

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

**RESISTÊNCIA DE GEOGRELHAS APÓS
DANOS MECÂNICOS CAUSADOS POR
RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO RECICLADOS (RCD-R)**

MATEUS PORTO FLEURY

D0176G18
GOIÂNIA-GO
2018

**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 Dissertação

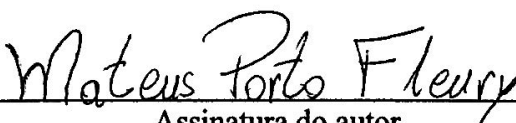
Nome completo do autor: Mateus Porto Fleury

Título do Trabalho: Resistência de geogrelhas após danos mecânicos causados por resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R)

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 arquivo em formato digital PDF da dissertação.



Assinatura do autor

Ciente e de acordo:



Assinatura do orientador
Data: 26 / 07 / 2018

MATEUS PORTO FLEURY

**RESISTÊNCIA DE GEOGRELHAS APÓS
DANOS MECÂNICOS CAUSADOS POR
RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO RECICLADOS (RCD-R)**

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.

D0176G18
GOIÂNIA-GO
2018

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

Fleury, Mateus Porto

Resistência de geogrelhas após danos mecânicos causados por resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) [manuscrito] / Mateus Porto Fleury. 2018.

CLX, 160 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Eder Carlos Guedes dos Santos.

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, 2018.

Bibliografia.

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

1. Danos mecânicos de instalação. 2. Geogrelha. 3. Resíduos de construção e demolição reciclados. 4. Fator de redução de resistência. I. Santos, Eder Carlos Guedes dos, orient. II. Título.

CDU 624.13



**PPG
GECON**

**Programa de Pós-Graduação em
Geotecnia, Estruturas e Construção Civil**



Ata de Nº 0176 da sessão de julgamento da
Dissertação do aluno Mateus Porto Fleury da
área de concentração Geotecnia do PPG em
Geotecnia, Estruturas e Construção Civil.

Aos 11 dias do mês de maio de 2018, às 08h30min, na sala Caryocar, Bloco A, 2º andar, na Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação da UFG, reuniu-se a banca examinadora designada na forma regimental pela Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil para julgar a Dissertação intitulada “**Resistência de Geogrelhas Após Danos Mecânicos Causados por Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R)**”, apresentada pelo aluno **Mateus Porto Fleury**, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de MESTRE, área de concentração Geotecnia. A Banca Examinadora foi Presidida pelo Prof. Dr. Eder Carlos Guedes dos Santos (GECON/UFG), tendo como membros a Prof.ª Dr.ª Lilian Ribeiro de Rezende (GECON/UFG) e o Prof. Dr. Jefferson L. Silva (EESC/USP). Aberta a sessão pública, o candidato teve a oportunidade de expor o trabalho. Após a exposição, o aluno foi arguido oralmente pelos membros da Banca, os quais concluíram pelos seguintes resultados:

Membro	Instituição	Função	Resultado
Eder Carlos Guedes dos Santos	GECON/UFG	Presidente	<u>APROVADO.</u>
Lilian Ribeiro de Rezende	GECON/UFG	Examinadora Interna	<u>APROVADO</u>
Jefferson L. Silva	EESC/USP	Examinador Externo	<u>APROVADO</u>

Tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua Dissertação, a Banca Examinadora concluiu pela **aprovação** do candidato **sem restrições**.

Não tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua Dissertação, a Banca Examinadora concluiu pela **reprovação** do candidato, conforme as seguintes justificativas:

Nos termos do Regulamento Geral dos Cursos de pós-graduação desta Universidade, foi lavrada a presente ata que, lida e julgada conforme, segue assinada pelos membros da **Banca Examinadora** e pelo **candidato**.

Lilian R. de Rezende

Lilian Ribeiro de Rezende
PPG-GECON/UFG

Jefferson L. Silva

Prof. Dr. Jefferson L. Silva
(EESC/USP)

Eder Carlos Guedes dos Santos

Eder Carlos Guedes dos Santos
PPG-GECON/UFG

Candidato: Mateus Porto Fleury

Mateus Porto Fleury

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Augusto Fleury (1953 - 2018) e Lúcia Castro, e à minha avó, Zuleika Porto (1929 – 2015).

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, sempre, a Deus por ter me dado vida, uma oportunidade de ir atrás dos meus sonhos e ter aberto e fechado as portas no momento certo em minha vida.

À minha companheira, amiga, professora, educadora, enfim..., mãe, Lúcia Porto de Castro, por todo amor, dedicação, renúncia a si própria, força, sabedoria e paciência que teve por mim durante a realização, não somente deste trabalho, mas durante toda a vida.

À meu amigo, professor, conselheiro e, acima de tudo, pai, Dr. Augusto Fleury Veloso da Silveira, por sempre ouvir minhas reclamações, entendê-las, agir de forma positiva e sempre me encorajar a ir atrás de meus sonhos.

À minha avó, Zuleika de Castro Porto, por ter fornecido base para toda minha criação, depositado em mim sua confiança para aprender a língua inglesa e paciência.

À Jaqueline Rodrigues Ferreira, pela companhia, apoio, paciência, carinho, amor e críticas construtivas.

À meus irmãos Augusto, Guilherme e Juliana Wohlgemuth Veloso da Silveira, pelos incentivos, carinho, paciência com as reclamações e ausências. À Vitória Fleury, por, sem que saiba, conseguir fazer com que esqueçamos nosso trabalho e preocupações.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de mestrado concedida durante a realização deste estudo.

Ao Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil (PPG-GEOCN) e Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA) da Universidade Federal de Goiás (UFG) por ter fornecido as instalações necessárias para a realização de todas as atividades desenvolvidas no mestrado.

Aos (às) professores (as) Lilian Rezende, Marcia Mascarenha, Gilson Gitirana Jr, Carlos Vargas, Maurício Sales e Renato Angelim por passarem seus conhecimentos da forma mais completa possível, por ensinarem a ter ética na pesquisa, pelas palavras de incentivo trocadas no corredor da EECA e pelas oportunidades de trabalhar junto a vocês mesmo que em um

simples trabalho de disciplina. Foi um prazer ser aluno de vocês! Agradecimentos especiais a Gilson Gitirana Jr., pelas palavras de incentivo a este tema designado a mim, e Carlos Vargas por ter dado atenção a minhas ideias de artigos nacionais de contenção.

À meu professor e orientador Eder Santos, pela real orientação deste trabalho, por transmitir seus conhecimentos e ensinamentos na área da pesquisa, por procurar saber quais minhas intenções com o mestrado e a partir disso me oferecer oportunidades que jamais teria imaginado. Obrigado professor, pelas longas conversas em sua sala, ou mesmo por telefone, estando o senhor de férias ou não. Gostaria que soubesse que foi uma honra ser orientado pelo senhor.

Ao professor Jefferson Lins, por ter aberto as portas do Laboratório de Geossintéticos para a realização dos ensaios de tração descritos neste trabalho, pela confiança conferida a mim e pelo apoio oferecido durante todo o período de estadia. À Clever Valentin, pelo apoio durante a realização dos ensaios em São Carlos e confiança creditada.

Aos técnicos Vitor, João, Clayton, Gabriel e Lucas pelas ajudas concedidas, ensinamentos transmitidos, momentos de diversão e apoio nas atividades realizadas dentro e fora dos laboratórios.

À Daniel Dias, meu orientador de trabalho de conclusão de curso que, sabendo de minha intenção de ingressar no mestrado, sempre me incentivou e me mostrou, em 2013, quão maravilhosa e desafiadora é a engenharia geotécnica. À Douglas Bittencourt, Adriana Gomes, Flávio Cunha, Luciano Carmo e Márcio Careli, pelos conhecimentos transmitidos no escritório e por sempre me apoiarem na decisão do mestrado.

À meu fiel amigo, Rodolpho Costa, pela ajuda fundamental concedida na construção da instalação deste experimento e por mostrar que é possível ter amizade mesmo sem conversar todos os dias. À Eduardo Felter, por entender minha ausência durante a realização deste trabalho.

A meus amigos e parceiros de mestrado Ricardo Moreira Vilhena e Roberto Dutra Alves, pelo apoio durante as disciplinas e os procedimentos experimentais realizados. A Jefferson Freitas pelo apoio concedido no início dos procedimentos experimentais. A Heitor Bernardes, Marlon Echliewe, Millena Silva, Laynara Barroso e Augusto pelos bons momentos que passamos juntos durante as disciplinas.

Às amizades feitas em São Carlos–SP: Jean Belo, Gabriel Pedroso, Gabriel Marques, Yara Barbosa, Nathalia Ferraz e Diego Laum, por terem abdicado de suas rotinas e estudos para me apresentarem a cidade e por todo apoio prestado durante a realização dos ensaios. Aos jogadores de tênis da Equipe de Tênis de engenharia de São Carlos, por terem me dado a oportunidade de treinar em seus estabelecimentos.

Aos parceiros que depositaram sua confiança em mim e investiram nesta pesquisa: CNPq, pela bolsa de mestrado concedida; CAPES, pelo incentivo a pesquisa; Laboratório de Geotecnia (LABGEO) da Universidade Federal de Goiás (UFG), pela oportunidade de realizar os ensaios em sua estrutura; Laboratório de Inovações Tecnológicas em Construção Civil (LABITECC) pelo apoio fornecido durante a execução dos ensaios experimentais; RENOVE Gestão em Resíduos Ltda. (RNV), pelo fornecimento dos RCD-R deste estudo; HUESKER, pelo fornecimento das geogrelhas; MOLD – Estruturas pré fabricadas, pelo fornecimento das contenções laterais da instalação experimental; SETE Engenharia, pelo fornecimento de insumos, mão de obra e execução da camada de concreto armado utilizada neste estudo; Terra e Entulho e Terra Móvel, por fornecerem seus equipamentos para limpeza e realização dos ensaios na instalação experimental; GLOBAL Locações, por fornecerem os equipamentos de compactação (rolo vibratório e sapo); REISFORTS, pelo fornecimento das tendas para cobrir a instalação; e Laboratório de Geossintéticos da Escola de Engenharia de São Carlos (USP), por fornecerem total apoio a realização dos ensaio de tração.

“A satisfação está no esforço e não apenas na realização final.”

Mahatma Gandhi

RESUMO

Os impactos causados pelos resíduos da indústria da construção civil estimulam a adoção de técnicas de beneficiamento que tornam os resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) atrativos como material de preenchimento em obras geotécnicas. Desse modo, a utilização conjunta desse novo material de construção com geossintéticos em estruturas de solo reforçado (ESR) mostra-se interessante quanto aos aspectos ambientais e técnicos, uma vez que o conjunto pode apresentar comportamento equivalentes aos de estruturas executadas com materiais convencionais. Contudo, apesar desse cenário positivo, faz-se fundamental investigar os danos mecânicos que o material de aterro pode causar ao elemento de reforço, o que pode contribuir para a diminuição de sua resistência e comprometer o seu desempenho e a sua funcionalidade. Nesse contexto, este estudo propôs quantificar os danos mecânicos de instalação gerados por RCD-R em geogrelhas por meio de sua reprodução em um experimento de campo. Para tanto, uma instalação experimental de peças pré-moldadas de concreto foi construída para simular os processos construtivos de uma estrutura de solo reforçado. Os elementos de reforço adotados consistiram de três diferentes tipos de geogrelhas – uma com fibra de álcool polivinílico (PVAL) e duas de poliéster (PET). Um total de sete amostras de RCD-R foram coletadas a fim de efetuar a sua caracterização em laboratório e verificar a variabilidade dos parâmetros de interesse para aplicação em obras geotécnicas. Buscou-se investigar a influência de dois condicionantes de dano de instalação: i) a altura de lançamento de material e ii) os processos de compactação – com rolo vibratório e à percussão. Investigou-se, também, o efeito do uso de uma camada de proteção – constituída do próprio RCD-R – nos danos mecânicos das geogrelhas. Os danos foram quantificados, com o auxílio de análise estatística, por meio de fatores de redução relacionados à resistência à tração de pico, assim como a alteração da deformação na ruptura e rigidezes (para deformações de 2% e 5%). A caracterização geotécnica das amostras de RCD-R revelou características semelhantes às observadas para solos pedregulhosos/arenosos, comportamento não plástico e variabilidade considerável. As reduções de resistência à tração decorrentes dos processos de compactação foram superiores em relação aos procedimentos de lançamento de material. As análises visuais das amostras danificadas revelaram que o dano de abrasão foi o principal dano visual observado. Conclui-se que os RCD-R apresentaram fatores de redução de resistência em geogrelhas, devido aos danos de instalação, que podem ser adotados de modo a viabilizar o uso destes materiais em ESR atendendo às características técnicas e ambientais desejadas para esse tipo de obra.

Palavras-chave: Danos mecânicos de instalação. Geogrelha. Resíduos de construção e demolição reciclados. Fator de redução de resistência.

ABSTRACT

The impacts caused by waste generation from construction industry stimulate the adoption of techniques that made the recycled construction and demolition wastes (RCDW) an attractive filling material for the geotechnical purpose. The utilization of this new construction material with geosynthetics in reinforced soil structure (RSS) shows a promising path related to environmental and technical aspects, once the utilization of both materials can afford similar behavior as structures with natural aggregates. Despite this favorable scenario, it is essential to assess the mechanical damages on the reinforcement elements caused by the filling materials, which decrease its strength and compromise its behavior and functionality. In this way, this study aims to quantify the mechanical damages during installation caused by RCDW on geogrids by its reproduction in an experimental site plant. The site plant with precast concrete beams has been constructed to simulate constructive process of a RSS. Three different geogrids were adopted as reinforcement elements: one with polyvinyl alcohol (PVA) yarns and two with polyester (PET) yarns. Seven samples of RCDW were collected for laboratory technical characterization to assess the variability of the parameters relevant to the geotechnical application. It was investigated two installation damages mechanisms: i) launch height of the filling material, and ii) compaction procedures – with a vibratory roller and percussion equipment. Furthermore, it was evaluated the effects of a protection layer – with the same material (RCDW) – on the mechanical damages. The damages were quantified, with the adoption of statistical analysis, by reduction factors related to the ultimate tensile strength, as well as the modifications on the strain and stiffness (for 2% and 5% strains). The technical characterization of the RCDW samples revealed characteristics similar to gravels or sands, non-plastic behavior, and a considerable variability. The tensile strength reduction caused by compaction procedures prove to be more severe than the reductions caused by the launching height process. The abrasion damage can be considerate the major visual damage verified by the visual analysis of damaged specimens. It was concluded that the geogrids reduction factors caused by RCDW (related to installation damages) could be adopted to make feasible the utilization of these materials in RSS, taking in account the technical and environmental characteristics desired for this type of application.

Key-Words: Installation damages. Geogrid. Recycled construction and demolition wastes. Strength reduction factors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Caçambas com RCD contaminados por outros materiais (Fonte: O autor).....	31
Figura 2.2 – Hierarquia de ações para o gerenciamento dos resíduos de construção e demolição – modificada pelo autor (PENG; SCORPIO; KITBERT, 1997).	32
Figura 2.3 – Usinas de reciclagem no Brasil: (a) evolução da quantidade de usinas, (b) relação com ensaios técnicos dos produtos produzidos e (c) principais categorias de clientes/compradores – modificado pelo autor (ABRECON, 2015).	36
Figura 2.4 – Acumulo de publicações relativas a RCD ou RCD-R – modificado pelo autor (SILVA FILHO; SANTOS, 2014).	36
Figura 2.5 – Croqui da disposição da área da empresa (FLEURY; SIQUEIRA NETO; SANTOS, 2017).	38
Figura 2.6 – Dados sobre recebimento de material: (a) participação dos tipos de geradores e (b) categoria de RCD recebidos pela usina - tipo de RCD – modificado pelo autor (FLEURY; SIQUEIRA NETO; SANTOS, 2017). Onde: A = são resíduos sem contaminantes; e A/B = resíduos com contaminantes abaixo de 20%	39
Figura 2.7 – Dados sobre saída de material: percentuais (a) dos produtos produzidos e (b) contribuição das categorias, em volume – modificado pelo autor (FLEURY; SIQUEIRA NETO; SANTOS, 2017).	40
Figura 2.8 – Dispersão dos resultados de compactação – modificado pelo autor (CARDOSO <i>et al.</i> , 2016).	44
Figura 2.9 – Geogrelhas com diferentes aberturas e fibras – modificado pelo autor (ZORNBERG <i>et al.</i> , 2008).	48
Figura 2.10 – Relação da resistência à tração do geossintético com o tempo – modificado pelo autor (CR ISO 13434, 1998 <i>apud</i> HUFENUS <i>et al.</i> , 2005).	52
Figura 2.11 – Vazios existentes entre as fibras de uma geogrelha – modificado pelo autor (NORAMBUENA-CONTRERAS <i>et al.</i> , 2016).	53

Figura 2.12 – Ensaio realizado em laboratório: a) geossintético dentro do equipamento de dano; b) pistão aplicador de carga cíclica e c) ensaio de tração em faixa larga – modificado pelo autor (HUANG; CHIOU, 2006; HUANG, 2006).	54
Figura 2.13 – Relação FR_{DI}^T versus D_{50}/C_c para diferentes carregamentos cíclicos (Fonte: O autor).	56
Figura 2.14 – Curvas tensão-deformação em amostras (a) virgens e (b) danificadas – modificado pelo autor (NORAMBUENA-CONTRERAS; GONZALEZ-TORRE, 2015).	58
Figura 2.15 – Danos visuais exibindo (a) revestimento e fibras rompidas e (b) apenas revestimento rompido – modificado pelo autor (HUANG, 2006).....	59
Figura 2.16 – Danos visuais do (a) Grupo 1, (b) Grupo 2 e (c) Grupo 3 – modificado pelo autor (NORAMBUENA-CONTRERAS; GONZALEZ-TORRE, 2015).....	59
Figura 2.17 – Relação FR_{DI}^T versus classificação do solo, para ensaios realizados em grande escala. (Fonte: O autor).....	63
Figura 3.1 – Localização dos pontos de coleta da amostra RCD-R 03.	68
Figura 3.2 – Recebimento do RCD-R: (a) preenchimento do caminhão basculante e (b) deposição do material próximo a instalação experimental.....	69
Figura 3.3 – Ilustração das geogrelhas em estudo: (a) disposição das fibras nas imagens, b) GGPVA; b) GGPET 01 e c) GGPET 02.	70
Figura 3.4 – Condições das geogrelhas recebidas: (a) existência de dobras e danos nas geogrelhas (b) GGPVA, (c) GGPET 01 e (d) GGPET 02.....	70
Figura 3.5 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos adotados.....	71
Figura 3.6 – Materiais retidos na peneira 4,8 mm após secagem.....	73
Figura 3.7 – Execução do ensaio de frasco de areia: (a) camada base e (b) camada compactada.	73
Figura 3.8 – Corte da geogrelha de poliéster 02 (GGPET 02).	74
Figura 3.9 – Localização da instalação experimental.....	75
Figura 3.10 – Construção da instalação experimental: (a) estaqueamento da área; (b) limpeza da vegetação superficial, (c) nivelamento do terreno; (d) terreno nivelado; (e) execução da concretagem; (f) laje de concreto concluída; (g) instalação das vigas pré-moldadas e (h) compactação manual de solo.	76

Figura 3.11 – Instalação experimental: (a) concluída e (b) corte transversal.....	77
Figura 3.12 – Configuração final da camada em estudo.	78
Figura 3.13 – Camada base: (a) compactação e (b) remoção da camada de RCD-R.....	79
Figura 3.14 – Aferição da espessura da camada da base compactada.....	79
Figura 3.15 – Configurações dos ensaios: (a) no primeiro e (b) segundo preenchimento da instalação experimental.....	80
Figura 3.16 – Conferência da altura de queda antes do lançamento do RCD-R.	81
Figura 3.17 – Execução da camada de proteção: (a) deposição do RCD-R, (b) nivelamento da camada e (c) lançamento do RCD-R.....	82
Figura 3.18 – Primeiro preenchimento da instalação experimental: (a) configuração final (sem o processo de compactação) e (b) compactação com rolo vibratório.	82
Figura 3.19 – Compactação com compactador a percussão.....	83
Figura 3.20 – Configuração final do segundo preenchimento da instalação experimental.....	84
Figura 3.21 – Procedimento de coleta dos RCD-R 06 e RCD-R 07.	84
Figura 3.22 – Exumação das geogrelhas: (a) remoção inicial do material de preenchimento com enxada; (b) retirada manual do RCD-R mais próximo a geogrelha; (c) visualização do segmento de geogrelha completo; (d) medição do comprimento do segmento; (e) corte da geogrelha; e (f) procedimento de acondicionamento da geogrelha para estocagem.	85
Figura 3.23 – Divisão das amostras em corpos de prova para o ensaio de resistência à tração.	86
Figura 3.24 – Prensa universal de ensaios com garras de rolete.	87
Figura 3.25 – Procedimento de quantificação dos danos.	89
Figura 3.26 – Danos mecânicos de instalação: a) abrasão, b) separação, c) contusão e d) corte.	91
Figura 3.27 – Região analisada das geogrelhas.....	91
Figura 4.1 – Composição gravimétrica das amostras RCD-R (a) 01, (b) 02, (c) 03, (d) 04, (e) 05, (f) 06 e (g) 07.	95
Figura 4.2 – Curvas granulométricas com e sem defloculante da amostra RCD-R 02.....	96
Figura 4.3 – Distribuição granulométrica das amostras ensaiadas.....	97

