente para os pontos 1 a 3, na tensão de 0 kPa, observou-se a presença de partículas maiores em relação a tensão de 200 kPa, porém sem a formação de aglomerações. Já na tensão de 200 kPa, as partículas apresentam menores dimensões, mas houve a formação de aglomerações, como visto no ponto 2.

Para os pontos 4 a 6, para a tensão de 0 kPa, observou-se que um número maior de partículas conseguiu atravessar o GTNT₂₀₀, ficando emaranhadas e impregnadas nas fibras (Figura 4.38) Por outro lado, percebeu-se que quase não houve passagem de partículas para a face em contato com o papel filtro para a tensão de 200 kPa, provavelmente devido à dificuldade encontrada pelas partículas, uma vez que a tensão provocou a redução do tamanho das aberturas dos poros. Não foram observados indícios de que os geotêxteis foram colmatados pela areia cinza para os dois níveis de tensão avaliados, uma vez foram verificadas apenas algumas aglomerações de partículas sobre pontos isolados e impregnações de partículas nas fibras. Tais aglomerações podem ter sido causadas pela presença de ferro (Fe) nas partículas impregnadas no GTNT₂₀₀, que reage com o oxigênio formando óxido de ferro (Fe₂O₃), responsável por aglomerar as partículas, como visto nos ensaios de EDS (Figura 4.39). A presença dessas aglomerações demonstra a necessidade da continuação do estudo. Além do ferro, o ensaio de EDS também identificou a presença predominante de silício, (Si), alumínio (Al) e cálcio (Ca). Essa diversidade de elementos químicos presentes nas partículas pode ser decorrente da composição gravimétrica do material, que é originado a partir da britagem de materiais de concreto e argamassa, o que justifica a presença de cálcio.

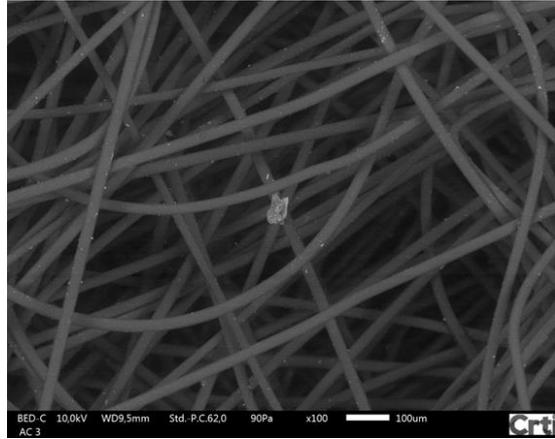
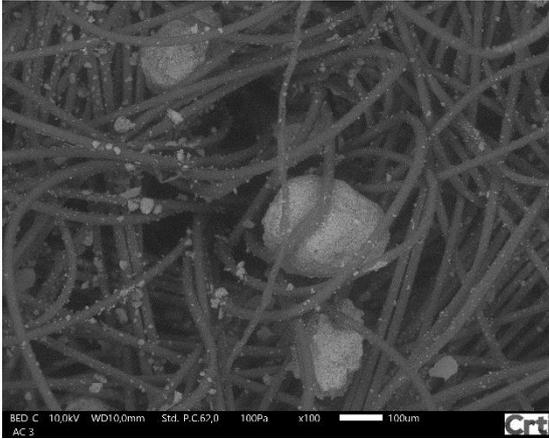
Figura 4.38 - Imagens GTNT₂₀₀ associado à areia cinza nas tensões de 0 e 200 kPa - (Próprio autor).