Figura 4.4 – Relação coeficiente de variação do percentual de material passante <i>versus</i> diâmetro dos grãos.....	98
Figura 4.5 – Faixa granulométrica das amostras de RCD-R ensaiadas.....	99
Figura 4.6 – Faixa granulométrica das amostras de RCD-R e gradações de materiais para aplicação em obras de pavimentação (a partir de ABNT, 2004; DNIT 141, 2010; ASTM D1241-00, 2000).	101
Figura 4.7 – Gradação de materiais para aplicação em estruturas de solo reforçado (a partir de BS 8006, 2010; NCMA, 2010; FHWA, 2010).....	102
Figura 4.8 – Relação N <i>versus</i> w para as amostras (a) RCD-R 02, (b) RCD-R 03, RCD-R 04 e RDC-R 05.	102
Figura 4.9 – Ensaio de limite de plasticidade da amostra RCD-R 03: (a) parcela da amostra separada para obter a forma de um cilindro; (b) tentativa de obter o cilindro com três milímetros de diâmetro.	103
Figura 4.10 – Curvas de compactação das amostras de RCD-R ensaiadas.....	104
Figura 4.11 – Curvas de compactação e ISC individual das amostras: (a) RCD-R 01, (b) RCD-R 02, (c) RCD-R 03, (d) RCD-R 04, (e) RCD-R 05, (f) RCD-R 06 e (g) RCD-R 07.	Erro! Indicador não definido.
Figura 4.12 – Deslizamento da amostra de RCD-R após a compactação: (a) Fundo do corpo de prova, ocupado inicialmente pelo disco espaçador, (b) parte superior do corpo de prova.	Erro! Indicador não definido.
Figura 4.13 – Curvas tensão-deformação: amostras virgens GGPVA.....	106
Figura 4.14 – Curvas tensão-deformação: amostras virgens GGPET 01.....	107
Figura 4.15 – Curvas tensão-deformação: amostras virgens GGPET 02.....	107
Figura 4.16 – Curvas tensão-deformação das amostras virgens das geogrelhas empregadas no estudo.....	107
Figura 4.17 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPVA para os cenários VIR, A0-SC, A1-SC e A2-SC.	110
Figura 4.18 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPVA para os cenários VIR, A0-CR, A1-CR e A2-CR.	112

Figura 4.19 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPVA para os cenários VIR, A0-CS, A1-CS e A2-CS.	112
Figura 4.20 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPVA para os cenários VIR, A0-SC, A0-CR e A0-CS.	114
Figura 4.21 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPVA para os cenários VIR, A1-SC, A1-CR e A1-CS.	114
Figura 4.22 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPVA para os cenários VIR, A2-SC, A2-CR e A2-CS.	115
Figura 4.24 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPVA para os cenários VIR, A2*-SC, A2*-CR e A2*-CS.	115
Figura 4.25 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 01 para os cenários VIR, A0-SC, A1-SC e A2-SC.	116
Figura 4.26 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 01 para os cenários VIR, A0-CR, A1-CR e A2-CR.	118
Figura 4.27 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 01 para os cenários VIR, A0-CS, A1-CS e A2-CS.	118
Figura 4.28 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 01 para os cenários VIR, A0-SC, A0-CR e A0-CS.	120
Figura 4.29 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 01 para os cenários VIR A1-SC, A1-CR e A1-CS.	120
Figura 4.30 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 01 para os cenários VIR, A2-SC, A2-CR e A2-CS.	121
Figura 4.31 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 01 para os cenários VIR, A2*-SC, A2*-CR e A2*-CS.	122
Figura 4.32 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 02 para os cenários VIR, A0-SC, A1-SC e A2-SC.	122
Figura 4.33 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 02 para os cenários VIR, A0-CR, A1-CR e A2-CR.	124
Figura 4.34 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 02 para os cenários VIR, A0-CS, A1-CS e A2-CS.	125

Figura 4.35 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 02 para os cenários VIR, A0-SC, A0-CR e A0-CS.....	125
Figura 4.36 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 02 para os cenários VIR, A1-SC, A1-CR e A1-CS.....	127
Figura 4.37 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 02 para os cenários VIR, A2-SC, A2-CR e A2-CS.....	128
Figura 4.38 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 02 para os cenários VIR, A2*-SC, A2*-CR e A2*-CS.....	128
Figura 4.39 – Valores médios e limites (máximos e mínimos) de resistência à tração das amostras virgem e danificadas no cenário sem compactação.....	132
Figura 4.40 – Croqui da distribuição de cargas provocada pelo impacto do grão sobre a camada de proteção.	134
Figura 4.41 – Valores médios e limites (máximos e mínimos) de resistência à tração das amostras virgem e danificadas no cenário com compactação com rolo vibratório.....	135
Figura 4.42 – Valores médios e limites (máximos e mínimos) de resistência à tração das amostras virgem e danificadas no cenário com compactação à percussão.....	136
Figura 4.43 – Comportamentos curvas tensão-deformação virgem <i>versus</i> danificada.	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Componentes de lixiviados em RCD-R – modificado pelo autor (VIEIRA; PEREIRA, 2015b; 2016).....	32
Tabela 2.2 – Tecnologias de reciclagem e RCD-R produzidos – modificado pelo autor (TAM; TAM, 2006).....	33
Tabela 2.3 – Coleta de RCD por região nos anos de 2013 e 2014 – modificada pelo autor (ABRELPE, 2015).	34
Tabela 2.4 – Propriedades geotécnicas de RCD-R.....	43
Tabela 2.5 – Composição de RCD-R.	45
Tabela 2.6 – Parâmetros de resistência de RCD-R.....	45
Tabela 2.7 – Funções dos geossintéticos em projetos de engenharia – modificado pelo autor (BUENO; LOTTI, 2015).....	47
Tabela 2.8 – Requisitos de desempenho de fibras e revestimentos das geogrelhas – modificado pelo autor (DUVALL, 1994).....	48
Tabela 2.9 - FR_{DI}^T estabelecidos pela FHWA – modificado pelo autor (FHWA, 2009).	61
Tabela 3.1 – Plano de coleta realizado e massas secas coletadas.....	68
Tabela 3.2 – Plano de coleta realizado e massas secas pertinentes ao RCD-R.	69
Tabela 3.3 – Especificações técnicas das geogrelhas em estudo (Fonte: Fabricante).....	69
Tabela 3.4 – Procedimentos técnicos adotados.	72
Tabela 3.5 – Nomenclatura das configurações de ensaio.....	78
Tabela 3.6 – Espessuras das camadas compactadas (em mm) da região com camada de proteção.	83
Tabela 3.7 – Quantidade de elementos transversais (ET), elementos longitudinais (EL) e nós (NÓ) avaliados por geogrelha.	92
Tabela 4.1 – Resultados da gravimetria em massa.....	94
Tabela 4.2 – Massa especificadas amostras de RCD-R.....	96
Tabela 4.3 – Faixas granulométricas segundo NBR (6502) e classificação das amostras.....	99

Tabela 4.4 – Resumo dos resultados de WL, WP e IP das amostras de RCD-R.	103
Tabela 4.5 – Resumo dos valores de umidade ótima, densidade seca máxima e índice de suporte Califórnia das amostras ensaiadas.	104
Tabela 4.6 – Deformação na ruptura média virgem das geogrelhas em estudo.	108
Tabela 4.7 – Rigidezes com 2% e 5% de deformação das amostras virgens das geogrelhas ensaiadas.	108
Tabela 4.8 – Intervalo de confiança da média dos parâmetros analisados para as geogrelhas em estudo.	109
Tabela 4.9 – Resultado da análise visual dos danos mecânicos simulados na GGPVA.	111
Tabela 4.10 – Resumo dos resultados de \overline{T}_d , $\overline{\varepsilon}_d$ e $\overline{J}_{sec_d}^{2\%}$ da GGVPA.	116
Tabela 4.11 – Resultado da análise visual dos danos mecânicos simulados na GGPET 01.	117
Tabela 4.12 – Resumo dos resultados de \overline{T}_d , $\overline{\varepsilon}_d$, $\overline{J}_{sec_d}^{2\%}$ e $\overline{J}_{sec_d}^{5\%}$ da GGPET 01.	122
Tabela 4.13 – Resultado da análise visual dos danos mecânicos simulados na GGPET 01.	123
Tabela 4.14 – Resumo dos resultados de \overline{T}_d , $\overline{\varepsilon}_d$, $\overline{J}_{sec_d}^{2\%}$ e $\overline{J}_{sec_d}^{5\%}$ das amostras virgens e danificadas da GGPET 02.	127
Tabela 4.15 – Fatores de redução dos parâmetros analisados para todos os cenários em estudo.	130
Tabela 4.16 – Comparação do FR_{Dt}^T obtido por duas metodologias diferentes.	138
Tabela 4.17 – Comportamento tensão-deformação identificado para cada cenário.	141
Tabela 4.18 – Média da redução de resistência à tração de cada comportamento identificado por geogrelha.	Erro! Indicador não definido.

LISTA DE ABREVIATURAS

A_{aberta}	Área aberta da malha;
A_{efet}	Área efetiva ocupada pela geogrelha;
A0	Altura de queda de zero metros;
A1	Altura de queda de 1,0 (um) metro;
A2	Altura de queda de 2,0 (dois) metros;
A2*	Altura de queda de 2,0 (dois) metros sobre uma camada de RCD-R de 50 mm de espessura;
ABRECON	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção e Demolição;
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais;
APR	Agregados de pavimento recuperado;
ARA	Agregados reciclados de alvenaria;
ARC	Agregados de resíduo de concreto;
ARM	Agregados de resíduo mistos;
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials;</i>
BGS	Brita graduada simples;
C_C	Coefficiente de curvatura;
CL	Argila;
C_{NU}	Coefficiente de não uniformidade;
COMURG	Companhia de Urbanização de Goiânia;
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente;
CR	Compactação com rolo compactador;
CS	Compactação à percussão com sapo;
CV	Coefficiente de variação;
CV	Coefficiente de variação;

EECA	Escola de Engenharia Civil e Ambiental;
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos;
EL	Elemento longitudinal;
ELS	Estado limite de serviço;
ELU	Estado limite último;
EPX	Epóxi;
ESR	Estrutura de solo reforçado;
ET	Elemento transversal;
FHWA	<i>Federal Highway Administration;</i>
FR	Fator de redução;
GC	Pedregulho argiloso;
GGPET 01	Geogrelha de poliéster 01;
GGPET 02	Geogrelha de poliéster 02;
GGPVA	Geogrelha de álcool polivinílico;
GP – GM	Pedregulho mal graduado com silte ;
GP	Pedregulho mal graduado;
GW	Pedregulho bem graduado;
IP	Índice de Plasticidade;
ISC	Índice de suporte Califórnia;
ISO	<i>International Organization for Standardization;</i>
LA	Coefficiente de abrasão Los Angeles;
MEV	Microscopia eletrônica de varredura;
N	Número de golpes;
NBR	Norma brasileira;
NM	Norma mercosul;
NÓ	Nós (encontro entre EL e ET);
NP	Não plástico;
ONG	Organização não governamental;
PAN	Pliacrilonitrila;

PE	Polietileno;
PEAD	Polietileno de alta densidade;
PET	Poliéster;
PMGIRS	Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Município de Goiânia;
PP	Polipropileno;
PVAc	Acetato de polivinila;
PVAL	Álcool polivinílico;
PVC	Policloreto de vinila;
RCD	Resíduos de construção e demolição;
RCD-R	Resíduos de construção e demolição reciclados;
SC	Areia argilosa;
SC	Sem compactação;
SECIMA	Secretaria de Meio Ambiente, Recursos Hídricos, Infraestrutura, Cidades e Assuntos Metropolitanos;
SNSA	Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental;
SP	Areia mal graduada;
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos (<i>Unified Soil Classification System</i>);
SW	Areia bem graduada;
TRB	Sistema Rodoviário de Classificação (sistema de classificação do <i>Transportation Research Board</i>);
UFG	Universidade Federal de Goiás;
USP	Universidade de São Paulo.

LISTA DE SÍMBOLOS

$\overline{\varepsilon}_d$	Média de deformação na ruptura das amostras danificadas;
$\overline{\varepsilon}_v$	Média de deformação na ruptura das amostras virgens;
μ	Média populacional;
γ	Peso específico;
$\gamma_{d_m\acute{a}x}$	Peso específico seco máximo;
ϕ	Ângulo de atrito;
c	Coesão;
D	Diâmetro dos grãos;
d	Distância a partir da referência (topo das peças de concreto pré-moldado);
D_{100}	Diâmetro máximo dos grãos;
D_{50}	Diâmetro equivalente à passagem de 50% de material;
FI	Fator de incerteza;
FR_A	Fator de redução relativo ao dano ambiental;
FR_{DI}	Fator de redução devido aos danos de instalação;
FR_{DI}^e	Fator de redução devido ao dano de instalação em relação à deformação na ruptura;
FR_{DI}^J	Fator de redução devido ao dano de instalação em relação à rigidez;
FR_{DI}^T	Fator de redução devido ao dano de instalação em relação à resistência à tração de pico;
$FR_{DI}^{X\%}$	Fator de redução devido ao dano de instalação em relação ao módulo de rigidez com X% de deformação;
FR_F	Fator de redução relativo à fluência em tração;
FR_Q	Fator de redução relativo ao dano químico;
FR_e	Fator de redução relativo à deformação na ruptura;

$\overline{J_{sec_d}^{X\%}}$	Média da rigidez secante das amostras danificadas com X% de deformação;
$\overline{J_{sec_V}^{X\%}}$	Média da rigidez secante das amostras virgens com X% de deformação;
L/S	Razão líquido-sólido;
m_f	Massa das fibras;
n	Número de amostras;
NC	Nível de confiança;
Nw_l	Não apresenta limite de liquidez;
Nw_p	Não apresenta limite de plasticidade;
PSR	Percentual de redução de resistência à tração de pico;
s	Desvio padrão amostral;
t	Variável aleatória da Distribuição de Student;
$\overline{T_d}$	Média de resistência à tração de pico das amostras danificadas;
T_p	Resistência à tração de projeto;
T_u	Resistência à tração última;
$\overline{T_v}$	Média de resistência à tração de pico das amostras virgens;
V_r	Volume de revestimento;
w	Umidade;
w_l	Limite de liquidez;
$w_{ótima}$	Umidade ótima;
w_p	Limite de plasticidade.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	25
1.1 JUSTIFICATIVA.....	26
1.2 OBJETIVOS.....	26
1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO	27
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
2.1 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO RECICLADOS (RCD-R).....	29
2.1.1 Resíduos de construção e demolição (RCD).....	30
2.1.2 Geração e reciclagem dos resíduos de construção e demolição (RCD) no Brasil	34
2.1.3 Geração e reciclagem dos resíduos de construção e demolição (RCD) em Goiânia–GO.....	37
2.1.4 Características, propriedades geotécnicas e aplicação do RCD-R.....	40
2.2 GEOSSINTÉTICOS	46
2.2.1 Geogrelhas	47
2.2.2 Durabilidade de geogrelhas	50
2.2.3 Danos de instalação em geogrelhas	53
2.2.3.1 Ensaios de dano realizados em laboratório	54
2.2.3.2 Ensaios de danos em campo.....	60
2.2.3.3 Fatores de redução calculados em relação à rigidez e à deformação na ruptura de geossintéticos.....	65
CAPÍTULO 3 METODOLOGIA	67
3.1 MATERIAIS.....	67
3.1.1 Resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R).....	67
3.1.2 Geogrelhas	69
3.2 MÉTODOS	71
3.2.1 Ensaios de caracterização geotécnica do RCD-R	71

3.2.2	Preparo das geogrelhas	73
3.2.3	Instalação para quantificação de danos.....	74
3.2.4	Simulação dos danos.....	75
3.2.4.1	Compactação da camada base	78
3.2.4.2	Posicionamento das geogrelhas na instalação experimental	79
3.2.4.3	Simulação de lançamento do material de preenchimento	80
3.2.4.4	Métodos de compactação empregados no experimento de campo	81
3.2.4.5	Exumação das geogrelhas	84
3.2.5	Ensaio de resistência à tração em geogrelhas.....	86
3.2.6	Quantificação dos danos de instalação	87
3.2.7	Análise visual dos danos mecânicos de instalação	90
CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES		93
4.1	RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO RECICLADOS (RCD-R)	93
4.1.1	Análise gravimétrica.....	93
4.1.2	Peso específico dos grãos que passam na peneira de 4,8 mm	94
4.1.3	Análise Granulométrica	96
4.1.3.1	Variabilidade da distribuição granulométrica	97
4.1.3.2	Classificação das amostras ensaiadas.....	98
4.1.3.3	Aplicação do material em obras geotécnicas	100
4.1.4	Limites de Consistência	101
4.1.5	Compactação	103
4.1.6	Peso específico do solo após compactação <i>in situ</i>	104
4.2	GEOGRELHAS	106
4.2.1	Ensaio de resistência à tração das amostras virgens.....	106
4.2.2	Ensaio de resistência à tração e análise visual das amostras danificadas.....	110
4.2.2.1	Geogrelha de Álcool Polivinílico	110
4.2.2.2	Geogrelha de Poliéster 01	115
4.2.2.3	Geogrelha de Poliéster 02	122
4.2.3	Determinação e análise dos fatores de redução	129

4.2.4	Comparação dos resultados das geogrelhas	131
4.2.4.1	Análise do cenário sem compactação (SC)	131
4.2.4.2	Análises dos cenários com compactação (CR e CS).....	135
4.2.4.3	Sinergia entre os danos causados pelo lançamento e compactação do RCD-R...	137
4.2.4.4	Análises da rigidez danificada com 2% e 5% de deformação.....	139
CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....		143
5.1	CONCLUSÕES	143
5.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	147

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os materiais geossintéticos, cuja composição principal é polimérica, vêm ganhando espaço na Engenharia Civil desde a década de sessenta (PALMEIRA; MILLIGAN, 1989) quando ocorreram as suas primeiras aplicações em obras geotécnicas. Desde então, esses materiais passaram a ser amplamente utilizados com diversas funções, como por exemplo, elementos de reforço de solo, principalmente em obras de contenção e de pavimentação, nesta última em diversas camadas existentes na estrutura do pavimento, não excetuando a camada de concreto asfáltico.

Tendo em vista que a aplicação dos geossintéticos como elemento de reforço exige uma elevada resistência à tração, deve-se atentar para a perda dessa propriedade, a qual pode ser ocasionada devido a diversos agentes físicos (mecânicos), ambientais, químicos e biológicos. Nesse contexto, observa-se que o principal mecanismo de degradação ocorre durante sua instalação (HUFENUS *et al.*, 2005), que engloba desde o manuseio, o armazenamento e o transporte até a disposição do geossintético sobre a camada de solo, o lançamento e a compactação do material de aterro.

Diante disso, pode-se afirmar que os danos mecânicos podem decorrer de fatores que dependem das características: i) do material de preenchimento – como dimensões, formato e nível de fragmentação das partículas; ii) de fatores humanos – cuidados durante o manuseio e a instalação do geossintético; e iii) de especificações de projeto – técnica de lançamento do material, grau de compactação exigido, dentre outros. Dessa forma, o controle do material de preenchimento e dos mecanismos/procedimentos de instalação podem contribuir com a diminuição dos danos gerados, no caso de geogrelhas, nos elementos longitudinais e transversais, favorecendo, assim, a vida útil do reforço polimérico.

Nesse contexto, devido à substituição dos materiais naturais (solos) por resíduos de construção demolição reciclados (RCD-R) se mostrar promissora, verifica-se uma crescente investigação e aplicação desses novos materiais em obras geotécnicas como material de preenchimento (KOMATSU *et al.*, 1998; GUPTA, 2009; KAKUDA; PARREIRA; FABBRI,

2011; COWELL *et al.*, 2014; SANTOS; VILLAR, 2008; SANTOS; PALMEIRA; BATHURST, 2010; 2013; 2014). No entanto, para estabelecer ou consolidar o uso desse material alternativo de construção – o RCD-R –, faz-se necessário investigar de forma adequada não só as suas características, comportamento e desempenho, mas sua interação com outros materiais da obra.

1.1 JUSTIFICATIVA

Dado que os RCD-R podem substituir materiais naturais em obras geotécnicas, a sua utilização com geossintéticos apresenta-se como uma boa alternativa de material de preenchimento em estruturas de solo reforçado (ESR). Nesse sentido, o novo compósito (RCD-R e geossintético) pode apresentar desempenho aceitável para a aplicação citada.

No entanto, apesar da elevada resistência à tração dos geossintéticos poliméricos, faz-se fundamental investigar os eventuais danos que o material de aterro pode causar à estrutura do material de reforço, o que poderia contribuir para uma diminuição da sua resistência à tração e comprometimento da segurança da obra. Ademais, os principais fatores que contribuem para a ocorrência de danos mecânicos estão relacionados com a granulometria do material de aterro e com o processo de compactação adotado.

Embora seja um dos pontos de principal atenção dos projetistas que trabalham com geossintéticos, esse dano pode ser visto como inevitável, mas também incorporado nos projetos. Nesse sentido, deve-se procurar manter o maior controle de tais danos e, sobretudo, tê-los caracterizados. Torna-se, então, necessário avaliar e quantificar os danos mecânicos causados devido ao processo executivo de ESR com geossintéticos construídas com RCD-R. Com isso, os engenheiros geotécnicos poderão adotar os fatores de redução de resistência na fase de projeto, de maneira a possibilitar a utilização segura desse compósito.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal quantificar, experimentalmente, os danos mecânicos causados em geogrelhas quando utilizadas em conjunto com resíduos de construção demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado (ESR).

Como objetivos específicos, destacam-se:

- ◆ Construir uma estrutura de campo que possibilite a simulação de danos de mecânicos (de instalação) em geossintéticos empregados como material de reforço;
- ◆ Analisar a variabilidade das propriedades geotécnicas (físicas e mecânicas) de RCD-R produzidos em uma usina de reciclagem;
- ◆ Avaliar a influência dos processos de lançamento e compactação de RCD-R na redução da resistência à tração de geogrelhas empregadas como elementos de reforço;
- ◆ Determinar os fatores de redução da resistência à tração, deformação na ruptura e rigidezes – com 2% e 5% de deformação – a partir de resultados de ensaios de tração;
- ◆ Avaliar o comportamento das curvas tensão-deformação após a simulação dos danos de instalação; e
- ◆ Fornecer parâmetros de projeto a serem empregados para o dimensionamento de obras civis construídas com RCD-R e geogrelhas.

1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este documento encontra-se estruturado em cinco capítulos buscando fornecer ao leitor, de forma concisa, os conhecimentos básicos necessários para o entendimento do estudo, os materiais utilizados, as considerações específicas para a realização do experimento, os resultados e conclusões obtidas.

No Capítulo 1 está apresentada a contextualização do tema do estudo, sua justificativa, e os objetivos principal e específicos a serem atingidos.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica a respeito dos assuntos abordados no estudo proposto. O capítulo está dividido em duas partes: a primeira aborda a geração e gestão dos resíduos de construção e demolição (RCD), a sua reciclagem e as características e aplicações do material beneficiado (RCD-R); a segunda parte é pertinente aos materiais geossintéticos e versa sobre os mecanismos de degradação do material – com foco no dano de instalação em campo e laboratório –, por meio de resultados obtidos na literatura.

Em seguida, no Capítulo 3, serão descritos os materiais empregados no estudo (RCD-R e geogrelhas), a construção da instalação experimental, a metodologia utilizada na simulação dos danos e os procedimentos adotados para a sua quantificação por meio de fatores de redução.

O Capítulo 4 apresenta os resultados da caracterização geotécnica do resíduo de construção e demolição reciclados (RCD-R) coletados numa usina de reciclagem. O capítulo também apresenta os resultados dos ensaios de tração em geogrelha, os fatores de redução e os danos visuais observados para os cenários investigados.

Por fim, no Capítulo 5 estão apresentadas as conclusões do estudo e as sugestões para pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem a finalidade de discorrer sobre o tema dos resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R), abordando a geração do resíduo de construção demolição (RCD), o processo de reciclagem e posterior a utilização e aplicação; assim como, apresentar ao leitor informações a respeito do uso de geossintéticos, especificamente geogrelhas, e os aspectos relativos aos danos mecânicos gerados nesse material pelos processos de instalação.

2.1 RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO RECICLADOS (RCD-R)

Como uma alternativa ambientalmente correta frente à deposição inadequada dos resíduos de construção e demolição (RCD), a reciclagem desses materiais cria uma nova possibilidade para o mercado de insumos. Segundo a Norma Brasileira (NBR) 15116 (ABNT, 2004, p. 3), após o beneficiamento do RCD, os materiais produzidos podem ser divididos em duas categorias: i) agregado de resíduo de concreto (ARC) – “[...] composto na sua fração graúda, de no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas”; e ii) agregado de resíduo misto (ARM) – “[...] composto em sua fração graúda com menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas”. O ARC deve ser utilizado para a produção de concreto ou pavimentos de alto desempenho, enquanto o ARM, pode ser utilizado em pavimentos e estruturas de concreto de: pouca resistência, pequenas dimensões ou baixo risco (CARDOSO *et al.*, 2016).

Entretanto, alguns autores (SILVA; BRITO; DHIR, 2014; CARDOSO *et al.*, 2016) apresentam outras três possíveis classificações, também relacionadas a sua composição (em massa): i) agregados reciclados de alvenaria (ARA) – mínimo de 90% de fragmentos de materiais cerâmicos; ii) agregados de pavimento recuperado (APR) – mínimo de 90% de materiais derivados do asfalto; e iii) agregados de resíduos de construção e demolição reciclado (RCD-R) – composição que difere de todas as composições supracitadas.

Neste item serão apresentados dados de geração de resíduos de construção e demolição (RCD) no Brasil e na cidade de Goiânia–GO, seus impactos ambientais, suas possíveis formas de gestão, destacando a reciclagem, seguida das características do material reciclado – o RCD-R – e suas possíveis aplicações.

2.1.1 Resíduos de construção e demolição (RCD)

A Resolução 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002, p. 1) define os resíduos de construção e demolição (RCD) como sendo os 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”.

Observa-se que a falta de efetividade das políticas públicas e a negligência dos geradores quanto ao manejo e destinação dos RCD levam a uma série de impactos ambientais negativos, podendo-se destacar: i) degradação de áreas de manancial e de proteção ambiental, ii) proliferação de agentes transmissores de doenças, iii) obstrução dos sistemas de drenagem, iv) ocupação de vias e logradouros públicos, e v) degradação da paisagem urbana, conforme apresentado por Schneider (2003).

Além disso, a deposição de maneira incorreta e a falta de uma consciência ambiental agravam a problemática ambiental, uma vez que proporcionam o depósito de outros tipos de resíduos no mesmo local (KARTAM *et al.*, 2004; ESIN; COSGUN, 2007). Embora existam esforços dos geradores para depositar os resíduos em caçambas, observa-se a ocorrência da sua contaminação devido ao lançamento de outros materiais pela população (Figura 2.1).

Como os resíduos da indústria da construção são gerados durante o ciclo de vida das construções – englobando as fases de construção, manutenção e demolição, constata-se que os materiais que compõem os RCD apresentam grande variabilidade e heterogeneidade. Santos (2007) justifica essa característica como o resultado, entre outros fatores, da execução simultânea de atividades que envolvem materiais de diferentes naturezas a fim de atender ao cronograma do empreendimento, possibilitando a ocorrência de componentes orgânicos e inorgânicos em sua composição. Portanto, constata-se a importância da realização de uma

separação inicial de resíduos no canteiro de obras e o envio dos resíduos Classe A às usinas de reciclagem.

Figura 2.1 – Caçambas com RCD contaminados por outros materiais (Fonte: O autor).



A heterogeneidade dos RCD e a falta de informações acerca das características dos materiais e suas propriedades de lixiviação comprometem a avaliação das consequências ambientais de sua utilização, haja vista que os lixiviados podem transportar contaminantes ao subsolo e ao lençol freático. Desse modo, determinar teores limitantes de lixiviados torna-se benéfico, pois promove: i) a produção de agregados reciclados de melhor qualidade, ii) a preservação do meio ambiente, iii) a proteção da saúde do homem e iv) a prevenção de complicações posteriores advindas de sua aplicação (BUTERA; CHRISTENSEN; ASTRUP, 2014; 2015; SILVA; BRITO; DHIR, 2014). Nesse contexto, os países europeus estabeleceram limites de concentração de componentes oriundos de lixiviação, como apresentado na Tabela 2.1 (VIEIRA; PEREIRA, 2015a; 2016).

Nesse cenário, Silva, Brito e Dhir (2014) ressaltam ações prejudiciais de alguns lixiviados, como: i) os sulfatos solúveis em água, que são potencialmente reativos e originam reações expansivas; ii) os cloretos, que podem contribuir para a deterioração de ferragens de concreto armado; iii) os álcalis e iv) a sílica, que pode levar à reação expansiva alcalina-sílica.

Devido às problemáticas ambientais relacionadas aos RCD, viu-se a necessidade de estabelecer procedimentos para o seu gerenciamento. Nos últimos anos, houve um elevado crescimento de medidas para gerir os resíduos e as atividades relacionadas ao crescimento sustentável (TAM, 2008). Peng, Scorpio e Kitbert (1997) apresentam uma hierarquia de

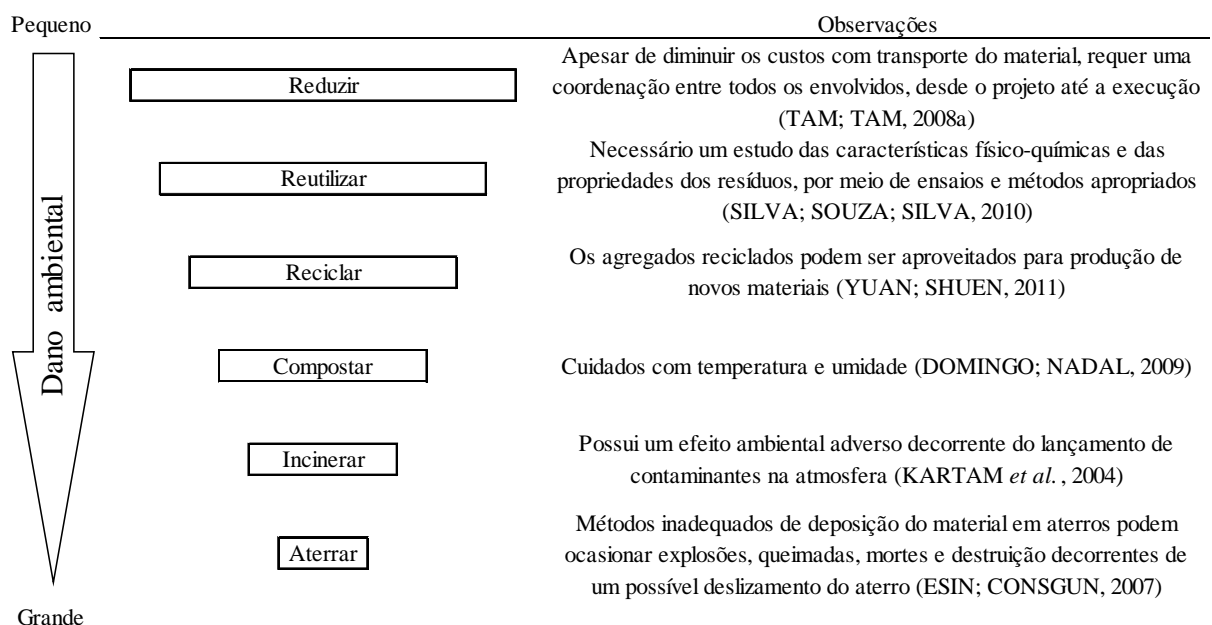
opções para o gerenciamento dos RCD, conforme apresentado na Figura 2.2. A estratégia de reduzir, reutilizar e reciclar – conhecida como 3R's – tem sido o princípio básico para gestão desses resíduos. No entanto, deve-se destacar que cada estratégia de gestão possui seus limitantes (Figura 2.2).

Tabela 2.1 – Componentes de lixiviados em RCD-R – modificada pelo autor (VIEIRA; PEREIRA, 2015a; 2016).

Componentes	Vieira e Pereira (2015a)	Vieira e Pereira (2016)	Critério aceitável para aterro inerte (norma europeia)
	Concentração (mg/kg)		
Arsênio	0,013	0,020	0,5
Chumbo	<0,01	<0,01	0,5
Cádmio	<0,003	<0,003	0,04
Cromo	<0,01	0,015	0,5
Cobre	0,029	0,12	2
Níquel	0,01	<0,01	0,4
Mercurio	<0,002	0,002	0,01
Zinco	<0,1	<0,1	4
Bário	0,069	0,12	20
Molibdênio	0,036	0,027	0,5
Antimônio	0,011	<0,01	0,06
Selênio	<0,02	<0,02	0,1
Cloreto	19	130	800
Fluoreto	<1,5	2,7	10
Sulfato	2100	1900	1000*
Carvão orgânico dissolvido	25	47	500
Sólidos dissolvidos	3030	2630	4000

* Se o limite não for atendido ele ainda pode ser considerado aceito se o lixiviado não ultrapassar 6000 mg/kg sob uma razão líquido sólido (L/S) de 10 l/kg.

Figura 2.2 – Hierarquia de ações para o gerenciamento dos resíduos de construção e demolição – modificada pelo autor (PENG; SCORPIO; KITBERT, 1997).



Porém, a eficácia da gestão dos RCD é limitada pelos fatores envolvidos, onde, por um lado, as autoridades, as organizações não governamentais (ONG) e o público geral preocupam-se mais em minimizar a quantidade de resíduos depositados em aterros; enquanto que os clientes, as empresas principais e as subcontratadas interessam-se mais no benefício e lucros decorrentes da gestão dos RCD, não considerando os problemas ambientais causados por sua geração e deposição (YUAN; SHEN, 2011).

Tratando da reciclagem, observa-se que o fator custo do processo de gestão (o que inclui coleta, transporte, triagem, transformação e deposição) sobrepõe-se ao fator ambiental, o que estabelece a principal barreira para a implementação de uma gestão ambiental completa. (KARTAM *et al.*, 2004; TAM; TAM, 2006).

Atualmente, observa-se que, devido aos diferentes meios e tecnologias de beneficiamentos dos RCD, é possível gerar diferentes produtos. A Tabela 2.2 apresenta algumas dessas tecnologias e os respectivos produtos produzidos para alguns componentes do RCD (TAM; TAM, 2006).

Tabela 2.2 – Tecnologias de reciclagem e RCD-R produzidos – modificada pelo autor (TAM; TAM, 2006).

RCD	Tecnologia de Reciclagem	Produto da reciclagem
Concreto	Britagem	Agregado reciclado Substituição de cimento Proteção de diques Material de preenchimento
Tijolo	Britagem	Material de preenchimento Material de enchimento impermeável e resistente
Alvenaria	Britagem Queimas a cinzas (900°C)	Concreto isolante térmico Tijolo tradicional de argila Tijolo de silicato de sódio
Madeira	Reuso direto (corte) Moldagem de lascas de madeira por pressurização na presença de vapor e água	Madeira inteira Móveis e equipamentos de cozinha Painel à base de madeira Madeira plástica Geofibra Placa de isolamento
Asfalto	Reciclagem a frio Geração de calor Processos de tambor paralelo Tambor alongado Microondas Regeneração superficial	Asfalto reciclado Agregado de asfalto

Esin e Cosgun (2007) e Kartam *et al.* (2004) concluíram que, para viabilizar a implementação de uma gestão do RCD que conduza à benefícios ambientais e econômicos, devem ser estabelecidos programas e normalizações regionais e nacionais sobre: i) a redução dos volumes, ii) a geração, iii) sua reutilização, iv) sua reciclagem e v) sua deposição correta.

2.1.2 Geração e reciclagem dos resíduos de construção e demolição (RCD) no Brasil

No que tange os RCD no Brasil, estudos realizados com intuito de estimar a geração de RCD revelaram que são produzidos entre 50 e 150 kg/m² construído, uma variação que esta atribuída às diferenças no controle de produção realizado em cada canteiro de obra (ANGULO; TEIXEIRA; CASTRO, 2011).

A Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON) estimou a geração de RCD brasileira em cerca de 84,2 milhões de metros cúbicos por ano (ABRECON, 2015). Um estudo da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) revelou que, em 2014, ocorreu um aumento de 4,1% na quantidade de RCD coletada em relação ao ano anterior, totalizando 44,625 milhões de toneladas (Tabela 2.3). De posse desses dados, observa-se que a quantidade de RCD coletada em 2014 correspondeu a apenas 39,3 % do RCD gerado; portanto, mais da metade do RCD gerado (cerca de 69 milhões de toneladas) não é coletada ou é depositada de maneira incorreta.

Tabela 2.3 – Coleta de RCD por região nos anos de 2013 e 2014 – modificada pelo autor (ABRELPE, 2015).

Região	2013		2014	
	RCD coletado (x1000 t)	%	RCD coletado (x1000 t)	%
Norte	1.562	3,6	1.657	3,7
Nordeste	8.089	18,9	8.784	19,7
Centro-Oeste	5.905	13,8	4.991	11,2
Sudeste	22.433	52,3	23.166	51,9
Sul	5.864	13,7	6.027	13,5
Brasil	42.863	100	44.625	100

Quanto à estratégia de reciclagem no Brasil, a ABRECON (2015) coletou dados para a pesquisa setorial relativa à reciclagem dos RCD entre junho de 2014 e setembro de 2015. Os resultados encontrados foram referentes aos dados fornecidos por um total de 105 usinas de reciclagem que responderam ao questionário. No entanto, a própria associação estima que

existem mais de 310 usinas em todo o país, sendo a maior parte pertencente à iniciativa privada.

A Figura 2.3a mostra a evolução da quantidade de usinas de reciclagem. Evidencia-se que, após o ano de 2006, houve um expressivo crescimento de usinas instaladas, o que pode ser justificado pela publicação da Resolução 307 do CONAMA (2002). Segundo a ABRECON (2015), aproximadamente 582,5 mil toneladas de agregados reciclados são produzidas por mês, porém a capacidade máxima instalada é de 1,3 milhões de toneladas. Esse cenário pode ser justificado pela falta de políticas públicas que incentivem o uso de agregados reciclados.

A Figura 2.3b mostra a relação das usinas de reciclagem com a caracterização tecnológica dos seus produtos. Verifica-se que 23% das empresas não realizaram ensaios, e que somente 5% o fazem diariamente. Vale ressaltar que a caracterização tecnológica dos materiais produzidos trata-se de uma medida fundamental para: i) garantir a sua qualidade, ii) atender às exigências dos consumidores e iii) informar as suas propriedades. Portanto, a falta deste procedimento revela pouca preocupação das empresas com a valorização dos seus produtos. Quanto aos consumidores de agregados reciclados, a Figura 2.3c revela certo equilíbrio entre as construtoras, os órgãos públicos e as pessoas físicas, com o primeiro sendo um maior consumidor.

A Figura 2.4 exhibe o crescimento de publicações decorrentes de estudos científicos sobre RCD ou RCD-R entre os anos de 1997 e 2012. Da mesma forma como foi evidenciado na Figura 2.3a, pode-se também observar na Figura 2.4 o efeito da publicação da Resolução 307 do CONAMA (2002), sendo agora no número de publicações. Esse fato demonstra que a comunidade científica brasileira tem se esforçado para promover soluções para a problemática dos RCD (SILVA FILHO; SANTOS, 2014).

Mediante ao cenário apresentado, é perceptível que a estratégia da reciclagem dos RCD no Brasil está em processo de evolução, porém possui empecilhos como: i) a inexistência de legislação que incentive o consumo, ii) elevada carga tributária e iii) falta de conhecimento do mercado (ABRECON, 2015), ou seja, evidencia-se a falta de políticas públicas que incentivem a reciclagem.

Figura 2.3 – Usinas de reciclagem no Brasil: (a) evolução da quantidade de usinas, (b) relação com ensaios técnicos dos produtos produzidos e (c) principais categorias de clientes/compradores – modificada pelo autor (ABRECON, 2015).

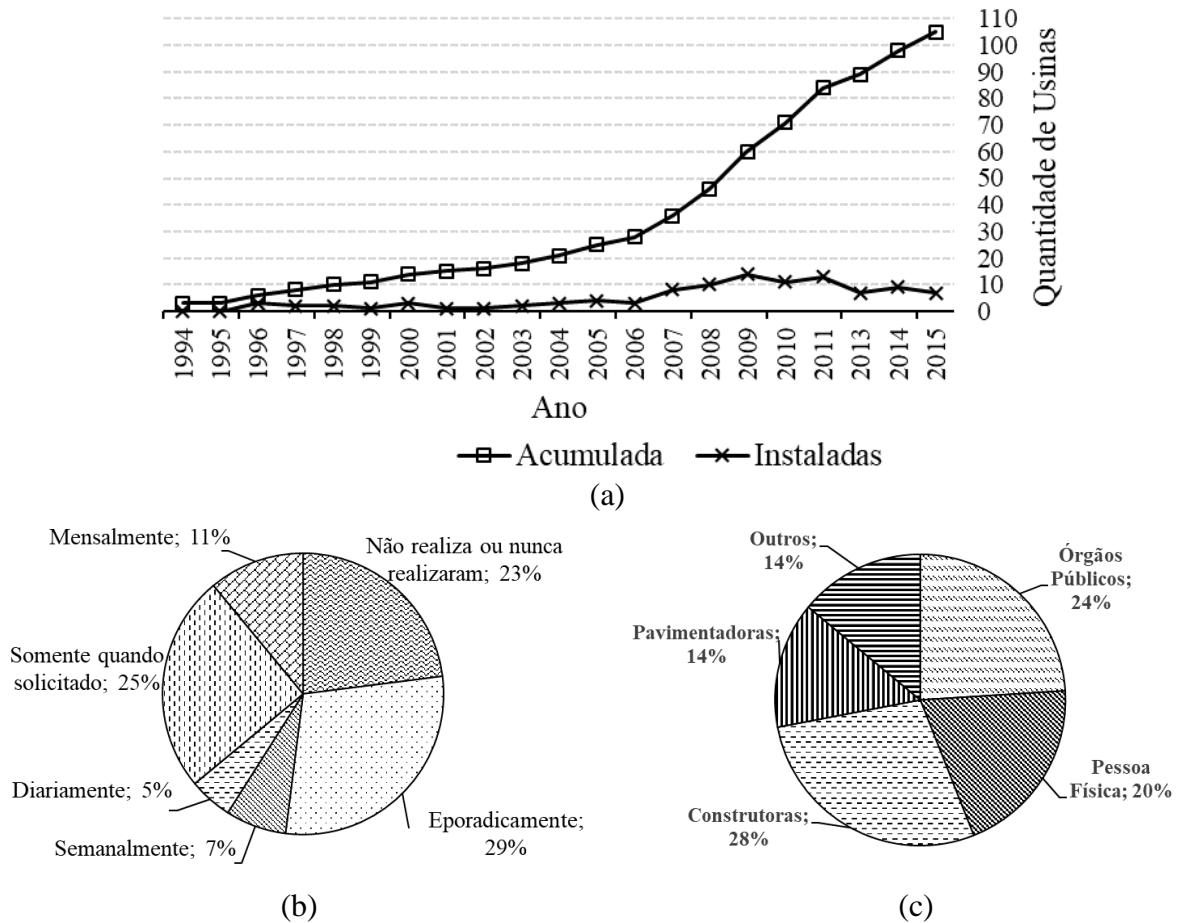
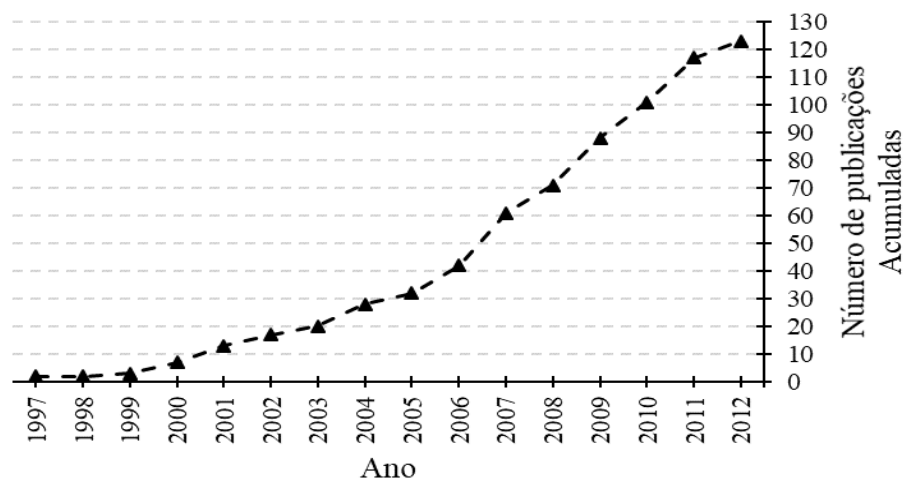


Figura 2.4 – Acúmulo de publicações relativas à RCD ou RCD-R – modificada pelo autor (SILVA FILHO; SANTOS, 2014).