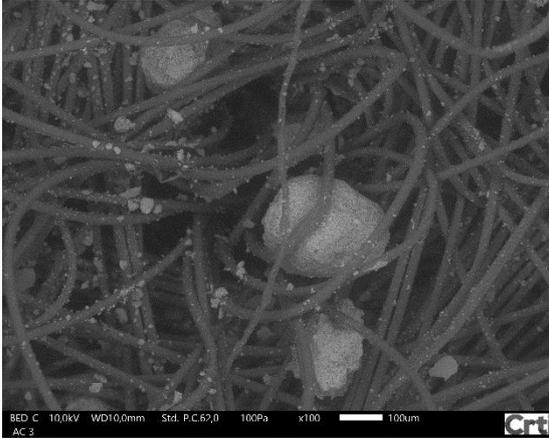
Ponto 2



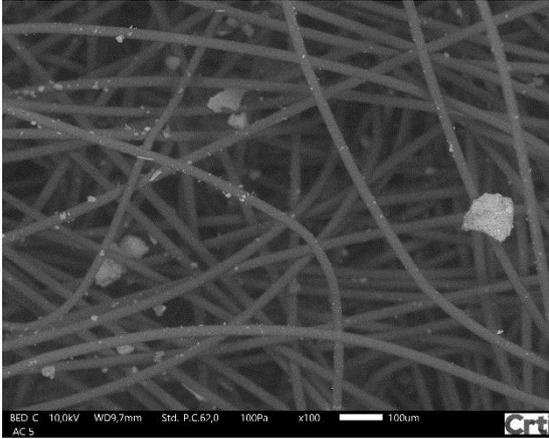
Ponto 3



Ponto 4



Ponto 5



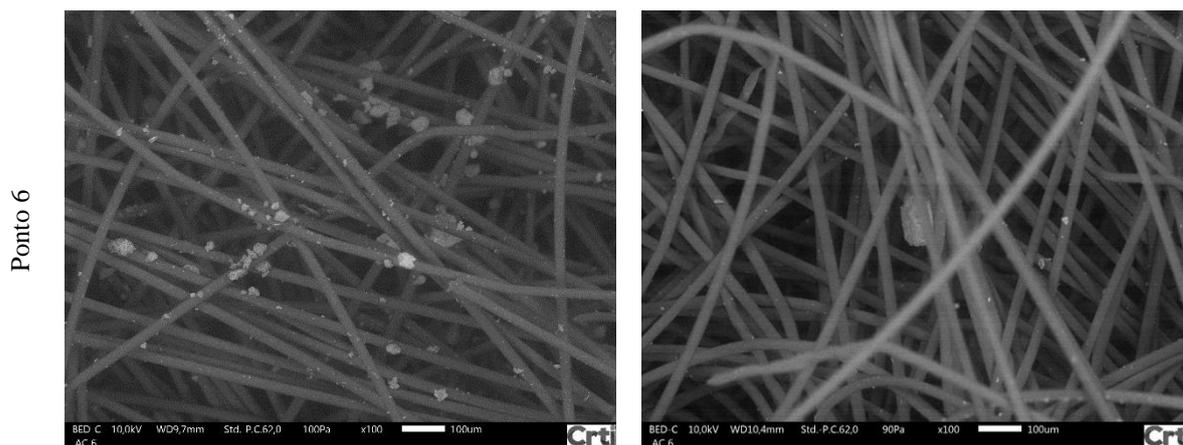
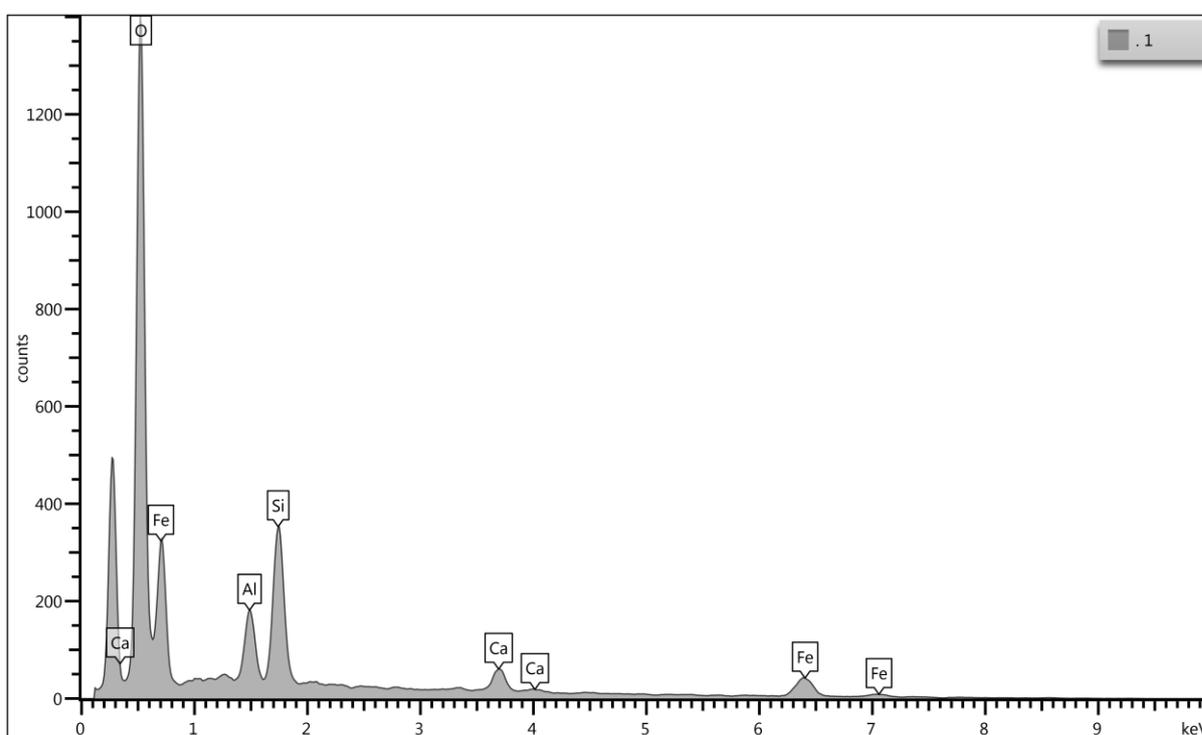