2.1.3 Geração e reciclagem dos resíduos de construção e demolição (RCD) em Goiânia–GO

Quanto à geração de RCD na capital do estado de Goiás, a Secretaria de Meio Ambiente, Recursos Hídricos, Infraestrutura, Cidades e Assuntos Metropolitanos (SECIMA) estima que 1,11 milhões de toneladas são geradas anualmente (SECIMA, 2015), enquanto o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) calcula que esse valor é na ordem de 320 mil toneladas por ano (GOIÂNIA, 2016). Silva, Souza e Silva (2010), estimaram uma geração em torno de 45 mil toneladas por mês¹. Adotando geração média da região centro-oeste de 0,882 kg/habitante/dia (ABRELPE, 2016) e população goiana de 1.412.364 (SNSA, 2016), o valor gerado² é aproximadamente 455 mil toneladas por ano. Diante disso, percebe-se que as informações relativas à geração de RCD em Goiânia–GO são bastante divergentes.

Segundo a Lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010), a coleta e tratamento de resíduos sólidos urbanos são de responsabilidade dos municípios. Deste modo, a Prefeitura de Goiânia–GO, por meio da Companhia de Urbanização de Goiânia (COMURG), além de recolher os resíduos sólidos urbanos convencionais (matéria orgânica, plástico, vidro, metais, papelão, dentro outros), recolhe 30% do RCD gerado. Vale ressaltar que os grandes geradores de RCD são responsáveis pela triagem, transporte e deposição de seus resíduos gerados. Quanto aos pequenos geradores de RCD, a COMURG oferece a coleta de material com volume até 2 m³ por meio de agendamento de ordem de serviço via telefone (SILVA; MALHEIROS; CAMPOS, 2013).

A Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA, 2016; 2017) estimou que 318.977 toneladas de RCD foram destinadas ao aterro sanitário da cidade em 2014, prática proibida pela Resolução 307 do CONAMA (2002). Esse dado reflete uma deposição inadequada dos RCD na cidade, o que agravam os impactos causados, visto que a evolução da construção civil na região de Goiânia–GO ocorre em maior taxa em relação ao desenvolvimento de estratégias e soluções para lidar com os resíduos gerados (SILVA; MALHEIROS; CAMPOS, 2013).

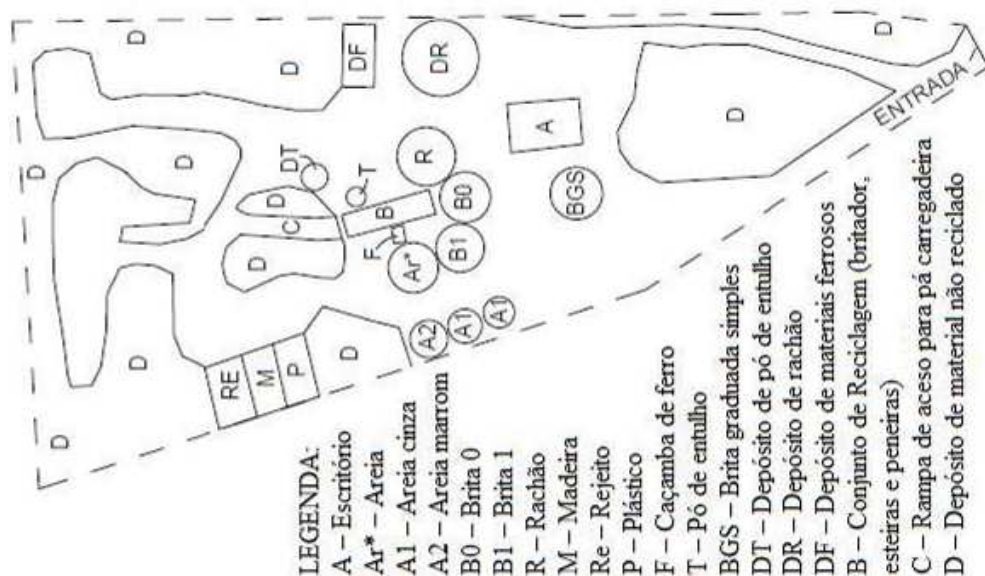
¹ Os autores não informaram a metodologia adotada.

² O valor gerado real em Goiânia–GO pode apresentar-se distinto do informado, uma vez que se utilizou uma taxa de geração regional.

Segundo o Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos (IBAM, 2001, p. 9), os resíduos passíveis de reciclagem, o que inclui o RCD, “[...] devem ser separados na fonte de produção pelos respectivos geradores [...]”, com o intuito de integrar essa parte à gestão de todo o sistema. Os resíduos que não podem ser reciclados no canteiro de obra devem possuir destinação correta, não podendo, conforme a Resolução 448 (CONAMA, 2012, p. 4), “[...] ser dispostos em aterros de resíduos sólidos urbanos, em áreas de bota fora, em encostas, corpos d’água, lotes vagos e em áreas protegidas por lei”. Essas considerações estão presentes no PMGIRS (GOIÂNIA, 2016).

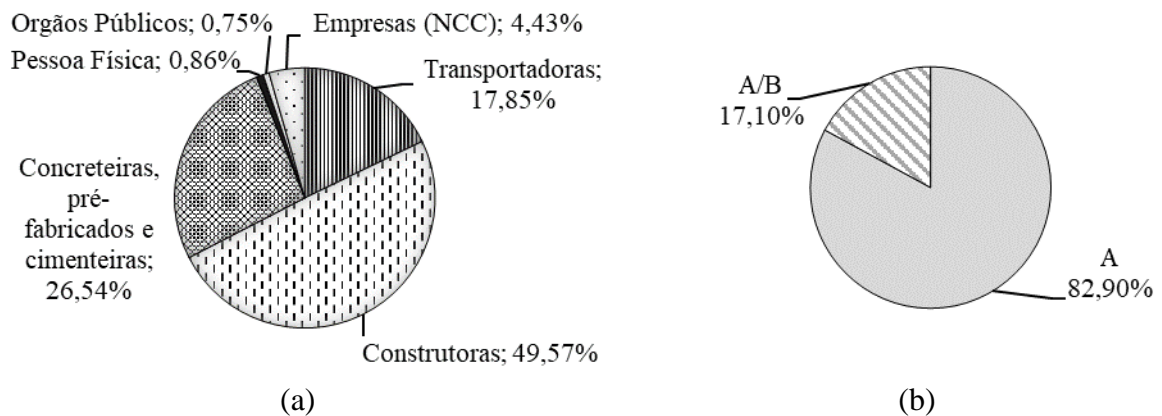
Nesse cenário, o PMGIRS (GOIÂNIA, 2016) estipulou várias metas a serem atingidas relativas à gestão dos RCD na cidade. Em dezembro de 2011, com o início de operação de uma usina de reciclagem privada em Aparecida de Goiânia–GO, foi dado um importante passo na gestão desse resíduo na região. A usina possui um britador de mandíbula do tipo fixo em uma área de 19.000 m², distribuída conforme a Figura 2.5.

Figura 2.5 – Croqui da disposição da área da empresa (FLEURY; SIQUEIRA NETO; SANTOS, 2017).



Segundo a empresa, 99% dos resíduos recebidos são oriundos da região metropolitana de Goiânia–GO; e cerca de 50% são enviados pelas construtoras (obras ou empreendimentos) da cidade (Figura 2.6a). Estima-se que a maior parcela do material recebido passa por um processo de triagem prévia, pois não possuem impurezas (Figura 2.6b), o que demonstra preocupação dos próprios geradores com o destino do resíduo (FLEURY; SIQUEIRA NETO; SANTOS, 2017).

Figura 2.6 – Dados sobre recebimento de material: (a) participação dos tipos de geradores e (b) categoria de RCD recebidos pela usina – tipo de RCD – modificada pelo autor (FLEURY; SIQUEIRA NETO; SANTOS, 2017).



Onde: A = são resíduos sem contaminantes; e A/B = resíduos com contaminantes abaixo de 20%.

Após o beneficiamento do RCD, a empresa classifica os agregados reciclados em cinco categorias:

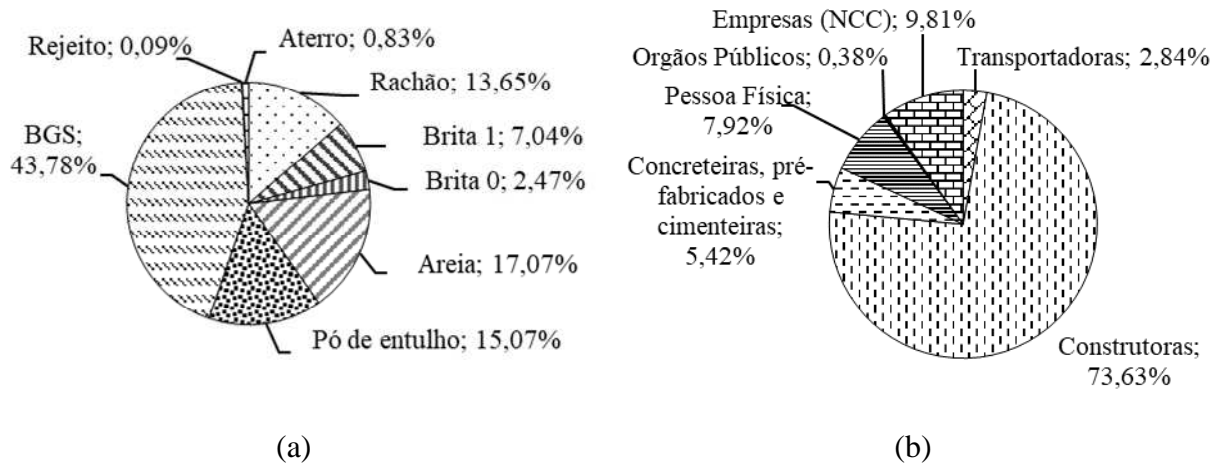
- ◆ rachão: com diâmetro das partículas (D) superiores a 19 mm ($D > 19$ mm);
- ◆ brita 1: $19 \text{ mm} < D < 9,5$ mm;
- ◆ brita 0: $9,5 \text{ mm} < D < 4,8$ mm;
- ◆ areia: $D < 4,8$ mm; e
- ◆ pó de entulho: material fino, principalmente constituído por solo.

A Figura 2.7a, ilustra a demanda dos produtos produzidos pela empresa. Constata-se que a brita graduada simples (BGS) é o material com maior demanda, o que pode ser justificado pela versatilidade do produto. Esse agregado reciclado é constituído por 25% de rachão, 25% de brita 1, 25% de brita zero e 25% de areia. É interessante destacar que as construtoras e indústrias (fabricantes de pré-fabricado e concreteiras) são as categorias que mais retiram RCD-R da empresa (Figura 2.7b), o que demonstra o potencial da indústria da construção civil em utilizar agregados reciclados como matéria prima.

Além da reciclagem realizada pela usina supracitada, uma construtora goiana recicla os RCD gerados de suas obras/empreendimentos por meio de uma mini usina de reciclagem dentro do próprio canteiro. Com esse procedimento os resíduos (oriundos de canaletas, blocos, concretos, pedras e argamassas) são transformados em matéria prima de revestimentos, contrapisos e blocos de concreto (PE & GN, 2012). No entanto, essa não é uma pratica

comum em cidades (BRITO; PEREIRA; CORREIA, 2015), e poderia ser divulgada com intuito de aprimorar a gestão do RCD em Goiânia–GO.

Figura 2.7 – Dados sobre saída de material: percentuais (a) dos produtos produzidos e (b) contribuição das categorias, em volume – modificada pelo autor (FLEURY; SIQUEIRA NETO; SANTOS, 2017).



Diante do cenário apresentado, constata-se a necessidade de mais ações para gestão do RCD na cidade e promoção dos agregados reciclados. Com uma geração anual total de 1,11 milhões de toneladas (SECIMA, 2015), o recebimento de 319 mil toneladas pelo aterro (SNSA, 2016) e de 25,7 mil toneladas destinadas para a usina de reciclagem, é possível afirmar que não se tem conhecimento da destinação de 765 mil toneladas de RCD em Goiânia–GO.

2.1.4 Características, propriedades geotécnicas e aplicação do RCD-R

As questões relacionadas com os agregados reciclados não são somente ligadas aos aspectos ambientais, mas também às propriedades mecânicas que controlam a sua rigidez e a resistência à deformação permanente (NIEKERK; MOLENAAR; HOUBEN, 2002). Na maioria dos estudos, são avaliadas a durabilidade e as medidas da variação da resistência em função de sua composição. Dessa forma, as propriedades físicas dos agregados reciclados dependem principalmente de sua composição (OSSA; GARCÍA; BOTERO, 2016), ou seja, as propriedades pertencentes ao RCD gerado são determinantes nas propriedades do material reciclado (SILVA; SOUZA; SILVA, 2010).

Considerando o RCD-R como um agregado para concreto ou argamassa, verifica-se que diversos estudos já foram elaborados com outros tipos de materiais beneficiados: i) agregado

reciclado de concreto (ARC), ii) agregados de resíduo mistos (ARM), iii) agregados reciclados de alvenaria (ARA) e iv) agregados de pavimento recuperado (APR). Dessa forma, torna-se relevante considerar que, quando um RCD-R apresenta maior quantidade de fragmentos derivados de cimento Portland, suas características tendem a se assemelhar aos agregados reciclados de concreto (ARC), e, quando apresentam maior quantidade de materiais cerâmicos, suas características se assemelham aos agregados reciclados de alvenaria (ARA). Isso pode contribuir para uma grande diversidade de características entre os materiais reciclados.

Observa-se que, ao se elevar o teor de materiais derivados do cimento Portland na composição do RCD-R, o comportamento mecânico do agregado reciclado é beneficiado; porém, caso ocorra incorporação de materiais cerâmicos ou asfálticos, observa-se uma diminuição do mesmo comportamento. Esses resultados são justificados principalmente pela porosidade das partículas constituintes do RCD-R, haja vista a maior quantidade de poros confere menor densidade, resistência à fragmentação e capacidade de carga (NAGATAKI *et al.*, 2004; BRITO; PEREIRA; CORREIA, 2005; SILVA; BRITO; DHIR, 2014). A baixa quantidade de poros também se torna um problema, pois diminui a permeabilidade. Quando esse parâmetro é baixo, torna-se possível a retenção de água, que, sob cargas cíclicas, desenvolve poro pressões desencadeando uma diminuição da resistência, rigidez e durabilidade do agregado RCD-R (POON; CHAN, 2006; TAHERKHANI, 2015; CARDOSO *et al.*, 2016).

Silva, Brito e Dhir (2014) retratam que, quanto maior a resistência inicial das partículas derivadas de cimento Portland, melhor é o comportamento mecânico (incluindo o módulo resiliente), o que pode ser justificado pela menor densidade e pelas reações pozolânicas entre as partículas de cimento e os demais agregados reciclados. Ademais, os autores salientam que o principal fator que afeta o desempenho mecânico do agregado reciclado é a quantidade de argamassa aderida, pois esse material possui grande quantidade de poros.

Analisando a viabilidade do uso de agregado reciclado em estradas, Herrador *et al.* (2012) observaram que a capacidade de carga do RCD-R é considerada satisfatória e se eleva com a construção de mais camadas do mesmo material. Poon e Chan (2006) revelaram que o aumento do teor de agregados cerâmicos na composição do RCD-R diminui a interligação entre as demais partículas do agregado, conduzindo a um Índice de Suporte Califórnia (ISC) mais baixo. Contudo, Brito, Pereira e Correia (2005) e Leite *et al.* (2011) afirmaram que a

principal influência que esse material gera no RCD-R é a maior absorção de água, doze vezes superior aos fragmentos de cimento Portland reciclado, causando assim, queda da resistência mecânica do material beneficiado.

Taherkhani (2015) ressaltou que, quanto o teor de concreto asfáltico reciclado no RCD-R aumenta maior controle é necessário na operação de compactação desses agregados, pois a mistura torna-se sensível ao grau de compactação. Além disso, Cardoso *et al.* (2016) observaram que o aumento desse material na composição do RCD-R tende a diminuir a sua permeabilidade devido à presença de betumes impermeáveis, que podem agir de forma isolada ou em contato com outros agregados no processo de impermeabilização.

Quanto à compactação, Herrador *et al.* (2012) avaliaram que para atingir o grau necessário de compactação, foi necessário maior teor de umidade em relação ao solo natural, o que dificulta o processo executivo – esse fator ainda se agrava em decorrência da necessidade de maior quantidade de água para espalhar o material no campo. Os ensaios realizados por Leite *et al.* (2011) revelaram que a quebra das partículas é proporcional ao grau de compactação e que o aumento da energia utilizada na compactação implica em maior capacidade de carga (ISC) e resistência a deformação permanente do agregado RCD-R.

Silva, Brito e Dhir (2014) salientaram que: i) a maior presença de fragmentos de cimento Portland condiciona a uma densidade seca máxima maior, ii) o aumento do teor de material cerâmicos tende a elevar o valor da umidade ótima e iii) o incremento do teor de materiais asfálticos ou betume tende a reduzir o valor da umidade ótima.

Nagataki *et al.* (2004) e Brito, Pereira e Correia (2005) evidenciaram que as propriedades dos agregados reciclados são influenciadas pelo processo/técnica de reciclagem adotada. Caso este ocorra em somente um processo, verifica-se que: i) a maior proporção dos produtos beneficiados possui dimensões superiores a 40 mm, ii) os materiais cerâmicos tendem a apresentar formatos mais pontiagudos e alongados, e iii) os fragmentos de concreto Portland apresentam maior diâmetro e lascas. Quando ocorre um segundo procedimento, observa-se que: i) os agregados tendem a ser mais arredondados e menos afiados – com o britador de mandíbula; ou ii) possuem melhor distribuição granulométrica e baixa quantidade de lascas – com britador de impacto. Entretanto, Santos, Vilar e Palmeira (2010), analisando as características geotécnicas de RCD-R em duas unidades de beneficiamento diferentes,

concluíram que o processo de reciclagem não influencia de forma significativa nas características geotécnicas.

Mais recentemente, observa-se um interesse da comunidade científica acerca do uso dos RCD-R em obras geotécnicas, e, assim, as propriedades geotécnicas destes materiais passaram a ser mais avaliadas pela literatura (Tabela 2.4).

Tabela 2.4 – Propriedades geotécnicas de RCD-R.

Referência	γ (kN/m ³)	SUCS / TRB (1) (2)	C _{NU} / C _c (3) (4)	IP ⁽⁵⁾	$\gamma_{d,máx}$ ⁽⁶⁾ (kN/m ³)	W _{ótima} ⁽⁷⁾ (%)	ISC ⁽⁸⁾ (%)
Motta (2005)	-	-	-	-	18,30 ^(d)	11,0	75
Santos (2007)	28,19	-	-	NP ^(a)	18,44 ^(b)	14,9	60
Santos, Vilar,	27,30	-	-	NP ^(a)	18,20	16,2	-
Palmeira (2010)	27,40	-	-	7	16,90	18,0	-
Santos (2011)	27,30	-	-	NP ^(a)	19,30 ^(b)	13,7	-
Dias (2014)	-	SC / A-4	-	-	17,60 ^(b)	18,0	-
Souza (2015)	24,40	-	37,00 / 3,00	NP ^(a)	18,10 ^(c)	11,0	163
Santos Neto (2015)	26,04	SW / A-1-b SP / A-1-a	11,54 / 1,23 4,19 / 0,74	NP ^(a)	- 13,39 ^(b)	- 19,7	-
Macedo (2016)	26,20	SP / A-1-a	3,82 / 0,81	NP ^(a)	19,10 ^(b)	13,4	-
Barbosa (2017)	26,41	SM / A-1-b	38,86 / 1,73	-	18,55 ^(b)	12,6	25
Araújo Neto (2017)	26,45	SW / -	-	NP ^(a)	17,61 ^(b)	15,5	-
Almeida (2017)	-	SF / A-2-4 GP / A-1-a	126,43 / 7,48 14,12 / 3,95	NP ^(a)	16,90 ^(b) 19,60 ^(b)	14,8 12,3	13 60

⁽¹⁾ Sistema Unificado de Classificação de Solos

⁽²⁾ Sistema Rodoviário de Classificação – *Transportation Research Board* (TRB)

⁽³⁾ Coeficiente de não uniformidade

⁽⁴⁾ Coeficiente de curvatura

⁽⁵⁾ Índice de plasticidade

⁽⁶⁾ Peso específico seco máximo

⁽⁷⁾ Umidade ótima

⁽⁸⁾ Índice de Suporte Califórnia

^(a) Não plástico

^(b) Energia Proctor Normal

^(c) Energia Proctor Modificada

^(d) Energia não informada

A partir dos dados apresentados na Tabela 2.4, verifica-se que o peso específico (γ) das partículas passantes na peneira de 4,8 mm apresenta pequena variação (coeficiente de variação – CV – igual a 3,86%) e média de 26,63 kN/m³, o que demonstra que a parte fina do RCD-R apresenta características semelhantes às de solos. Desse modo, em virtude da ρ do solo da cidade de Goiânia–GO se situar entre 26,71 e 31,09 kN/m³ (LUIZ, 2012), pode-se esperar que o peso específico do RCD-R produzido pela usina de reciclagem a partir do RCD da cidade possua um valor dentro do intervalo apresentado. Os valores de peso específico de agregados reciclados oriundos de Goiânia–GO encontrados por Ribeiro (2016) igual a 26,98 kN/m³, e Resplandes (2007) igual a 27,1 a 27,7 kN/m³ confirmam essa afirmação.

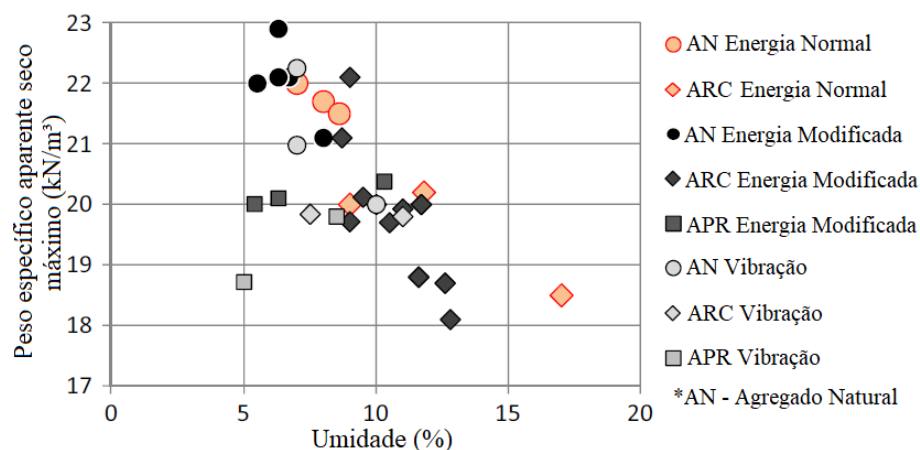
A investigação da utilização do RCD-R em pavimentação revela que as granulometrias dos materiais apresentados na Tabela 2.4 são constituídas de materiais pedregulhosos ou arenosos,

com coeficientes de não uniformidade (C_{NU}) variados. Também se observa que os agregados reciclados estudados não apresentam índice de plasticidade (IP), o que contribui para sua aplicação em outros tipos de obras geotécnicas.

Quanto à compactação, tendo como enfoque a distribuição granulométrica dos RCD-R, Santos e Vilar (2008) observaram que não houve alteração significativa e explicam que, após o processo de produção dos agregados reciclados, que envolve a quebra das partículas, o material beneficiado pode apresentar uma resistência à energia Proctor normal nos ensaios de compactação. Contudo, maiores variações são observadas (Tabela 2.4) em relação à densidade máxima aparente seca ($CV = 8,48\%$) e à umidade ótima ($CV = 17,90\%$). Porém, o índice de suporte Califórnia mostrou ser o mais afetado pela compactação, com $CV = 73,3\%$.

Cardoso *et al.* (2016) analisou resultados de compactação de diversos autores da literatura e observou que as compactações com energia Proctor normal e modificado apresentam resultados de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima com dispersões semelhantes (Figura 2.8). Contudo os autores salientam que a compactação por vibração tende a diminuir o peso específico aparente seco, pois a incidência de quebra de agregados é inferior em relação à compactação por impacto.

Figura 2.8 – Dispersão dos resultados de compactação – modificada pelo autor (CARDOSO *et al.*, 2016).



Quanto à composição, verifica-se que os agregados reciclados são constituídos, principalmente, por derivados de cimento Portland, solo (partículas finas menores que 4,8 mm) e materiais cerâmicos – estes materiais constituem mais de 70% dos RCD-R analisados pelos autores da Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Composição de RCD-R.

Referência	Solo (passante na 4,8mm)	Derivados de cimento Portland	Cerâmica	Cerâmica polida	Rocha alterada ou pedras	Outros
Angulo (2000)	72,00 %	-	4,00 %	-	23 %	-
Motta (2005)	26,31 %	41,87 %	4,34 %	3,42 %	23,75 %	0,31 %
Santos (2011) ¹	65,83 %	20,73 %	1,23 %	0,73 %	3,17 %	8,31 %
Souza (2015)	42,10 %	40,10 %	1,50 %	0,20 %	15,60 %	0,50 %
Santos Neto (2015)	20,14 %	35,66 %	31,16 %	-	-	13,04 %
Almeida (2017)	-	88,61%	8,48%	1,38%	-	1,53 %

¹ Média de três amostras

Alguns autores encontraram valores dos parâmetros de resistência superiores a agregados naturais e um comportamento não plástico do material (Tabela 2.6), resultados que conferem ao RCD-R características técnicas válidas para aplicação em estruturas de solo reforçado.

Tabela 2.6 – Parâmetros de resistência de RCD-R.

Referência	c (kPa) ⁽¹⁾	ϕ (°) ⁽²⁾
Santos (2007)	13	41
Santos (2011)	14	38
Dias (2014)	14	41
Melo e Santos (2014)	4	37
Melo e Santos (2016)	0	38
Araújo Neto (2017)	9	39

⁽¹⁾ Coesão

⁽²⁾ Ângulo de atrito

Além dos estudos supracitados, alguns pesquisadores realizaram estudos para avaliar a viabilidade do próprio agregado RCD-R em obras de pavimentação (LEITE *et al.*, 2011, HERRADOR *et al.*, 2012; OSSA; GARCÍA; BOTERO, 2016), e como materiais de preenchimento (SANTOS; VILLAR, 2008; SANTOS; VILAR; ASSIS, 2009; SANTOS; PALMEIRA; BATHURST, 2010; 2013; 2014).

Ossa, García, Botero (2016) concluíram que quanto maior a utilização de RCD-R em misturas asfálticas, maior é a resistência à deformação permanente da superfície do asfalto e justificam essa melhoria no comportamento devido à ativação das partículas de cimento desidratadas, que provocam aumento na resistência ao cisalhamento do material.

Santos, Palmeira e Bathurst (2010) por meio da instrumentação de uma estrutura de solo reforçado composta por RCD-R e geossintéticos, concluíram que a utilização de RCD-R aparenta ser uma solução promissora, atendendo ao comportamento mecânico da estrutura, além dos requisitos econômicos e ambientais propostos pela prática moderna da engenharia civil.

Santos, Vilar e Assis (2009), realizando uma análise estatística dos parâmetros geotécnicos do RCD-R, constataram pouca variabilidade e altos valores de confiança que justificam a utilização desse material em obras geotécnicas. Porém, Santos, Vilar e Palmeira (2010) avaliaram que o ponto principal da utilização de RCD-R como material de preenchimento em ESR com geossintéticos deve ser focado também no grau de contaminação desses materiais. Rosa e Santos (2016) salientam que apesar da comprovação da aplicação de RCD-R em estruturas de solo reforçado, há poucos relatos de obras civis com RCD-R.

2.2 GEOSSINTÉTICOS

O uso de materiais como elemento de reforço de solos data de 3.000 a.C. com a utilização de materiais naturais constituídos de fibras resistentes, como estivas de junco, palhas e bambus, empregados na construção dos zigurates e na Grande Muralha da China (AGUIAR; VERTEMATTI, 2015; BUENO; LOTTI, 2015).

A partir de 1960, materiais poliméricos começaram a serem empregados na confecção de elementos sintéticos para função de reforço de solos, pertencentes a uma família de produtos chamados 'geossintéticos'. No entanto, deve destacar que mantas sintéticas já haviam sido aplicadas em obras geotécnicas atuando como um elemento de filtro (PALMEIRA; MILLIGAN, 1989; AGUIAR; VERTEMATTI, 2015).

Palmeira (1987) apresenta alguns fatores que justificam o crescimento do uso de geossintéticos em obras geotécnicas, destacando-se: i) o menor tempo e facilidade de execução, ii) a escassez de matéria prima próxima a região da obra, iii) a melhoria das características físicas e mecânicas de seus constituintes, e iv) o maior conhecimento de suas propriedades e comportamento em obras geotécnicas.

Segundo Shukla e Yin (2006), fatores atrelados às características dos materiais também contribuíram para a sua crescente e ampla aplicação: i) a não corrosão do material, ii) a resistência à degradação química e biológica relativamente alta, iii) a flexibilidade, e iv) o baixo volume e leveza. A matéria prima dos geossintéticos, na maioria dos casos, polímeros, é responsável por atribuir tais características (RAJA, 2015).

Mediante essas características, os geossintéticos podem ser classificados em oito tipologias principais: i) geotêxtis, ii) geomembranas, iii) geodrenos, iv) geocélulas, v) geogrelhas, vi) geofibras, vii) geocompostos, e viii) geotiras (AGUIAR; VERTEMATTI, 2015). A existência de vários tipos disponíveis no mercado abrange uma ampla gama de funcionalidades, destacando-se: i) separação, ii) proteção, iii) filtração, iv) drenagem, v) erosão, vi) reforço e vii) impermeabilização. A utilização de mais de um geossintético, ou mesmo a adoção de um geocomposto, possibilita atingir várias destas funcionalidades num único sistema (BUENO; LOTTI, 2015). A Tabela 2.7 sintetiza as funções dos geossintéticos nos projetos de engenharia.

Tabela 2.7 – Funções dos geossintéticos em projetos de engenharia – modificada pelo autor (BUENO; LOTTI, 2015).

Geossintético	Separação	Proteção	Filtração	Drenagem	Erosão	Reforço	Impermeabilização
Geocélula	-	X	-	-	X	X	-
Geocomposto	X	X	X	X	X	X	X
Geodreno	X	-	-	X	-	-	-
Geofibras	-	-	-	-	-	X	-
Geogrelha	-	-	-	-	-	X	-
Geomembrana	X	X	-	-	X	-	X
Geotêxtil	X	X	X	-	X	X	-
Geotira	-	-	-	-	-	X	-

2.2.1 Geogrelhas

As geogrelhas (Figura 2.9) integram um tipo de geossintético projetado usualmente com a função de reforço de solo, o que lhe é conferido por: i) suas propriedades de rigidez, ii) as temperaturas de amolecimento, iii) as aberturas entre os elementos, iv) flexibilidades e v) capacidades de suportar cargas de tração durante toda sua vida útil (DUVALL, 1994; ANTE, 2012).

As geogrelhas são classificadas conforme a orientação das resistências, variando entre unidimensional e bidimensional. Esses materiais são constituídos de fibras poliméricas e seu processo de fabricação pode ser realizado por extrusão, ligação ou entrelaçar das fibras. Os polímeros constituintes mais comuns na fabricação de geogrelhas são: i) polipropileno (PP), ii) polietileno (PE), iii) poliéster (PET) e iv) acetato de polivinila (PVA_C). Cabe ressaltar que o tipo de polímero de constituição pode definir algumas de suas propriedades, visto que as

fibras de PET são mais resistentes a danos mecânicos e outras degradações, enquanto as fibras de PP, PE e PVA_C fornecem maior rigidez à flexão (GUPTA, 2009).

Figura 2.9 – Geogrelhas com diferentes aberturas e fibras.



Durante a fabricação das geogrelhas, as fibras são usualmente revestidas em seu exterior por outros materiais poliméricos (Epóxi – EPX, pliacrilonitrila – PAN, PP, PVA_C e policloreto de vinila – PVC), que não contribuem com as propriedades mecânicas da geogrelha, porém ambos (fibra e revestimento) devem atender aos requisitos de desempenho, conforme apresentado na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Requisitos de desempenho de fibras e revestimentos das geogrelhas – modificada pelo autor (DUVALL, 1994).

Fibra	Revestimento
Suportar as cargas aplicadas; Apresentar propriedades de rigidez e resistência a curto prazo; Características de fluência e comportamento de ruptura que asseguram a integridade do elemento sob deformação excessiva das fibras.	Proteção das fibras contra as degradações; Garantir a configuração das fibras da geogrelha até o final da instalação; Conferir adesão da geogrelha ao solo a seu redor; Atentar a temperatura de transição vítrea.

Observa-se a realização de estudos relacionados à aplicação de geogrelhas na estrutura de pavimentos – sejam flexíveis ou rígidos ou estradas pavimentadas ou não pavimentadas – e em estruturas de solo reforçado com geossintéticos. Duvall (1994) já justificava essa vasta aplicação devido à abertura dos elementos da geogrelha, característica que permite maior interação com o solo envolvente.

Quanto à aplicação em pavimentação, verifica-se que geogrelhas bidirecionais podem ser introduzidas em diferentes posições: i) na interface base-subleito, ii) no meio da base (em camadas com espessura superior a 300 mm) e iii) na interface revestimento-base. Essas aplicações conferem aumento de vida útil do pavimento, melhoria em seu comportamento (deformações em geral), restringem a formação de sulcos e diminuem a quantidade de material granular necessário em suas camadas (GUPTA; 2009; ANTUNES; 2008; KOMATSU *et al.*, 1998).

Constata-se que a introdução do elemento de reforço na interface base-subleito é a configuração que mais contribui para a redução das deformações superficiais em relação à configuração com geogrelha no meio da camada da base. Já a adoção de geogrelhas na interface revestimento-base faz-se necessária para evitar reflexões de trinca de tração ocasionadas devido à ação combinada de cargas de tráfego e variação de temperatura. Observa-se que o benefício do uso de geossintéticos em estruturas de pavimentação depende de vários aspectos: i) tipo de reforço e suas propriedades, ii) resistência e rigidez do subleito, e iii) espessura e qualidade do material da base (KAKUDA; PARREIRA; FABBRI, 2011; COWELL *et al.*, 2014; GONZALEZ-TORRE *et al.*, 2014; NORAMBUENA-CONTRERAS; GONZALEZ-TORRE, 2015; NORAMBUENA-CONTRERAS *et al.*, 2016).

As estruturas de solo reforçadas (ESR) com geossintéticos estão sendo utilizadas por mais de quarenta anos como elemento de contenção (taludes artificiais, muros, contenção lateral de pontes e vias férreas batidas), assim como em seu reparo ou reconstrução. Essa técnica tornou-se bastante popular devido ao seu custo reduzido, facilidade de construção e melhor comportamento se comparada às estruturas não reforçadas. Comumente, geogrelhas unidirecionais são utilizadas para esse tipo de estrutura (HSIEH; WU, 2001; ALLEN; BATHURST; BERG, 2002; GUPTA, 2009; KOKESI, 2012; SANTOS; PALMEIRA; BATHURST, 2013; 2014).

Os estudos realizados comprovam seu desempenho quando submetidas à ataques sísmicos ou sob inundação de solo colapsível. A combinação com outros métodos de reforço (por exemplo: tratamento com cimento, escoramento e estacas pranchas) melhora ainda mais seu comportamento diante de eventos naturais. Ademais, essas estruturas permitem a utilização de materiais de preenchimento alternativos, como o RCD-R, com comportamentos satisfatórios

se comparadas às estruturas constituídas com materiais convencionais (SANTOS, 2007; SANTOS; PALMEIRA; BATHURST, 2013; KOKESI, 2012).

Frente a um cenário de vasta aplicação geotécnica de geogrelhas atendendo a requisitos técnicos e ambientais, vida útil prolongada de estruturas reforçadas e da incerteza relativa à permanência das características mecânicas ao longo do tempo, a durabilidade de geogrelhas ganhou mais atenção pela comunidade geotécnica (RICHARDSON, 1998; HUANG; CHIOU, 2006). Nessa ótica, vários estudos (BARBOSA; SILVA; SANTOS, 2016; LIM; MCCARTNEY, 2013 PINHO-LOPES; LOPES, 2014 PINHO-LOPES; PAULA; LOPES, 2018; VIEIRA; PEREIRA, 2015) foram realizados com intuito de determinar as peculiaridades relativas aos danos mecânicos causados durante a instalação das geogrelhas e a influência desse processo na durabilidade desse material de reforço.

2.2.2 Durabilidade de geogrelhas

Durabilidade pode ser entendida como o período em que o geossintético consegue manter as características e propriedades especificadas em projeto para garantir os fatores de segurança e comportamento requeridos (GREENWOOD; SCHROEDER; VOSKAMP, 2012). Segundo Cho *et al.* (2006), a maior quantidade de projetos de ESR com geogrelhas executados nos últimos anos motiva a realização de novos estudos sobre a durabilidade desse material.

Comumente na engenharia geotécnica, a resistência à tração de geogrelhas é determinada pela consideração de fatores de redução que afetam sua durabilidade. Benson, Kucukkirca e Scalia (2010, p. 537) conceituam ‘fator de redução’ como sendo “[...] o fator aplicado às propriedades de engenharia de novos geossintéticos durante seu projeto para refletir mudanças nas propriedades que ocorrem durante a vida útil do material”. Em geogrelhas, essas mudanças são causadas devido a quatro tipos de degradação ou dano, sendo eles: i) ambientais, ii) biológicos, iii) químicos e iv) mecânicos. Dessa forma, a resistência à tração de projeto (T_p) é obtida por meio da Equação 2.1 (VERTEMATTI, 2015).

$$T_p = \frac{T_u}{FR_F \cdot FR_{DI} \cdot FR_Q \cdot FR_A \cdot FI} \quad (2.1)$$

Onde:

FI	Fator de incerteza (proposto por Cho <i>et al.</i> (2006) e remete a incerteza dos demais fatores de redução adotados);
FR_A	Fator de redução relativo ao dano ambiental;
FR_{DI}	Fator de redução relativo ao dano de instalação;
FR_F	Fator de redução relativo à fluência em tração;
FR_Q	Fator de redução relativo ao dano químico;
T_u	Resistência à tração última.

A degradação ambiental decorre da quebra das ligações entre as cadeias poliméricas, provocada pela incidência de raios ultravioletas decorrentes da exposição solar (MOREIRA, 2009). Para avaliar esse dano, Yoo, Jeon e Chang (2010) fizeram ensaios expondo amostras de geogrelhas à radiação solar e concluíram que há uma perda de menos de 2,6% na resistência à tração do material. Os autores não recomendam expor o material acima de sete dias antes de sua aplicação *in situ*, uma vez que isso propicia a degradação e requer a adoção de FR_A .

Quanto à degradação biológica, Ionescu *et al.* (1982) visualizaram que os polímeros são resistentes à degradação por microrganismos. Yoo, Jeon e Chang (2010) afirmaram que a atividade biológica é baixa devido à profundidade em que as geogrelhas são implantadas, além de que os materiais de preenchimento comumente não apresentam vestígios de substâncias orgânicas.

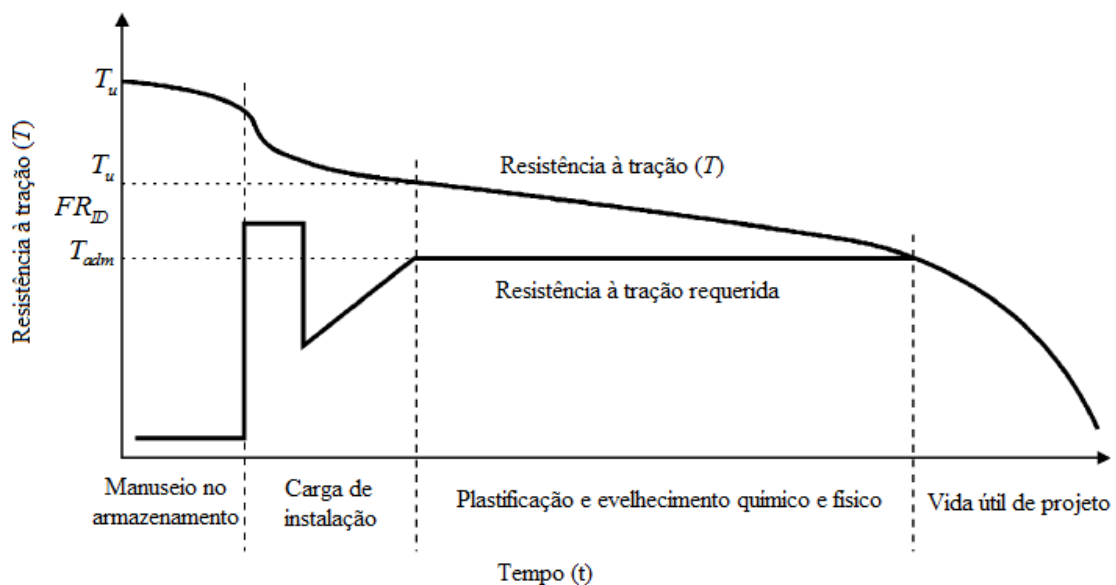
Nascimento (2002, p. 30) define que “[...] a degradação química compreende toda transformação dos polímeros constituintes dos geossintéticos mediante a ação de substâncias quimicamente ativas presentes no solo”. Moreira (2009, p. 23) explica que o oxigênio, íons metálicos, ácidos, bases, solventes e a própria água, “[...] são responsáveis por profundas alterações nas cadeias moleculares constituintes dos polímeros, como a quebra de ligações químicas e consequente diminuição do comprimento das cadeias moleculares [...]”. A utilização de geossintéticos em obras geotécnicas tem levado a novos estudos acerca do pH do material de preenchimento. A variabilidade de minerais existentes em cada solo, provoca alteração em seu pH e logo influencia na durabilidade do geossintético (VIEIRA; PEREIRA, 2015b).

O dano mecânico consiste na transformação da estrutura do geossintético resultante de esforços ocorridos durante o seu manuseio e instalação, além da temperatura, dos processos de lançamento e de compactação do material de preenchimento (NORAMBUENA-CONTRERAS *et al.*, 2016; GONZALEZ-TORRE *et al.*, 2014; ROSETE *et al.*, 2013; HUANG, 2006; HUFENUS *et al.*, 2005).

A Figura 2.10 apresenta a variação na resistência à tração com o tempo e os mecanismos atuantes durante a vida útil do geossintético. A curva superior retrata a redução de resistência devido aos esforços submetidos desde sua fabricação até o fim da vida útil. Já a curva inferior, indica o comportamento da resistência que o geossintético deve apresentar durante as fases indicadas. Com essa imagem é possível observar que os maiores esforços submetidos aos geossintéticos ocorrem durante sua instalação (HUFENUS *et al.*, 2005).