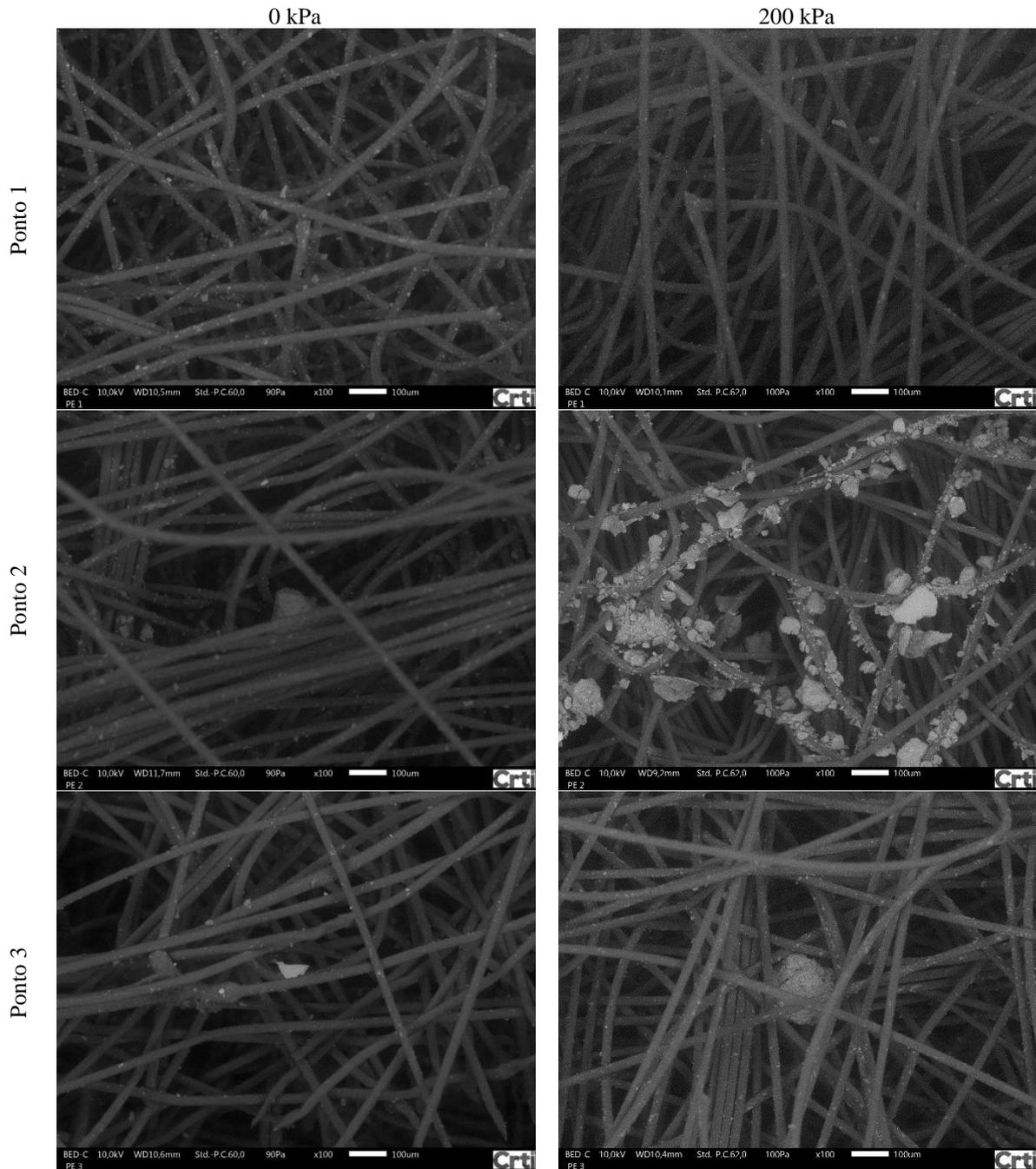
Figura 4.39 - EDS da areia cinza



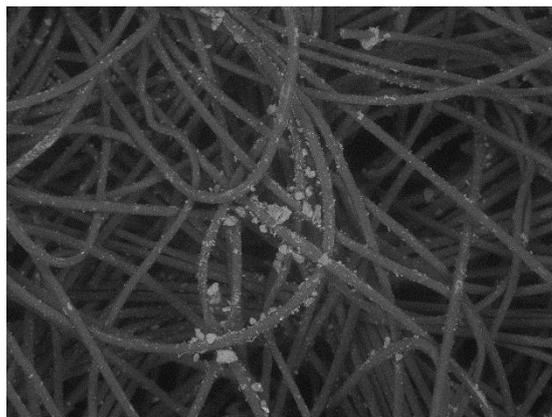
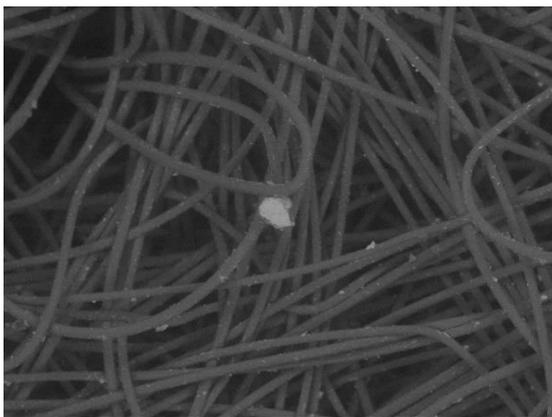
As imagens do pó de entulho associado ao GTNT₂₀₀ mostraram que, para todos os 6 pontos, praticamente não ficaram partículas emaranhadas nas fibras para a tensão de 0 kPa, havendo apenas algumas impregnações. Já para a tensão de 200 kPa, há uma presença um pouco maior de partículas emaranhadas e impregnadas nas fibras, principalmente nos pontos 1 a 3, com formação de aglomerados no ponto 2, provavelmente em função da ocorrência de sufusão durante o ensaio de permeabilidade. Para os pontos 4 a 6, percebeu-se que poucas partículas conseguiram atravessar o GTNT₂₀₀ até a face em contato com o papel filtro, ficando retidas devido à redução de abertura dos poros em função da tensão aplicada. Assim como observados para os demais materiais investigados, não foram observados indício de colmatção do GTNT₂₀₀ para os dois níveis de tensão avaliados (Figura 4.40).

Tendo em vista que o pó de entulho é o RCD-R que tem o processo produtivo menos controlado, é de se esperar que a sua composição gravimétrica seja a mais diversificada. Tal hipótese foi comprovada pela análise de EDS, a qual demonstrou o predomínio de potássio (K), silício (Si), alumínio (Al) e cálcio (Ca), como pode ser visto na Figura 4.41.

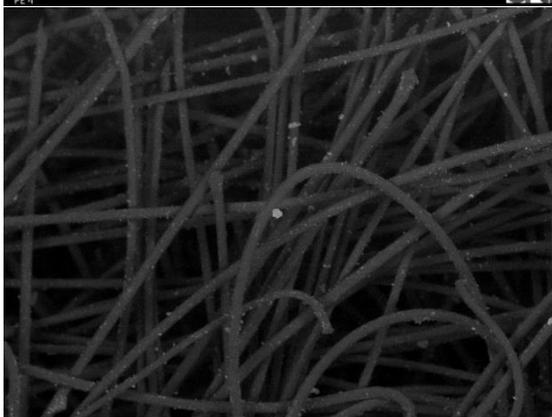
Figura 4.40 - Imagens GTNT₂₀₀ associado ao pó de entulho nas tensões de 0 e 200 kPa - (Próprio autor).