Figura 2.10 – Relação da resistência à tração do geossintético com o tempo – modificada pelo autor (CR ISO 13434, 1998

¹ *apud* HUFENUS *et al.*, 2005).

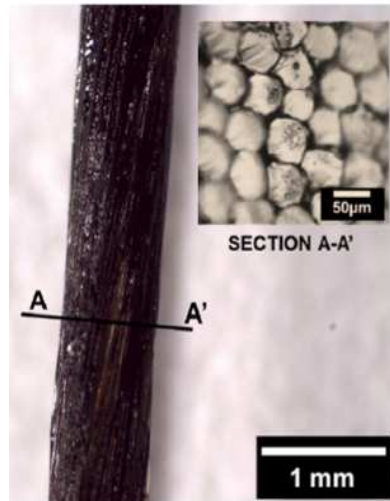


Duvall (1994) visualizou, por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), que há vazios dentro dos pacotes de fibras das geogrelhas (Figura 2.11). Caso ocorra a quebra/ruptura do revestimento, a água pode entrar nesses pacotes de fibras, expondo toda a estrutura à

¹ CR ISO 13434, 1998. Guidelines on durability of geotextiles and geotextile-related products. CEN, European Committee for Standardization.

degradação química (por exemplo, hidrólise e oxidação), diminuindo o tempo de vida potencial da geogrelha. Portanto, conclui-se que os danos mecânicos são responsáveis por expor as fibras da geogrelha, potencializando a ocorrência de outros danos, conforme também foi observado por Santos (2011).

Figura 2.11 – Vazios existentes entre as fibras de uma geogrelha – modificada pelo autor (NORAMBUENA-CONTRERAS *et al.*, 2016).



2.2.3 Danos de instalação em geogrelhas

Os danos gerados durante o processo de instalação são a maior preocupação no projeto e aplicação de geossintéticos (HUANG, 2006), pois causam mudanças imediatas em suas propriedades (ROSETE *et al.*, 2013). Desta forma, vários estudos foram publicados nas últimas décadas com o foco no dano de instalação em geossintéticos. Evidencia-se uma sequência metodológica comum a todas as publicações: i) simulação de danos de instalação, ii) execução de ensaios de tração em faixa larga de amostras virgens e danificadas, iii) análises visuais dos danos através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) ou óptica, iv) determinação dos fatores de redução relativos ao dano de instalação (FR_{DI}^T), e v) correlação dos FR_{DI}^T com as análises microscópicas.

Os processos de simulação de danos podem ser realizados em campo (grande escala) ou laboratório (pequena escala). Embora os ensaios em campo constituam a maneira mais adequada para determinar os fatores de redução, depara-se com os empecilhos relacionados à dificuldade de execução e ao longo período de ensaios. Desse modo, as análises tornam-se

mais dispendiosas e o custo-benefício gerado é reduzido, o que torna os ensaios em pequena escala mais atraentes em obras de pequeno porte. Contudo, constata-se que em situações que o material de preenchimento possui partícula de grandes dimensões (> 150 mm) é indicada a utilização de ensaios em escala real (HUANG; WANG, 2007; HUANG, 2006; HUFENUS *et al.*, 2005).

2.2.3.1 Ensaios de dano realizados em laboratório

O ensaio de laboratório para avaliação de danos é padronizado pela *International Organization for Standardization* (ISO), e recebeu em 2007 sua última atualização (ISO 10722, 2007). O ensaio busca avaliar os danos mecânicos em geossintéticos causados por materiais granulares sob carregamento cíclico e segue a seguinte metodologia: i) uma amostra de geossintético é colocada entre duas camadas de 150 mm de espessura constituída de um agregado sintético (óxido de alumínio sintetizado, $5 \text{ mm} < D < 10 \text{ mm}$; Figura 2.12a), ii) o conjunto é submetido a carregamentos cíclicos (frequência de 1,0 Hz; Figura 2.12b), iii) ao final da simulação de danos as amostras são removidas, e iv) ensaiadas à tração (Figura 2.12c). O Quadro 2.1 apresenta alguns valores dos fatores de redução devido ao dano de instalação relativos à resistência à tração de pico (FR_{DI}^T), obtidos por meio de ensaios realizados conforme a ISO 10722.

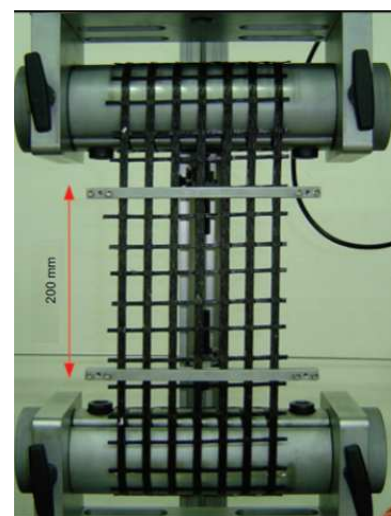
Figura 2.12 – Ensaios realizados em laboratório: a) geossintético dentro do equipamento de dano; b) pistão aplicador de carga cíclica e c) ensaio de tração em faixa larga– modificada pelo autor (HUANG; CHIOU, 2006; HUANG, 2006).



(a)



(b)



(c)

Quadro 2.1 – Fatores de redução devido a danos de instalação oriundos de ensaios de laboratório.

Referência	Geogrelhas Fibra (Rev.)	Aspectos conforme ISO 10722	Particularidades	FR_{DI}^T
Paula, Pinho-Lopes e Lopes (2004)	PET (n.i.)	Compactação ^(a) e carregamento cíclico	-	1,29
			AN ^(c)	1,11 – 1,24
	PEAD*(n.i.)		-	0,97
			AN ^(c)	1,03 – 1,08
Huang (2006)	PET (PVC)	Compactação ^(a) e carregamento cíclico	-	1,11 – 1,29
			10-13 mm ^(e)	1,08 – 1,35
			13-19 mm ^(e)	1,01 – 1,18
			19-25 mm ^(e)	1,00 – 1,22
Huang e Chiou (2006)	PVA _L ** (PP)	Compactação ^(a)	900 kPa ^(d)	1,06
			600 kPa ^(d)	1,10
			900 kPa ^(d)	1,14
			19-25 mm ^(e) e 400 kPa ^(d)	0,99
			19-25 mm ^(e) e 600 kPa ^(d)	1,01
			19-25 mm ^(e) e 900 kPa ^(d)	1,00
	PET (PVC)		900 kPa	1,03 – 1,11
			600 kPa	1,11 – 1,30
			900 kPa	1,16 – 1,37
			19-25 mm ^(e) e 400 kPa ^(d)	0,99 – 1,03
			19-25 mm ^(e) e 600 kPa ^(d)	1,00 – 1,14
			19-25 mm ^(e) e 900 kPa ^(d)	1,00 – 1,22
Huang e Wang (2007)	PET (PVC)	Compactação ^(a)	AN ^(c) e 400 kPa ^(d)	0,93 – 1,23
			AN ^(c) e 600 kPa ^(d)	1,00 – 1,20
			AN ^(c) e 750 kPa ^(d)	1,08 – 1,37
			AN ^(c) e 830 kPa ^(d)	1,12 – 1,54
			AN ^(c) e 900 kPa ^(d)	1,02 – 1,54
Yoo, Jeon e Chang (2010)	PET (n.i.)	Completo ^(b)	-	1,01 e 1,04
	PET (PVC)			1,05 e 1,09
	PEAD*(n.i.)			1,01 e 1,04
Rosete <i>et al.</i> (2013)	PP (n.i.)	Compactação ^(a) e agregado sintético	900 kPa ^(d)	0,99
	PET (n.i.)		500 kPa ^(d)	1,22
			900 kPa ^(d)	1,27
Gonzalez-Torre <i>et al.</i> (2014)	PP	Completo ^(b)	-	1,00
Pinho-Lopes e Lopes (2014)	PET (n.i.)	Completo ^(b)	-	1,32
	PET (n.i.)			1,38
	PEAD*(n.i.)			1,00

Notas: n.i. – Não informado

^(b) Atende a todos os critérios da norma^(d) Carga cíclica aplicada

* Polietileno de alta densidade

^(a) Frequência de 1,0 Hz e 200 ciclos^(c) Agregado natural^(e) Distribuição granulométrica

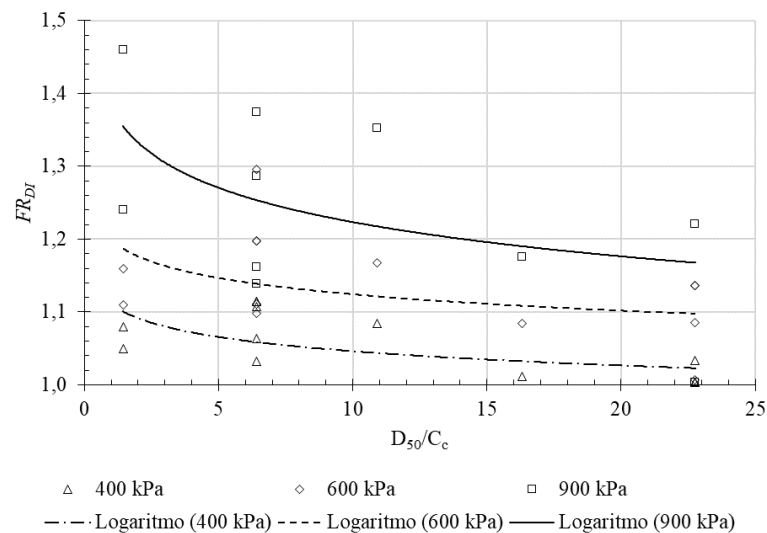
** Álcool Polivinílico

A partir dos resultados apresentados na Tabela 2.8, percebe-se que os ensaios de laboratório apresentaram FR_{DI}^T entre 0,93 a 1,54; porém, se realizados conforme todos os procedimentos preconizados pela norma, os valores variam entre 0,97 e 1,38. No geral, observa-se que i) o FR_{DI}^T aumenta conforme a carga cíclica aplicada é incrementada, ii) a utilização de agregados sintéticos de maiores dimensões em relação ao material preconizado pela norma diminui os

valores de FR_{DI}^T , e iii) há comportamento aleatório quando adota-se agregados naturais para simulações dos danos, que pode ser atrelado à distribuição granulométrica do material.

Devido aos diferentes agregados estudados por alguns autores, torna-se possível relacionar os valores de FR_{DI}^T com as curvas granulométricas. Tomando como referência os estudos apresentados no Quadro 2.1, a Figura 2.13 apresenta a relação entre FR_{DI}^T e D_{50}/C_c (diâmetro equivalente à passagem de 50% de material / coeficiente de curvatura) para cargas cíclicas aplicadas de 400, 600 e 900 kPa. A Figura 2.13 ainda apresenta as linhas de ajuste, estas baseadas em equações logarítmicas.

Figura 2.13 – Relação FR_{DI}^T versus D_{50}/C_c para diferentes carregamentos cíclicos (Fonte: O autor).



Esses resultados evidenciam dois comportamentos distintos: i) aumento de FR_{DI}^T com o aumento do carregamento cíclico aplicado – semelhante aos resultados de Pinho-Lopes e Lopes (2014), Huang e Wang (2007), Rosete *et al.* (2013) e Huang e Chiou (2006); e ii) diminuição do FR_{DI}^T conforme aumento dos valores de D_{50}/C_c . Esse último resultado revela que, para distribuições granulométricas de mesmo formato, à medida que D_{50} aumenta, menores serão os danos. Essa afirmação vai contra os resultados de Huang (2006), Huang e Chiou (2006) e Pinho-Lopes e Lopes (2014), pois afirmam que o dano é incrementado quanto maior o tamanho da partícula. Contudo, a análise realizada leva em consideração o coeficiente de curvatura do material, ou seja, a existência de descontinuidades ou concentração de grão de

um mesmo diâmetro. Desse modo, evidencia-se que o formato da curva granulométrica influencia mais que o diâmetro do grão nos danos mecânicos simulados em laboratório.

Ainda na ótica da granulometria, Paula, Pinho-Lopes e Lopes (2004) evidenciaram que o material sintético indicado pela norma causa maior redução da resistência à tração se comparado a agregados naturais com distribuição granulométrica semelhante. Yoo, Jeon, Chang (2010) sugerem que os danos podem ser diminuídos quando se considera materiais de preenchimento com partículas menores que 20 mm e bem graduadas.

Além disso, Paula, Pinho-Lopes e Lopes (2004) verificaram que a forma da partícula resultante da fragmentação é mais importante para avaliar os danos de instalação em relação à porcentagem de material fragmentado. As autoras sugerem que um parâmetro capaz de descrever o tipo de partícula resultante da fragmentação deve ser utilizado ao contrário do coeficiente de abrasão “Los Angeles” (LA), que apenas indica o grau de fragmentação do material.

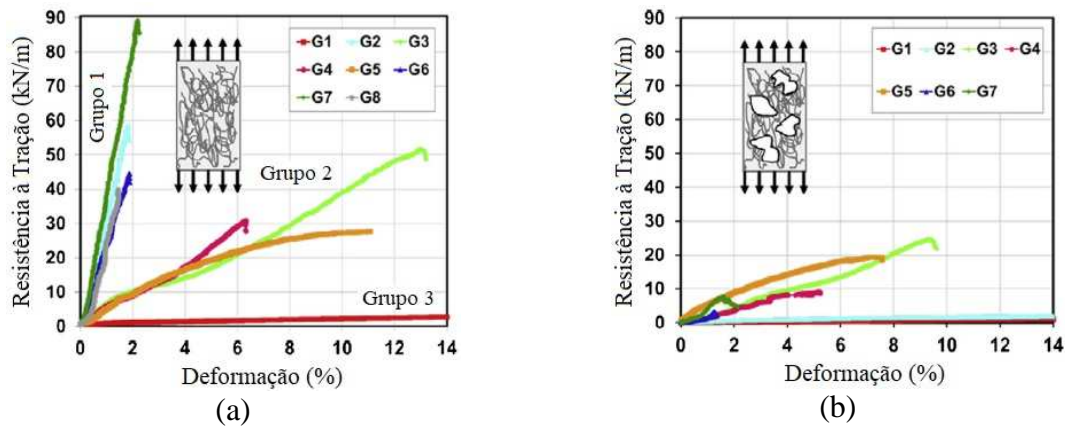
Apesar da análise apresentada, Pinho-Lopes e Lopes (2014) verificaram maior importância na estrutura do geossintético em relação à granulometria quando se avalia a durabilidade frente aos danos mecânicos. Nesse sentido, Gonzalez-Torre *et al.* (2014) afirmaram que, em alguns casos, o geotêxtil apresenta uma estrutura mais suscetível a danos se comparada às geogrelhas.

Norambuena-Contreras e Gonzalez-Torre (2015) notaram que é possível classificar os geossintéticos em relação às curvas tensão-deformação (virgens) em três grupos (Figura 2.14a): Grupo 1 – corresponde a materiais frágeis, que apresentam comportamento elástico com alta resistência à tração e pequena deformação; Grupo 2 – relaciona-se a materiais que apresentam comportamento não linear elástico com valores intermediários de resistência e deformação; e Grupo 3 – evidencia-se comportamento não linear elástico, pouca resistência à tração e elevada deformação. Contudo, após as simulações de danos, esta classificação não se torna válida, pois todos apresentam um comportamento não linear elástico (Figura 2.14b), em decorrência da perda das propriedades mecânicas, causada pelos danos mecânicos.

Além disso, os autores verificaram que geossintéticos com características semelhantes não apresentam comportamento igual frente aos danos de instalação devido às diferenças na composição polimérica do material. No entanto Paula, Pinho-Lopes e Lopes (2012) indicaram

que quanto maior a resistência à tração da geogrelha, maior será sua resistência aos danos de instalação.

Figura 2.14 – Curvas tensão-deformação em amostras (a) virgens e (b) danificadas – modificada pelo autor (NORAMBUENA-CONTRERAS; GONZALEZ-TORRE, 2015).

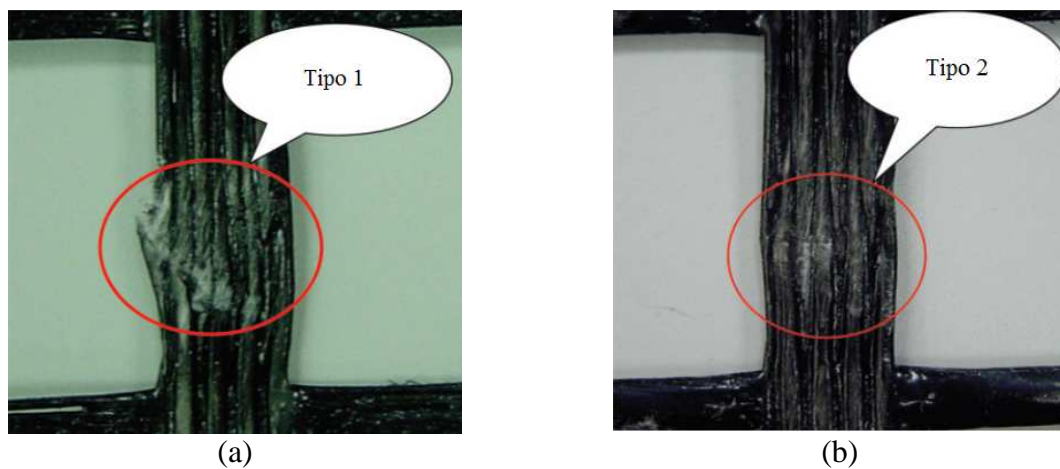


Verifica-se que geogrelhas com fibras de vidro ou carbono apresentam brusca redução de resistência, seguida das geogrelhas de PET, PVA_L e PP. As geogrelhas confeccionadas com polímeros de alta densidade (por exemplo: PEAD) possuem elevada resistência a danos mecânicos devido ao processo de fabricação formar um material de formato único e mais espesso (NORAMBUENA-CONTRERAS; GONZALEZ-TORRE, 2015; GONZALEZ-TORRE *et al.*, 2014; YOO; JEON; CHANG, 2010; PAULA; PINHO-LOPES; LOPES, 2004; ALLAN; BATHURST, 1994). Portanto, apesar de alguns materiais poliméricos apresentarem elevada resistência inicial, é importante analisar sua estrutura a fim de verificar se é propícia ou não ao dano.

Huang e Chiou (2006) analisaram o efeito do tipo de material de revestimento na diminuição da resistência à tração de geogrelhas. Os autores destacaram que, apesar de dois revestimentos apresentarem gramaturas similares (por exemplo: PP e PVC), a razão entre o volume de revestimento (V_r) pela massa das fibras (m_f) por unidade de área (V_r/m_f) pode ser utilizada para quantificar a robustez da geogrelha contra os danos mecânicos, visto que, para maiores valores da relação V_r/m_f , menores são os danos gerados em geogrelhas. Portanto, no caso de geogrelhas aplicadas em ambientes muito agressivos, maiores atenções devem ser dadas ao revestimento a fim de reduzir o FR_{DI}^T em projetos de engenharia (HUANG; LIAO, 2007).

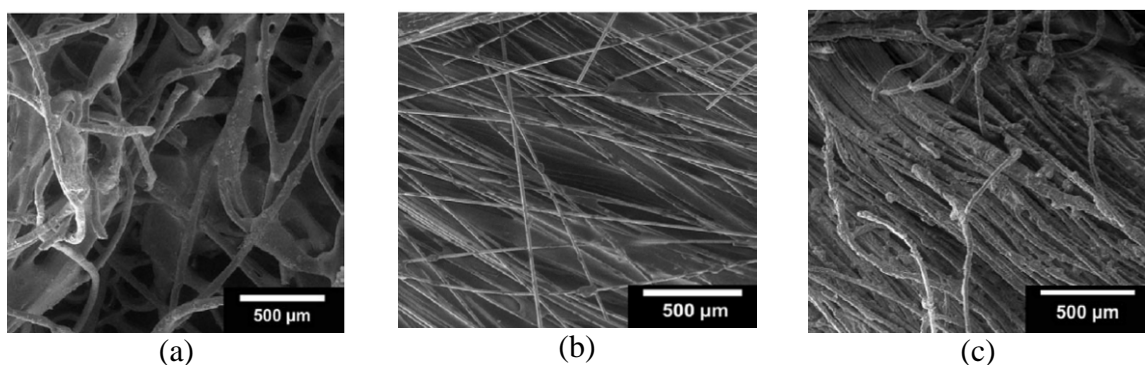
As análises visuais realizadas por Huang (2006) evidenciaram dois tipos de danos: i) revestimento e fibras rompidas (Figura 2.15a), e ii) apenas revestimento rompido (Figura 2.15b). Segundo o autor, quanto maior a dimensão dos agregados utilizados evidencia-se ruptura das fibras poliméricas e corte do material de revestimento, enquanto que, com agregados de menores dimensões, verifica-se que o revestimento pode estar cortado ou escarpado de forma permanente, mas não é identificado ruptura das fibras.

Figura 2.15 – Danos visuais exibindo (a) revestimento e fibras rompidas e (b) apenas revestimento rompido – modificada pelo autor (HUANG, 2006).



Norambuena-Contreras e Gonzalez-Torre (2015) compararam análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com os grupos de geossintéticos relatados na Figura 2.14. Os autores concluíram que os geossintéticos do Grupo 1 apresentaram fibras rompidas (Figura 2.16a); os do Grupo 2, além de rompidas, estavam espalhadas (sem orientação; Figura 2.16b); e o último grupo, Grupo 3, apresentou fibras rompidas, porém ainda orientadas (Figura 2.16c).

Figura 2.16 – Danos visuais do (a) Grupo 1, (b) Grupo 2 e (c) Grupo 3 – modificada pelo autor (NORAMBUENA-CONTRERAS; GONZALEZ-TORRE, 2015).