Ponto 4



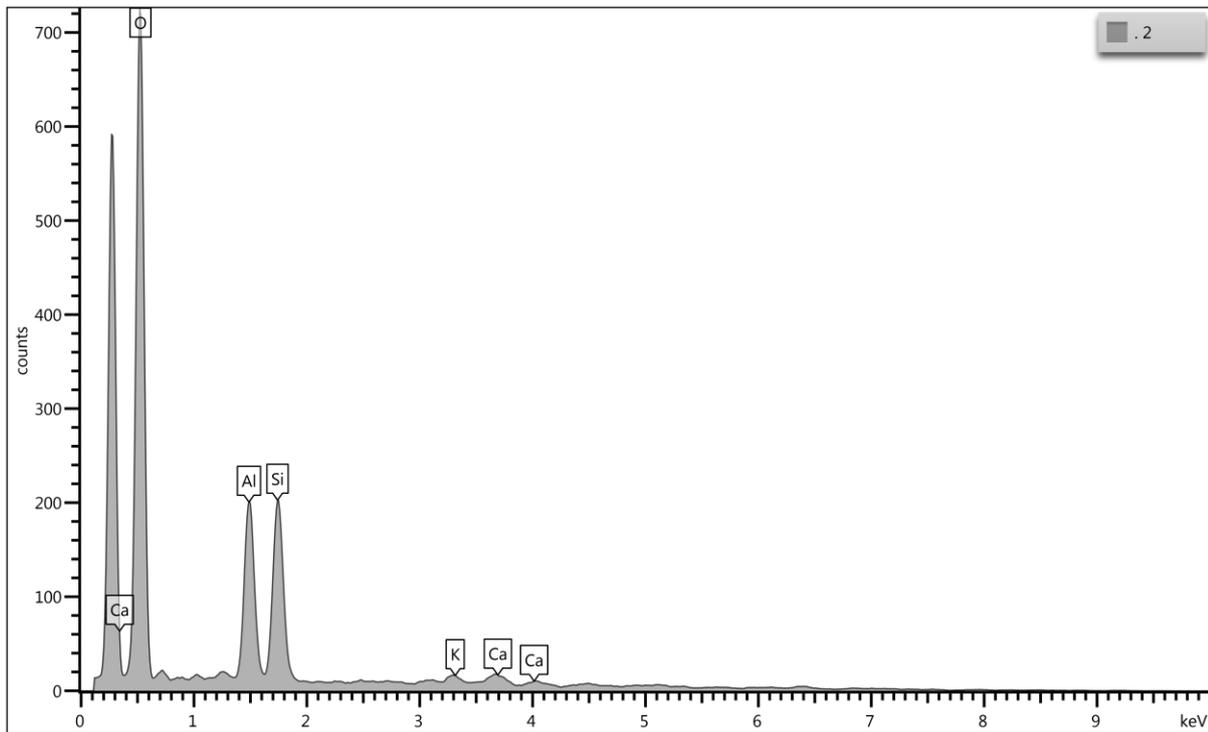
Ponto 5



Ponto 6



Figura 4.41 - EDS do pó de entulho



De uma maneira geral, o aspecto de impregnação e de partículas emaranhadas nas fibras do GTNT₂₀₀ para as duas areias foi semelhante na face em contato com o material. Ambos os materiais apresentaram partículas de tamanhos próximos (aproximadamente 0,3 mm). Já para a face em contato com o papel filtro, a areia cinza conseguiu ter um maior número de partículas alcançando essa face, mesmo com a aplicação de tensão de 200 kPa. Por outro lado, verificou-se um aspecto de impregnação diferente no pó de entulho, com a presença de maior quantidade de finos no pó de entulho. Percebeu-se, também, que o pó de entulho, na tensão de 0 kPa, foi o material que apresentou a menor quantidade de partículas na face em contato com o geotêxtil. Contudo, para a tensão de 200 kPa, foi o material que apresentou o maior número de partículas na face em contato com o papel filtro, provavelmente por ser o material com o maior número de finos.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Esta seção tem por finalidade apresentar as conclusões obtidas e sugestões para trabalhos futuros.

5.1. CONCLUSÕES

Concluiu-se que:

- O pó de entulho apresentou baixa variabilidade de suas propriedades geotécnicas, as quais se mostraram próximas às de solos naturais da região de Goiânia/GO, possibilitando o emprego desse RCD-R em obras geotécnicas;
- As permeabilidades dos dois tipos de RCD-R (pó de entulho e areia cinza) reduziram com a aplicação de tensão normal, a qual alterou os espaços vazios das amostras durante o ensaio. Essa redução de permeabilidade também está relacionada com a ocorrência de sufusão nos materiais reciclados, uma vez que ambos apresentam instabilidade interna segundo critério de Kenney e Lau (1985);
- Os RCD-R (pó de entulho e areia cinza) apresentaram permeabilidades bastante semelhantes à da areia natural para todos os níveis de tensão aplicados, o que reforça a qualidade dos materiais reciclados. O uso dos materiais reciclados mostrou-se viável em obras geotécnicas que necessitem de materiais granulares como a areia natural, desde que atendidas também as demais especificações de projeto;
- Os RCD-R (pó de entulho e areia cinza) apresentaram redução de permeabilidade quando associados aos geotêxteis não tecidos, sendo a maior redução conforme a aplicação de tensão. Com a redução da abertura dos poros, causada pela aplicação de tensão normal, dificultou-se a passagem de fluxo de água, o que repercute na redução de permeabilidade dos materiais;
- A areia cinza apresentou um comportamento distinto, dado que a sua permeabilidade mostrou sofrer menos influência na aplicação de tensão em relação ao pó de entulho. Tal fator pode ser explicado pelo comportamento não plástico da areia cinza e, também, por ter um maior percentual da fração areia em sua composição. A aplicação de tensão

no topo do permeâmetro não conseguiu compactar areia cinza com a mesma eficácia observada no pó de entulho, pois, por ter um comportamento de areia, a areia cinza necessitaria ser submetida à vibração para um aumento mais expressivo de sua compacidade relativa.

- Os materiais reciclados (pó de entulho e areia cinza) apresentaram variações granulométricas quando submetidos à aplicação de tensão durante os ensaios de permeabilidade, sendo essas variações provavelmente em função da movimentação de partículas dentro do permeâmetro e quebras. Contudo, nos ensaios realizados não foi possível fazer uma distinção das contribuições de cada um desses mecanismos; e
- As análises de imagens de MEV, apesar de mostrar diferentes condições para os materiais investigados, não mostraram evidências da ocorrência de colmatação dos geotêxteis submetidos ao ensaio de permeabilidade.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar análise de composição gravimétrica dos RCD-R, de modo a investigar os seus materiais componentes e as suas influências nas propriedades físicas, químicas, mecânicas e hidráulicas;
- Realizar ensaios de Razão entre Gradientes (GR) com os dois tipos de RCD-R e areia natural, utilizando os mesmos geotêxteis, de modo a obter parâmetros que possam permitir uma melhor análise sobre a ocorrência de colmatação;
- Realizar análise da água percolada, de modo a verificar alterações que possam ser significativas para o emprego do sistema (RCD-R + geotêxteis);
- Realizar ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) nas amostras de GTNT₂₀₀ e GTNT₃₀₀ submetidas a outros níveis de tensão, para analisar eventuais distinções com os resultados apresentados neste trabalho;
- Realizar ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em seções de corte (na espessura) dos geotêxteis, de modo a investigar a profundidade que as partículas de solo conseguem penetrar nos geotêxteis durante o ensaio de permeabilidade à carga constante.

REFERÊNCIAS

- ABRAMENTO, M.; WICKERT; F. Use of geotextile as mechanical protection of geomembrane in Itiquira Dam Channel, Brazil. *In: 8th INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSYNTHETICS*, 2006, Yokohama. **Proceedings of 8th ICG...** Yokohama, 2006.
- ALKHORSHID, N. R.; ARAUJO, G. L. S.; PALMEIRA, E. M.; ZORNBERG, J. G. Large-scale load capacity tests on a geosynthetic encased column. *Geotextiles and Geomembranes*. v 47. n. 5. p. 632-641. oct., 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.103458>.
- ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2000. 155 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia, Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2000.
- ANGULO, S. C.; TEIXEIRA, C. E.; CASTRO, A. L.; NOGUEIRA, T. P. Resíduos de construção e demolição: avaliação de métodos de quantificação. **Eng Sanit Ambient**, v. 16, n. 3, p. 299-306, jul. a set., 2011.
- ARAÚJO NETO, O. G. **Ensaio de arrancamento de geogrelha com equipamento de pequenas dimensões aplicado a compostos de resíduos de construção**. 2016. 96 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Universidade de Pernambuco (UPE), Recife, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, 2014, 120 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, 2016, 64 p.
- _____. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, 2017, 74 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 26: Agregados – Amostragem**. 10 p. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. 8 p. Rio de Janeiro, 2016f.
- _____. **NBR 6458: Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica**. 10 p. Rio de Janeiro, 2016a.
- _____. **NBR 6502: Rochas e solos – Terminologia**. 18 p. Rio de Janeiro, 1995a.
- _____. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica**. 12 p. Rio de Janeiro, 2016b.
- _____. **NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez**. 5 p. Rio de Janeiro, 2016c.
- _____. **NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade**. 3 p. Rio de Janeiro, 2016d.
- _____. **NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação**. 9 p. Rio de Janeiro, 2016e.
- _____. **NBR 10007: Amostragem de Resíduos Sólidos – Terminologia**. 21 p. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR ISO 10319: Geossintéticos – Ensaio de tração faixa larga**. 11 p. Rio de Janeiro, 2013.
- _____. **NBR ISO 11058: Geotêxteis e produtos correlatos – Determinação das características de permeabilidade hidráulica normal ao plano e sem confinamento**. 18 p. São Paulo, 2013.

_____. **NBR 13292**: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. 8 p. Rio de Janeiro, 1995b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO (ABRECON). **Relatório Pesquisa Setorial 2014/2015**. 2015.

Disponível em <<https://issuu.com/abrecon/docs/relatorio-pesq2015>>. Acesso em: 27 set. 2018.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA), AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATIONS (AWWA), WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 23th ed. Washington DC, USA 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 4254**: Standard Test Method for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density. 9 p. West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 2016a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 4253**: Standard Test Method for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table. 14 p. West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 2016b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D 5493**: Standard Test Method for Permittivity of Geotextiles Under Load. 5 p. West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 2011.

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) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2005.

BEIRIGO, E. A. **Comportamento Filtro-Drenante de Geotêxteis em Barragens de Rejeitos de Mineração**. 2005. 192 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (ENC), Universidade de Brasília (UnB), Brasília, 2005.

BERG, R. R.; CHRISTOPHER; B. R., SAMTANI, N.C. **Design and construction of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes**. Federal Highway Administration, USA. No. FHWA-NHI-10e024. 2009.

BESSA DA LUZ, D. W. **Compatibilidade de Sistemas Solo-Geotêxtil em Ensaios de Filtração sob Tensão**. 2004. 139 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (ENC), Universidade de Brasília (UnB), Brasília, 2004.