Huang e Liao (2007) concluíram que geogrelhas revestidas com EPX têm maiores resistências ao dano de abrasão em relação às geogrelhas revestidas com PVC. Norambuena-Contreras *et al.* (2016) simularam danos em geogrelhas ocasionados devido à compactação Proctor e Marshall, e relatam que a variação da quantidade de golpes aplicados (30 a 120) não apresentou influência expressiva na resistência à tração aferida após as simulações de dano devido à compactação. Rosete *et al.* (2013) retrata que o dano de abrasão é o mecanismo de maior impacto na resistência à tração de geogrelhas tendo em vista que os danos de compactação exibiram menor redução da resistência em relação aos danos de abrasão e combinações de abrasão e compactação.

2.2.3.2 Ensaios de danos em campo

Os ensaios realizados em campo para a avaliação de danos de instalação apresentam procedimentos metodológicos semelhantes em vários trabalhos (por exemplo: AUSTIN, 1997; HUFENUS *et al.*, 2005; SANTOS; BUENO; PALMEIRA, 2012; BARBOSA; SILVA; SANTOS, 2016). Inicialmente, verifica-se a execução de uma camada de base, nivelada e com capacidade de suporte controlada, onde os geossintéticos são dispostos. Em seguida, camadas de agregados sobrepõem os materiais poliméricos e processos de compactação são simulados. Posteriormente, o processo de exumação das amostras é realizado em duas etapas: i) com pá carregadeira ou escavadeira hidráulica, até a proximidade do geossintético (superior a 100 mm); e ii) manualmente, para a retirada de agregados em sua superfície.

Nesses ensaios, é possível investigar uma grande quantidade de variáveis, destacando-se: i) energia de compactação, ii) espessura da camada compactada, iii) granulometria do material de preenchimento, iv) altura de lançamento, e v) geogrelhas de diferentes características (gramaturas, resistência à tração, fibras e revestimentos). Evidencia-se que os ensaios de campo exigem mobilização de equipamentos pesados e de maior quantidade de pessoas, o que leva os pesquisadores a avaliarem o maior número de cenários possíveis a fim incrementar o custo-benefício gerado. Contudo, essa grande quantidade de variáveis possíveis de serem analisadas torna difícil à obtenção de conclusões a partir dos ensaios de campo (HUANG, 2006). Soma-se a isso o fato de algumas pesquisas não informarem de maneira clara os parâmetros pertinentes aos ensaios realizados, impossibilitando sua comparação com outros trabalhos.

O Quadro 2.2 apresenta os valores de FR_{DI}^T encontrados por meio de ensaios realizados em grande escala. Evidencia-se que: i) os valores de FR_{DI}^T variam entre 0,87 e 2,33 – intervalo próximo ao de 0,95 a 2,01 encontrado por Huang (2006); ii) diferentes procedimentos de compactação e iii) as diferentes espessura de compactação adotadas mostraram diversos resultados de FR_{DI}^T . Observou-se que, no geral, os valores de FR_{DI}^T apresentados atendem aos valores preconizados pela “Federal Highway Administration” (FHWA, 2009; Tabela 2.9).

Quadro 2.2 – Fatores de redução devido a danos de instalação oriundos de ensaios em campo.

Referência	Geogrelha Fibra (Rev.).	Compactação			SUCS (ASTM, 2006)	FR_{DI}^T
		Força	Passadas	Espessura (mm)		
Austin (1997)	-	3400 kg/m	8	200	SP	1,00
					GP-GM	1,00 – 1,07
					GP	1,02 – 1,30
Richardson (1998)	PET (-)	-	20	100	-	1,19 – 2,33
				250		1,17 – 1,62
				350		1,07 – 1,29
				550		1,00 – 1,22
	PE (-)			100		1,00
				250		1,02
				350		1,06
				550		1,06
Hsieh e Wu (2001)	PET (PVC)	4358 kg/m	6 a 8	150 a 300	GP-GM	1,22 – 1,47
					GC	1,10 – 1,13
					GW	1,20 – 1,49
Hufenus, Ruegger e Flum (2002)	PP (-)	915 kg/m	3 a 4	> 230	SC	1,00 – 1,11
	PEAD (-)				GP – GM	0,97 – 1,15
					SC	1,01 – 1,10
	PET (PVC)				GP – GM	1,04 – 1,08
					SC	0,92 – 1,32
					GP – GM	0,87 – 1,56
					SW	1,27 – 1,70
					1,01 – 1,05	
Hufenus et al. (2005)	PET (PVC)	915 kg/m	3 a 4	> 230	SC	0,92 – 1,15
	PET (-)				GP – GM	0,87 – 1,14
					SC	1,03 – 1,32
	PP (-)				GP – GM	1,06 – 1,56
					SC	1,00 – 1,20
					GP – GM	0,97 – 1,15
	PEAD (-)				SC	1,01 – 1,10
GP – GM		1,04 – 1,08				
Cho et al. (2006)	PET (PVC)	-	-	-	SW	1,27 – 1,70
Hsieh et al. (2007)	-	-	-	150	CL	1,05 – 1,08
					SP	1,10
					GW	1,33 – 1,35
					GC	1,15 – 1,18
					GP-GM	1,20 – 1,27

Quadro 2.2 (continuação) – Fatores de redução devido a danos de instalação oriundos de ensaios em campo.

Referência	Geogrelha Fibra (Rev.).	Compactação			SUCS (ASTM, 2006)	FR_{DI}^T			
		Força	Passadas	Espessura (mm)					
Hsieh <i>et al.</i> (2007)	-	-	-	300	CL	1,05 – 1,07			
					SP	1,04 – 1,12			
					GW	1,14 – 1,57			
					GC	1,12 – 1,17			
					GP-GM	1,16 – 1,52			
Jeon e Bouazza (2010)	PET (PVC)	-	-	200	SW	1,02 – 1,14			
				300		1,01 – 1,12			
				400		1,03 – 1,18			
				400		1,04 – 1,19			
				800		1,04 – 1,21			
				1000		1,03 – 1,14			
Paula, Pinho-Lopes e Lopes (2012)	-	-	-	-	GW	1,29 – 1,60			
					SC	1,34 – 1,82			
Santos, Bueno e Palmeira (2012)	PET (-)	Rolo liso leve			GP-GM ^(a)	1,12 ^(e)			
		Compactador à percussão (Sapo)				1,28 ^(e)			
Lim e McCartney (2013)	PET (PVC)	10 ton	8	200	GP	1,01 – 1,98			
					GW	0,87 – 2,09			
					SC	1,00 – 1,15			
	PEAD (-)				GP	1,01 – 1,45			
					GW	1,07 – 1,29			
					SC	1,01 – 1,06			
Pinho-Lopes e Lopes (2014)	PET (-)	-	-	-	SC	1,06 – 1,13			
					GW	1,15 – 1,23			
	PEAD (-)				GW	1,07 – 1,22			
Vieira e Pereira (2015a)	HDPE (-)				94 kg (placa)	-	200	SC ^(a)	0,94
								Barbosa, Silva e Santos (2016)	PP
1,03 ^(c,e)									
1,05 ^(d,e)									

Onde: GW = pedregulho bem graduado; GP = pedregulho mal graduado; GC = pedregulho argiloso; GP – GM = pedregulho mal graduado com silte; SW = areia bem graduada; SP = areia mal graduada; SC = areia argilosa; CL = argila.

Notas: ^(a) Resíduo de construção e demolição reciclado (RCD-R);

^(b) Altura de queda de zero metros;

^(c) Altura de queda de 1,0 (um) metro;

^(d) Altura de queda de 2,0 (dois) metros.

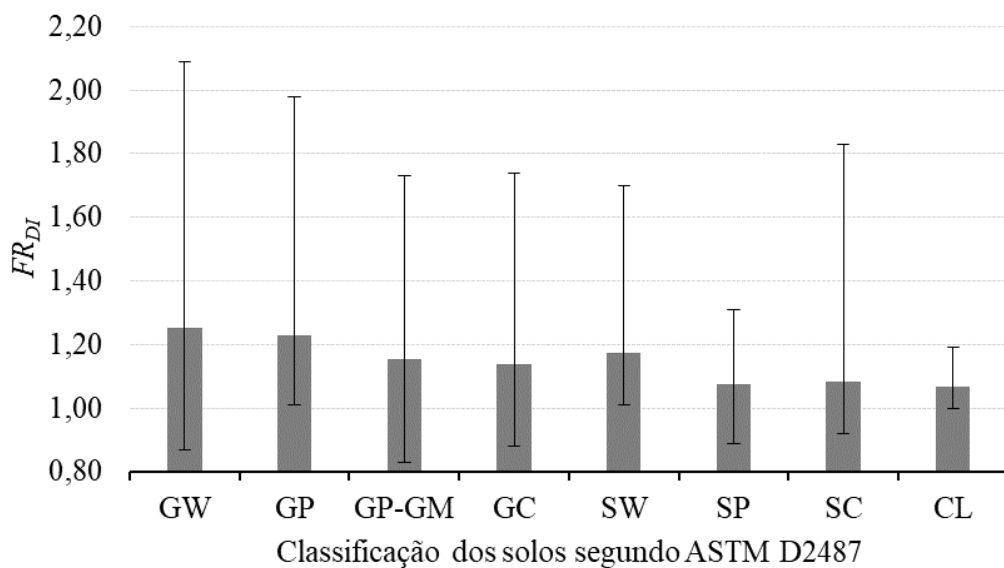
^(e) Realização de análise estatística

Tabela 2.9 - FR_{DI}^T estabelecidos pela FHWA – modificada pelo autor (FHWA, 2009).

Geogrelhas	Material de preenchimento	
	Tipo 1	Tipo 2
	$D_{100} = 100\text{mm}$ $D_{50} \sim 30\text{ mm}$	$D_{100} = 20\text{ mm}$ $D_{50} \sim 0,7\text{ mm}$
HDPE Uniaxial	1,20 – 1,45	1,10 – 1,20
PP Biaxial	1,20 – 1,45	1,10 – 1,20
PET revestida com PVC	1,30 – 1,85	1,10 – 1,30
PET revestida com acrílico	1,30 – 2,05	1,20 – 1,40

A Figura 2.17 apresenta a relação entre os valores de FR_{DI}^T e a classificação do solo (segundo o SUCS; ASTM D2487-06), com intuito de identificar a influência da granulometria do material nos danos mecânicos. Na figura, são apresentados os valores médios e seus respectivos pontos de máximo e mínimo.

Figura 2.17 – Relação FR_{DI}^T versus classificação do solo, para ensaios realizados em grande escala. (Fonte: O autor)



De início, observa-se grande variação nos fatores de redução para todas as tipologias de solo analisadas, porém os solos mais finos (SW, SP, SC e SP) apresentam uma variação menor. Essa variação decorre dos diferentes processos de compactação gerados e das espessuras de compactação. Observou-se também que: i) os valores médios das tipologias de solo bem graduada (GW, SW) exibiram valores de FR_{DI}^T maiores que os solos de má gradação (GP, GP-GM e SP); ii) os agregados mais pedregulhosos (iniciais em G – “*gravel*”) causam mais danos à geogrelhas se comparado aos agregados arenosos (iniciais em S – “*sand*”); e iii) materiais descritos como areia argilosa ou argila arenosa apresentam potencial semelhante de dano à geogrelhas.

Tendo a granulometria como a variável de influência, constata-se que o aumento das dimensões do agregado incrementa o dano gerado. Paula, Pinho-Lopes e Lopes (2012) relacionam o dano com o D_{50} do agregado, enquanto Lim e McCartney (2013) e Cho *et al.* (2006) o relacionam com o diâmetro máximo das partículas. Hufenus; Ruegger e Flum (2002)

justificam esse comportamento com base na presença de agregados graúdos, maiores esforços pontuais podem ser transmitidos à geogrelha devido às tensões induzidas pela compactação; esse cenário se agrava com algumas características do agregado graúdo, uma vez que, quanto maior a rigidez (HUFENUS *et al.*, 2005) e angularidade (CHO *et al.*, 2006), maiores são os danos.

Gonzalez Torres *et al.* (2014) e Paula, Pinho-Lopes e Lopes (2004) verificaram que o CV da média de resistência à tração aferida nas amostras danificadas é superior ao CV em relação as amostras virgens. Vieira e Pereira (2015a) justificam esse comportamento devido aos diferentes mecanismos que contribuíram ao dano dos geossintéticos.

Lim e McCartnery (2013) observaram que as geogrelhas de PET revestidas com PVC sofrem maiores danos se comparadas com as geogrelhas de PEAD, sob a mesma condição de ensaio e resistência à tração. Segundo o autor, a diferença no dano está associada à gramatura, rigidez e espessura dos elementos da geogrelha, de forma que, quanto menores, maiores serão os danos. Resultados semelhantes foram identificados por Cho *et al.* (2006). Com o intuito de diminuir a influência das dimensões da partícula nos danos mecânicos em geogrelhas, Richardson (1998) propôs que a espessura da camada de compactação deve ser quatro vezes superior ao diâmetro máximo do grão.

Quanto à compactação, Hsieh e Wu (2001), Hufenus, Ruegger e Flum (2002) e Hsieh *et al.* (2007) concluíram que a direção de compactação (paralela ou perpendicular às fibras longitudinais) não afetaram as resistências à tração aferidas após o dano. Hufenus, Ruegger e Flum (2002) e Jeon e Bouazza (2010) afirmam que a espessura da camada de compactação apresenta pouca influência nos danos gerados.

Os ensaios em que os RCD-R foram adotados como material de preenchimento mostraram que: i) o incremento da altura de queda provocou maior dano à tração de geogrelhas (BARBOSA; SILVA; SANTOS, 2016); ii) processos de compactação com rolo liso (sem vibração) e à percussão resultaram em FR_{DI}^T distintos, com o ultimo causando maior dano (SANTOS; BUENO; PALMEIRA, 2012); e iii) a adoção de uma compactação com placa vibratória não mostrou danos na geogrelha de modo a comprometer a sua resistência à tração (VIEIRA; PEREIRA, 2015a). Esses resultados, não inviabilizam a utilização de RCD-R como material de preenchimento; pelo contrário, fornecem fatores de redução para sua utilização.

As análises visuais realizadas por Cho *et al.* (2006) mostraram a existência de quatro tipos de danos: i) contusão, ii) separação, iii) corte e iv) abrasão. Austin (1997), Richardson (1998), Cho *et al.* (2006) e Lim e McCartney (2013) verificaram que o dano mais comum visualizado em geogrelhas em simulações de campo foi a abrasão. Contudo, os autores constataram que os danos de contusão e separação somente atuam em geogrelha de menor resistência, gramatura e rigidez, atreladas à agregados de maiores dimensões. Vieira e Pereira (2015a) visualizaram poucos danos decorrentes da utilização de RCD-R com geossintéticos, porém as análises de MEV exibiram danos de contusão, que as autoras relacionam com partículas mais rígidas do RCD-R.

Mediante aos resultados apresentados, relativos aos ensaios em campo, observa-se que a redução da resistência à tração de geogrelhas devido aos danos mecânicos de instalação foi influenciada por:

- ◆ Graduação e angularidade dos materiais de preenchimento;
- ◆ Tipo, gramatura, espessura e constituição (fibra e revestimento) do geossintético;
- ◆ Tipo e peso dos equipamentos de compactação; e
- ◆ Altura de lançamento do material de preenchimento.

2.2.3.3 Fatores de redução calculados em relação à rigidez e à deformação na ruptura de geossintéticos

O efeito do dano de instalação nas propriedades mecânicas de geossintéticos pode ser avaliado pela: i) resistência à tração de pico (conforme apresentada anteriormente), ii) deformação na ruptura e ii) rigidez secante, a partir das curvas tensão-deformação obtidas pelos ensaios de tração em geogrelhas (ALLAN; BATHURST, 1994). Os autores ressaltam que o acompanhamento da deformação é importante para avaliar a capacidade de suporte da geogrelha conforme a deformação aumenta. Neste sentido, Paula, Pinho-Lopes e Lopes (2014) e Huang e Liao (2007) afirmam que trabalhar com a rigidez é melhor para indicar o desempenho dos materiais poliméricos. Diante disso, alguns autores calcularam os fatores de redução devido ao dano de instalação em relação à deformação na ruptura (FR_{Dl}^{ϵ}) e em relação à rigidez (FR_{Dl}^J) de geogrelhas (Quadro 2.3).

Quadro 2.3 – Fatores de redução relativos a deformação e rigidez.

Referência	Simulação dos danos	Geogrelha Fibra (Revest.)	FR_{DI}^{ε}	FR_{DI}^J
Austin, 1997	Campo	-	-	1,00 ⁽²⁾
			-	1,00 ⁽⁵⁾
Hsieh e Wu (2001)	Campo	PET (PVC)	0,88 – 1,41	0,83 – 1,74 ⁽²⁾
Hsieh <i>et al.</i> (2007)	Campo	-	0,89 – 1,37	1,00 – 1,31 ⁽²⁾
Pinho-Lopes e Lopes (2014)	ISO 10722	PET (-)	-	1,07 ⁽²⁾
	Campo	PET (-)	-	0,99 – 1,00 ⁽²⁾
Gonzalez-Torre <i>et al.</i> (2014)		PEAD (-)	-	1,00 – 1,02 ⁽²⁾
	ISO 10722	PP (-)	-	0,99 ⁽²⁾
	Procedimento do autor		-	1,05 ⁽²⁾
Campo	-		1,06 ⁽²⁾	
Norambuena-Contreras e Gonzalez-Torre (2015)	ISO 10722 (alteração na carga cíclica)	PP (-)	1,35	1,07 ⁽²⁾

⁽²⁾ Rigidez secante com 2% de deformação

⁽⁵⁾ Rigidez secante com 5% de deformação

A partir do Quadro 2.3, observa-se que os valores de FR_{DI}^{ε} estão no intervalo entre 0,88 e 1,41, enquanto o valor de FR_{DI}^J está entre 0,83 e 1,74. Apesar destes resultados, Gonzalez-Torre *et al.* (2014) e Allen e Bathurst (1994) indicam que a redução sofrida pela rigidez das geogrelhas é menor em relação à redução da resistência à tração de pico. Acrescentam que o módulo de rigidez secante, em nível de deformação condizentes com a prática, representa melhor a mudança de comportamento da tensão de tração em relação à própria redução da resistência à tração máxima. Contudo, Pinho-Lopes e Lopes (2014) afirmam que essa consideração somente é válida quando se projeta considerando o estado limite último (ELU) sem a ruptura por tração do geossintético ou no estado limite de serviço (ELS).

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

Este capítulo tem por finalidade apresentar os materiais e métodos utilizados no estudo (RCD-R e geossintéticos). Serão apresentados os procedimentos adotados durante as coletadas e a caracterização de laboratório, assim como, as especificações fornecidas pela empresa fabricante. Posteriormente, será detalhada a instalação experimental de campo, descritos os procedimentos realizados para simulação dos danos e a metodologia para determinar a eventual ocorrência de redução da resistência à tração dos geossintéticos.

3.1 MATERIAIS

Para avaliar e quantificar os danos mecânicos em geossintéticos devidos ao processo instalação foram utilizados resíduos de construção e demolição reciclado (RCD-R), como material de preenchimento nos experimentos, e geogrelhas, como material polimérico de reforço.

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

Os resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) foram coletados numa usina privada de beneficiamento, localizada em Aparecida de Goiânia–GO. Dentre os seis tipos de produtos de RCD-R fabricados pela usina, optou-se pela brita graduada simples (BGS), uma vez que esse apresenta o maior número de aplicação e granulometria aparentemente compatível para uso como material de preenchimento em ESR. Com intuito de efetuar a caracterização geotécnica deste material, foram coletadas cinco amostras de RCD-R. O procedimento de coleta seguiu recomendações preconizadas pelas NBR 10007 (ABNT, 2004) – Amostragem de Resíduos Sólidos – e a NBR Norma Mercosul (NM) 26 (ABNT, 2009) – Agregados – Amostragem.

A Tabela 3.1 apresenta o plano de coleta realizado com as datas das coletas e as quantidades de material coletado em cada coleta. A Figura 3.1 ilustra os pontos de coleta do RCD-R na

pilha de estocagem, os quais foram adotados com o intuito de obter uma amostra representativa. O plano de coleta foi realizado com o objetivo de avaliar também a variabilidade do material. Para a realização do experimento de campo, foram utilizados aproximadamente 18 m³ de RCD-R, recebido no dia 12/06/2017 (Figuras 3.2a e 3.2b).

Tabela 3.1 – Plano de coleta realizado e massas secas coletadas.

Amostra	Data da amostragem	Massa seca (kg)
RCD-R 01	01/11/2016	92,09
RCD-R 02	16/11/2016	66,92
RCD-R 03	29/11/2016	101,38
RCD-R 04	13/12/2016	95,99
RCD-R 05	22/12/2016	99,69

Figura 3.1 – Localização dos pontos de coleta da amostra RCD-R 03.



Em virtude de a instalação ter sido preenchida com o mesmo material duas vezes, realizou-se – durante o processo de exumação das geogrelhas – duas amostragens do RCD-R com intuito de identificar a ocorrência de alterações nas características geotécnicas do material após os processos de compactação. A Tabela 3.2 mostra as datas e as massas secas das amostras do RCD-R.

Figura 3.2 – Recebimento do RCD-R: (a) preenchimento do caminhão basculante e (b) deposição do material próximo a instalação experimental.



Tabela 3.2 – Plano de coleta realizado e massas secas pertinentes ao RCD-R.

Amostra	Data da amostragem	Massa seca (kg)
RCD-R 06	10/10/2017	92,85
RCD-R 07	17/10/2017	93,05

3.1.2 Geogrelhas

Como material de reforço, foram selecionados três tipos de geogrelhas: uma com fibras de álcool polivinílico (GGPVA) e outras duas com fibras de poliéster (GGPET 01 e 02). A Tabela 3.3 apresenta as especificações técnicas fornecidas pelo fabricante e a Figura 3.3 exibe imagens ilustrativas de cada geogrelha. Evidenciou-se alguns danos no material recebido (Figuras 3.4b, 3.4c e 3.4d), que pode ser justificado pelas dobras existentes (Figura 3.4a), haja vista que as geogrelhas possuíam cinco metros de largura.