BLACK, P. J., & HOLTZ, R. D. Performance of geotextile separators five years after installation. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 125 n. 5. p. 404-412, 1999.

BRASIL. Lei nº 12.305/2010, de 02 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, DF, ago. 2010.

BRASIL. Lei nº 2.914/2011, de 12 de dezembro de 2011. **Procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade**. Ministério da Saúde. Brasília, DF, dez. 2011.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos de construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, v. 61, p. 178-189, 2015.

- BRITTO, A. F. S.; SANTOS, E. C. G. . Caracterização geotécnica de 'pó de entulho' produzido na Região Metropolitana de Goiânia-GO. *In: 5ª EDIÇÃO DO SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA NA REGIÃO DO CENTRO OESTE (GEOCENTRO 2019)*, 2019, Brasília/DF. **Anais do Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica na Região Centro Oeste (GEOCENTRO 2019)**. Brasília/DF: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS), 2019. v. 3. p. 404-411.
- BS – British Standard (2010). **BS 8006**: Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills.
- BUENO, B. S.; VILAR, O. M. Propriedades, Ensaio e Normas. *In: VERTEMATTI, J. C. (Coord.). Manual Brasileiro de Geossintéticos*. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015, Cap. 3. p. 47-84.
- CARDOSO, R. A. **Cadastro geotécnico dos solos finos lateríticos para fins de pavimentação no município de Goiânia-GO**. 2010. 185f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2010. Goiânia, 2010.
- CARROL, R. G., RONDECAL, J. & COLLIN, J. G. Geosynthetics in Erosion Control - The Principles. **Geotextiles and Geomembranes**. International Geotextile Society, vol. 11 (4-6), pp. 523-534, 1992.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 307**. Brasília, 2002.
- COUTO, D. M.; SANTOS, E. C. G. Permeabilidade de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R): Efeito da Presença de Material Concretício e do Grau de Compactação. *In: XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA*, 2016, Belo Horizonte. **Anais de XVIII COBRAMSEG...** Belo Horizonte, 2016.
- FLEURY, M. P.; SIQUEIRA NETO, N.; SANTOS, E. C. G. Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) na Região Metropolitana de Goiânia-GO. *In: SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA NA REGIÃO CENTRO-OESTE (GEOCENTRO 2017)*, 2017, Goiânia. **Anais do Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica na Região Centro-Oeste (GEOCENTRO 2017)**. Goiânia, 2017.
- FLEURY, M. P. **Resistência de geogrelhas após danos mecânicos causados por resíduos de construção e demolição reciclados**. 2018. 159 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil). Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia, 2018.
- GARDONI, M. G. A. **Avaliação da aplicabilidade de ensaios de laboratório e critérios de filtros para a utilização de geotêxteis em solos do Distrito Federal**. 1995, 197 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília (UnB), Brasília, 1995.
- GARDONI, M. G. A. **Estudo do comportamento dreno-filtrante de geossintéticos sob compressão**. 2000, 336 f. Tese (Doutorado em Geotecnia). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília (UnB), Brasília, 2000.
- GIROUD, J. P. Quantification of Geosynthetic Behaviour. *In: FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTEXTILES, GEOMEMBRANES AND RELATED PRODUCTS*, 1994, Singapore. **Proceedings of the Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products**. v. 4. p. 1249-1274. Singapore, set., 1994.

- GIROUD, J. P. Granular filters and geotextiles filters. *In: GEOFILTERS'96*, Jean Lafleur and Andre L. Rollin (eds.), 1996, Montreal. Proceedings of Geofilters'96. p. 565-678. Montreal, 1996.
- GOIÂNIA. Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Município de Goiânia (PMGIRS). 3 fev. 2016.
- KENNEY, T. C.; LAU, D. Internal stability of granular filters. **Canadian Geotechnical Journal**. v. 22, p. 215-225, 1985. DOI: 10.1139/t85-029
- LAFLEUR, J. Selection of geotextiles to filter broadly cohesionless soils. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 17, p. 299-312, 1999. DOI: 10.1016/S0266-1144(99)00007-2
- LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 266 f. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2001.
- MELO, D. L. A. **Avaliação da abertura de filtração de geotêxteis não tecidos sob diferentes esforços solicitantes**. 2018. 80 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (ENC), Universidade de Brasília (UnB), Brasília, 2018.
- MORAES FILHO, I. P. **Avaliação da Abertura de Filtração de Geotêxteis sob Diferentes Condições de Solicitação Mecânica**. 2018, 122 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (ENC), Universidade de Brasília (UnB), Brasília, 2018.
- MUÑOZ, C. S. **Desempenho de geotêxteis na filtração de solos internamente instáveis**. 2005. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeroportuária). Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, 2005.
- PALMEIRA, E. M. **Utilização de geotêxteis como reforço de aterros sobre solos moles**. 1981, 282 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1981.
- PALMEIRA, E. M.; GARDONI, M. G. The influence of partial clogging and pressure on the behavior of geotextiles in drainage systems. **Geosynthetics International**. v. 7. n. 4-6. p. 403-431. jul., 2000.
- PALMEIRA, E. M.; GARDONI, M. G. Drainage and filtration properties of non-woven geotextiles under confinement using different experimental techniques. **Geotextiles and Geomembranes**. 20. p. 97-115 jan., 2002.
- PALMEIRA, E. M.; GARDONI, M. G.; BESSA DA LUZ, D. W. Soil-geotextile filter interaction under high stress levels in the gradient ratio test. **Geosynthetics International**. 12. n. 4. p. 162-175 mar., 2005.
- PALMEIRA, E. M. **Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.
- PALMEIRA, E. M.; MELO, D. L. A.; MORAES FILHO, I. P. Geotextile filtration opening size under tension and confinement. **Geotextiles and Geomembranes**. p. 1-11. fev., 2019.
- PALMEIRA, E. M.; TREJOS GALVIS, H. L. Evaluation of predictions of nonwoven geotextile pore size distribution under confinement. **Geosynthetics International**. v. 25. p. 1-42. abr., 2018. DOI: <https://doi.org/10.1680/jgein.18.00004>

- RAHMAN, M. A.; IMTEAZ, M. A.; ARULRAJAH, A.; PIRATHEEPAN, J.; DISFANI, M. M. Recycled construction and demolition materials in permeable pavement systems: geotechnical and hydraulic characteristics. **Journal of Cleaner Production**. 90. p. 183-194. nov., 2014.
- REZENDE, L. R.; MARQUES, M. O.; OLIVEIRA, J. C.; CARVALHO, J. C.; GUIMARÃES, R. C.; RESPLANDES, H. M. S.; COSTA, L. C. S. Field investigation of mechanic properties of recycled CDW for asphalt pavements layers. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 27. n. p. 05015003. sep., 2015.
- ROSA, I. L.; SANTOS, E. C. G. Fatores de Influência na Permeabilidade de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R). *In: XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA*, 2016, Belo Horizonte. **Anais de COBRAMSEG...** Belo Horizonte, 2016.
- SANTOS, E. C. G. **Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado**. 2007, 168 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2007.
- SANTOS, E. C. G.; VILAR, O. M.; ASSIS, A. P. Statistical analysis of geotechnical parameters of recycled construction and demolition waste (RCDW). *In: 17th International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering*, 2009, Alexandria. **Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering**. Alexandria, 2009.
- SANTOS, E. C. G. **Avaliação experimental de muros reforçados executados com resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) e solo fino**. 2011, 248 f. Tese (Doutorado em Geotecnia). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília (UnB), Brasília, 2011.
- SANTOS, E. C. G.; PALMEIRA, E. M.; BATHURST, R. J. Behaviour of a geogrid reinforced wall built with recycled construction and demolition waste backfill on a collapsible foundation. **Geotextiles and Geomembranes**. v. 39. p. 9-19. ago., 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2013.07.002>
- SHI, Y. C. **Filtration Behaviour of Nonwoven Geotextiles in the Gradient Ratio Tests**. 1993. 125 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Aplicadas). University of British Columbia (UBC), Vancouver, Canada, 1993.
- SILVA, A. M. da. **Abertura de filtração de geotêxteis sob confinamento**. 2014, 129 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (ENC), Universidade de Brasília (UnB), Brasília, 2014.
- SILVA, E. P.; SANTOS, E. C. G. Influência do Grau de Compactação na Permeabilidade de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R) Produzidos em Paudalho-PE. *In: XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA*, 2016, Belo Horizonte, Minas Gerais. **Anais de COBRAMSEG**. Belo Horizonte, 2016.
- SILVA FILHO, J. A. C.; SANTOS, E. C. G. Panorama of research on recycled construction and demolition waste (RCDW) in Brazil. *In: SECOND SYMPOSIUM ON URBAN MINING*, 2014, Bergamo, Itália.
- SILVA, N. C.; MALHEIROS, R.; CAMPOS, A. C. A reciclagem e o destino final dos resíduos sólidos de construção e demolição produzidos no município de Goiânia. *In: IV*

CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 2013, Salvador, Bahia. **Anais do IV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**. Salvador, 2013. v. 4.

SILVESTRE, G. R. **Redução da resistência de geogrelhas devido danos químicos causados por resíduos de construção e demolição reciclados**. 2019. 147 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil). Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia, 2018.

TREJOS GALVIS, H. L. **Avaliação da abertura de filtração de geotêxteis sob confinamento e parcialmente colmatados**. 2016. 164 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2016.

VIEIRA, C. S.; PEREIRA, P. Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: a review. **Resources, Conservation and Recycling**, Portugal, v. 103, p. 192-204, 2015. DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.07.023