Tabela 3.3 – Especificações técnicas das geogrelhas em estudo (Fonte: Fabricante).

Características do Produto	GGPVA	GGPET 01	GGPET 02
Massa por unidade de área (g/m ²)	160	280	185
Abertura da Malha	25 x 30 mm	25 x 25 mm	25 x 25 mm
Polímero	PVA _L	PET	PET
Resistência a tração na direção longitudinal	≥ 35 kN/m	55 kN/m	35 kN/m
Resistência a tração na direção transversal	≥ 20 kN/m	-	-
Deformação na resistência nominal	≤ 10 %	≤ 10 %	≤ 10 %

Figura 3.3 – Ilustração das geogrelhas em estudo: (a) disposição das fibras nas imagens, b) GGPVA; b) GGPET 01 e c) GGPET 02.

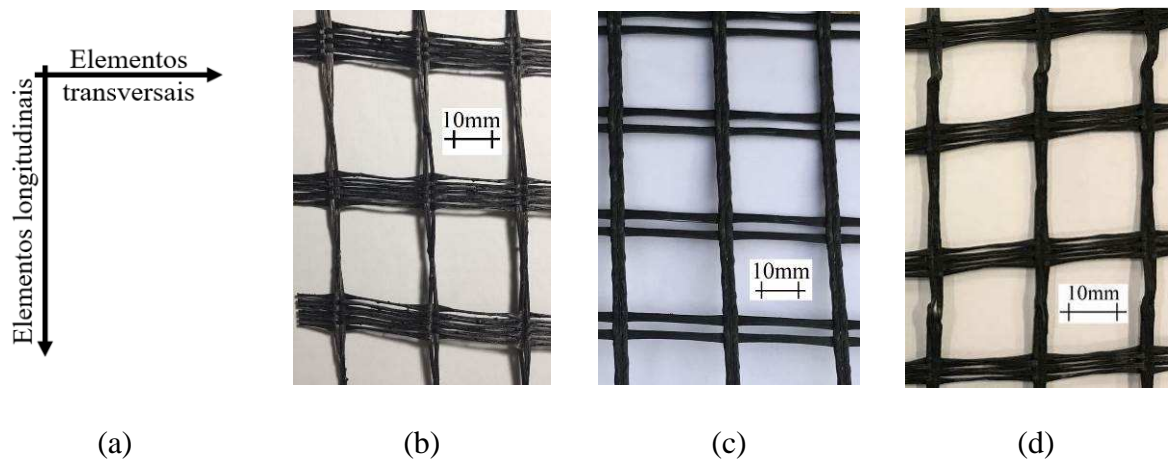
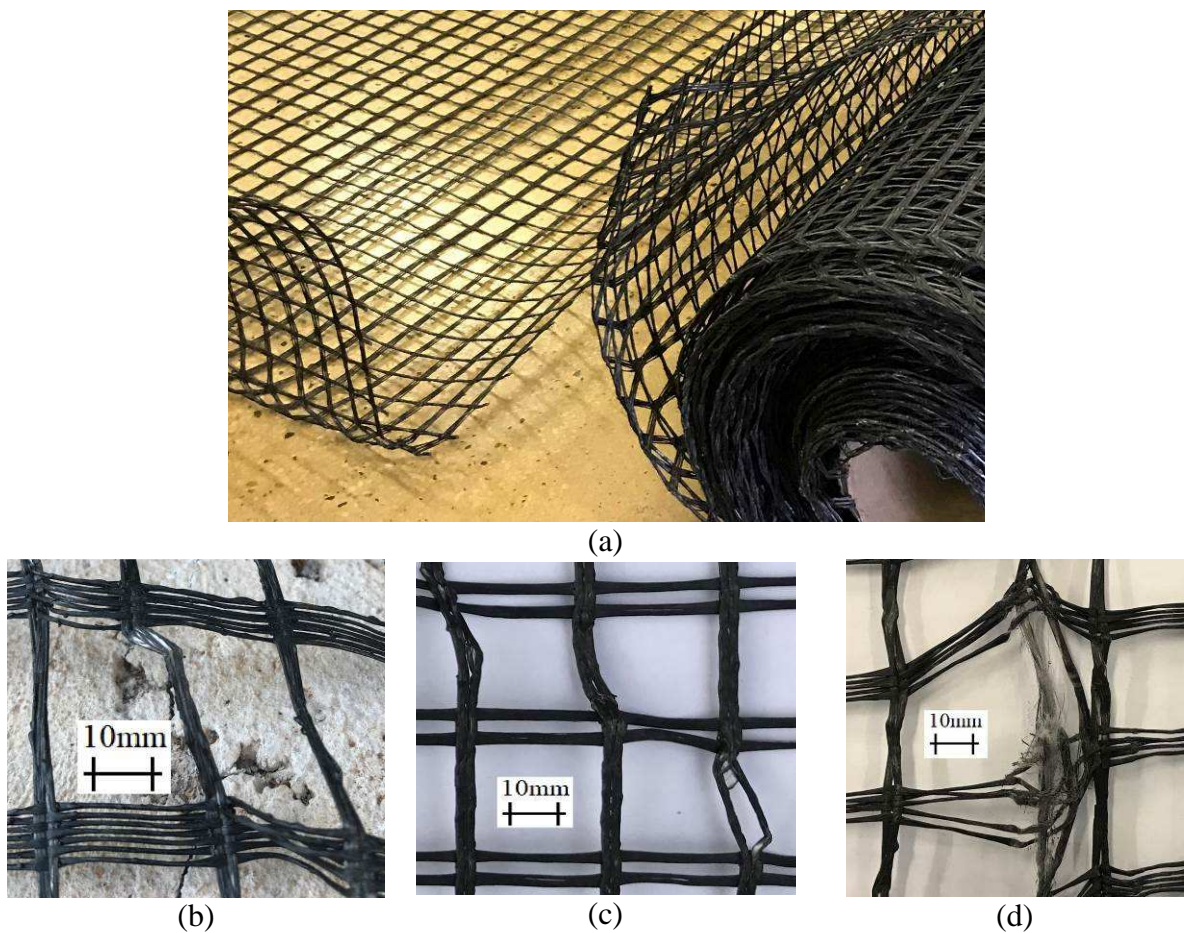


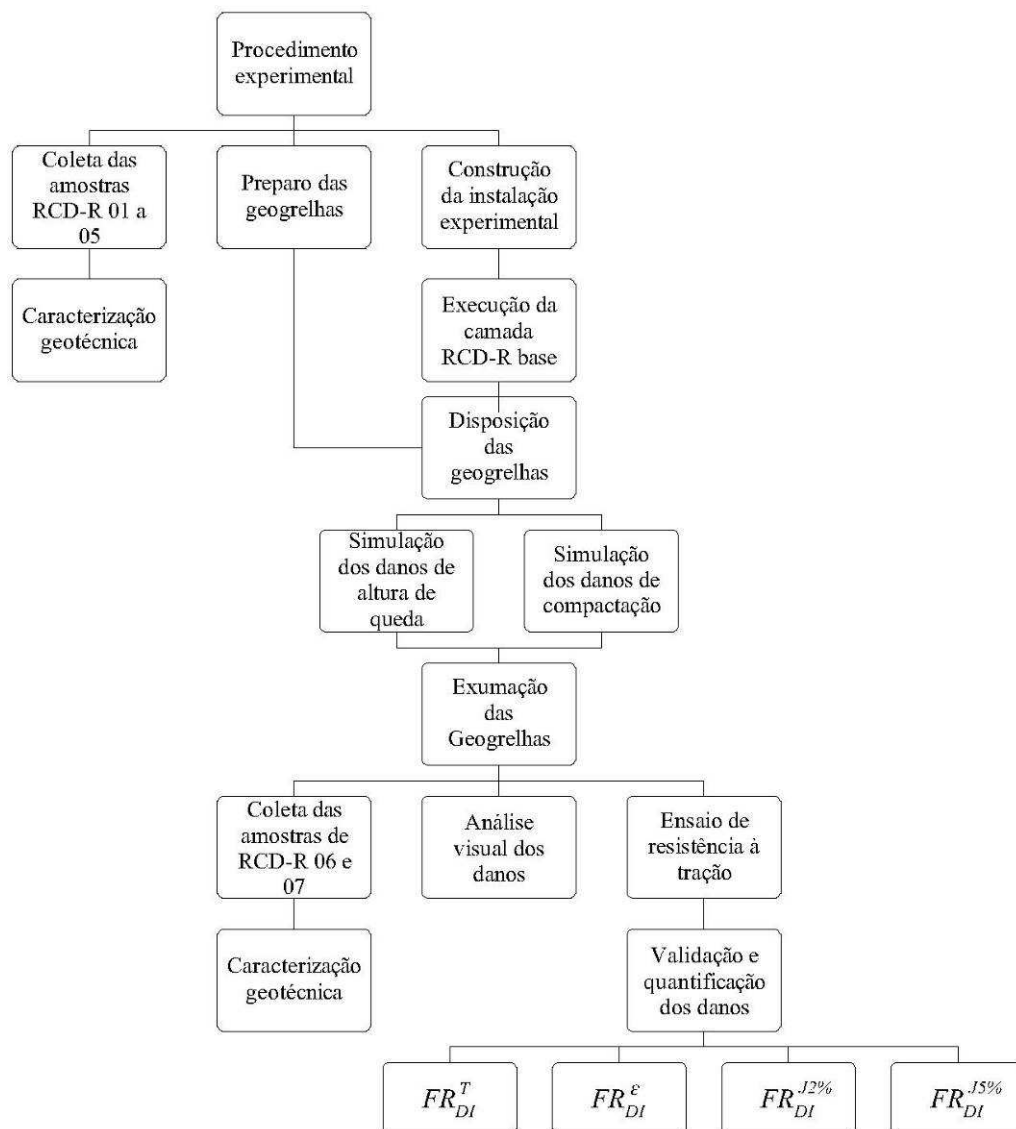
Figura 3.4 – Condições das geogrelhas recebidas: (a) existência de dobras e danos nas geogrelhas (b) GGPVA, (c) GGPET 01 e (d) GGPET 02.



3.2 MÉTODOS

O fluxograma dos procedimentos metodológicos realizados neste trabalho está ilustrado na Figura 3.5 e serão detalhados neste subitem.

Figura 3.5 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos adotados.



3.2.1 Ensaios de caracterização geotécnica do RCD-R

A caracterização geotécnica do RCD-R foi realizada no Laboratório de Solos da Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA) da Universidade Federal de Goiás (UFG) seguindo as

normas empregadas para ensaio de solos. Os procedimentos técnicos (normas) adotados estão apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Procedimentos técnicos adotados.

Procedimentos Técnicos (normas)
NBR 6508: Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica (ABNT, 2016a) ^{a,b}
NBR 7181: Solo: análise Granulométrica (ABNT, 2016b). ^c
NBR 6459: Solo: determinação do limite de liquidez (ABNT, 2016c) ^a
NBR 7180: Solo: determinação do limite de plasticidade (ABNT, 2016d) ^a
NBR 7182: Solo: ensaio de compactação (ABNT, 2016e) ^a
^a Preparação de amostra com secagem prévia ao ar
^b Resultados apresentados em peso específico dos grãos (kN/m ³)
^c Sedimentação, peneiramento fino e grosso

O ensaio de compactação foi realizado com energia Proctor normal tendo em vista a exigência de um grau de compactação (GC) mínimo de 95% dessa energia para a aplicação em estruturas de solo reforçado com geossintéticos (FHWA, 2010). Optou-se pela realização do ensaio de compactação com reuso de material uma vez que o índice de quebra foi considerado pequeno segundo os estudos de Santos (2007) e Barbosa (2017).

Além dos procedimentos relatados na Tabela 3.4, foi realizado o ensaio de composição gravimétrica das amostras de RCD-R. Para sua realização, tomou-se aproximadamente dez quilos de material de cada amostra. O material foi passado pela peneira de abertura 4,8 mm, sendo o passante classificado como ‘solo’. Pesou-se o material retido, o qual, posteriormente, foi lavado com água corrente na mesma peneira para retirar as partículas finas que eventualmente permaneceram aderidas às graúdas. Levou-se o material para a estufa, onde as amostras permaneceram por, no mínimo, doze horas. Pesou-se novamente o material para determinar qual a massa da amostra foi perdida na lavagem, a qual foi somada à classificação ‘solo’. A composição gravimétrica de todas as amostras foi determinada por meio de identificação visual das partículas. A Figura 3.6 ilustra um dos materiais retidos na peneira de 4,8 mm após secagem.

Além dos ensaios de caracterização, foi realizado o ensaio de frasco de areia para determinação da massa específica aparente *in situ*, preconizado pela NBR 7185 – Solo – Determinação da massa específica aparente, *in situ*, com emprego do frasco de areia (ABNT, 2016g). As umidades foram determinadas com o uso de estufa. O ensaio foi realizado na

camada base de RCD-R e nas camadas compactadas acima da geogrelha, com espessura escavada dos orifícios de 100 mm e 150 mm, respectivamente. A Figura 3.7 ilustra a execução dos ensaios.

Figura 3.6 – Materiais retidos na peneira 4,8 mm após secagem.



Figura 3.7 – Execução do ensaio de frasco de areia: (a) camada base e (b) camada compactada.



(a)



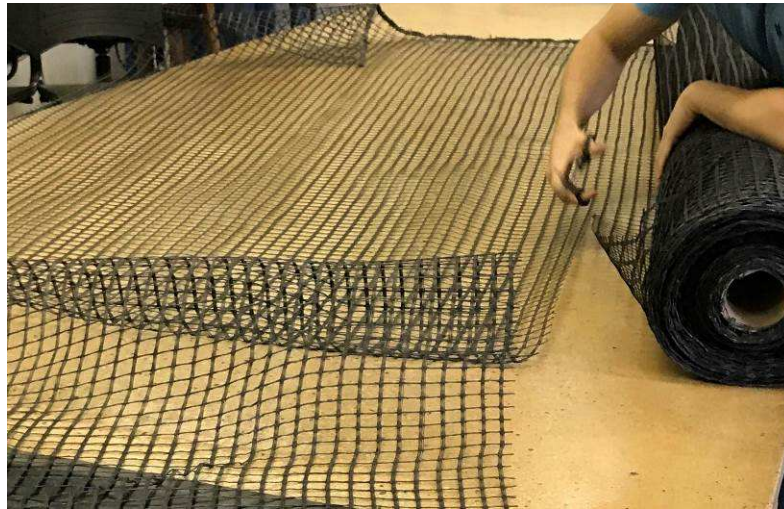
(b)

3.2.2 Preparo das geogrelhas

As geogrelhas recebidas foram cortadas (Figura 3.8) em amostras com 3,9 m (sentido transversal) por 1,2 m (sentido longitudinal), evitando os danos já existentes no material virgem. No entanto, em alguns casos, não foi possível evitar a presença de fibras danificadas nos trechos a serem empregadas no experimento de campo, porém buscou-se enquadrá-las em

uma região de modo a não interferir no ensaio de resistência à tração em mais de um corpo de prova.

Figura 3.8 – Corte da geogrelha de poliéster 02 (GGPET 02).



Após o processo supracitado, as geogrelhas foram enroladas (em direção a menor dimensão – 1,20 m), acondicionadas em sacos plásticos, e, por fim, armazenadas em local fechado, sem presença de água, evitando a ocorrência de possíveis danos de estocagem ou químicos. As geogrelhas permaneceram nesse recinto por aproximadamente dez dias.

3.2.3 Instalação para quantificação de danos

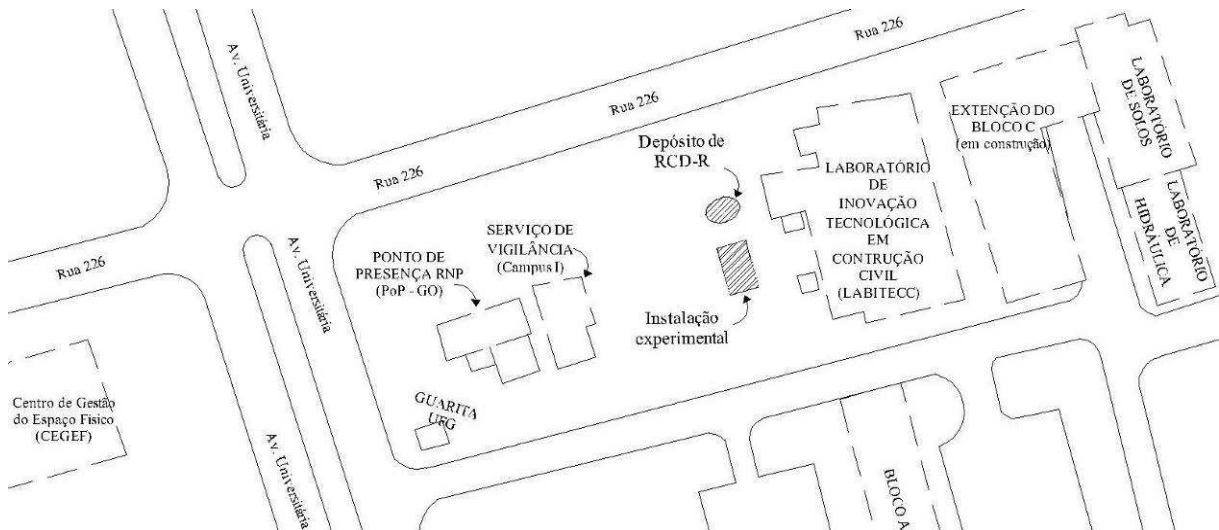
O experimento para simulação dos danos de instalação foi construído na Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA) da Universidade Federal de Goiás (UFG), no Setor Universitário em Goiânia–GO (Figura 3.9).

A instalação é composta por duas linhas de elementos de concreto pré-fabricados (defensas) – com o propósito de conter o RCD-R – espaçadas a 3,9 m. Cada linha possui quatro elementos pré-moldados de 2,0 metros de comprimento. A área disponível para a realização do ensaio foi de 31,2 m². A construção da instalação ocorreu em seis processos:

- i) marcação da área com estacas de madeira (Figura 3.10a);
- ii) limpeza da vegetação superficial, com auxílio de uma *bobcat* (Figura 3.10b)
- iii) nivelamento do terreno (Figura 3.10c e 3.10d);
- iv) execução de um contrapiso de concreto armado (Figura 3.10e e 3.10f)

- v) posicionamento dos elementos de concreto pré-moldado sobre a laje de concreto (Figura 3.10g); e
- vi) compactação manual de solo ao lado das vigas – nas regiões externas (Figura 3.10h).

Figura 3.9 – Localização da instalação experimental.



Em virtude da possibilidade de precipitação nos meses de setembro e outubro na cidade de Goiânia–GO, optou-se pela instalação de tendas piramidais sobre a área do experimento e o local de depósito do RCD-R reservado para o ensaio de campo. A configuração final da instalação experimental vista é apresentada na Figura 3.11.

3.2.4 Simulação dos danos

Neste estudo, dois fatores que influenciam os danos de instalação em geogrelhas foram investigados: i) procedimentos de lançamento do material de preenchimento e ii) métodos de compactação do material de preenchimento. Em relação ao procedimento de lançamento do material de preenchimento, foram investigados os efeitos de três alturas de queda: i) zero metros (A0); ii) 1,0 m (A1) e iii) 2,0 m (A2). Para investigar os efeitos dos métodos de compactação, foram investigados três cenários: i) sem compactação (SC); ii) compactação com rolo vibratório (CR) e iii) compactação à percussão – equipamento tipo sapo (CS).

Figura 3.10 – Construção da instalação experimental: (a) estaqueamento da área; (b) limpeza da vegetação superficial, (c) nivelamento do terreno; (d) terreno nivelado; (e) execução da concretagem; (f) laje de concreto concluída; (g) instalação das vigas pré-moldadas e (h) compactação manual de solo.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)

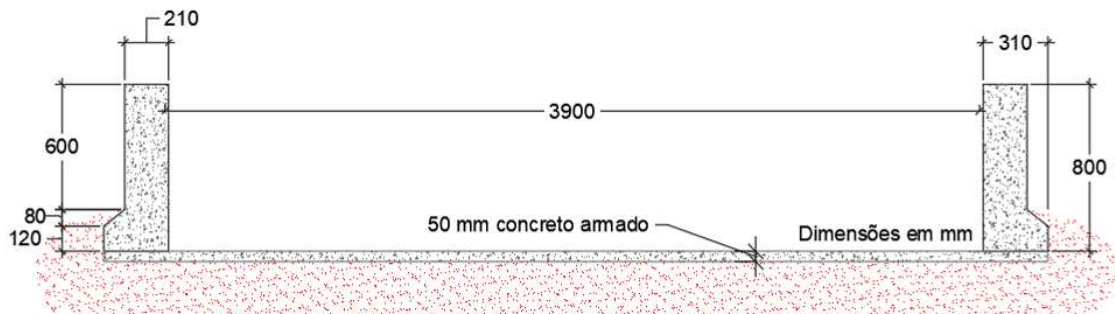


(h)

Figura 3.11 – Instalação experimental: (a) concluída e (b) corte transversal.



(a)



(b)

Considerando-se que o procedimento de lançamento pode causar danos às geogrelhas, um outro cenário foi investigado, não relacionado à geração de dano, mas sim como possível método para prevenção do mesmo. Esse cenário consistiu no lançamento de RCD-R de uma altura de 2,0 metros sobre uma camada de RCD-R de 50 mm de espessura, executada previamente sobre as amostras de geogrelhas. Este cenário recebeu a identificação de A2*.

Todos os cenários supracitados foram simulados nos três tipos de geogrelhas adotadas neste estudo, fornecendo um total de 36 diferentes configurações de ensaios. Com o intuito de facilitar a identificação de cada configuração, foram utilizadas as nomenclaturas apresentadas na Tabela 3.5. Tomando, como exemplo, a nomenclatura GGPVA-A1-CS, esta refere-se à configuração de ensaio pertinente a geogrelha de álcool polivinílico (GGPVA), com altura de queda de 1,0 metro (A1) e compactação à percussão (CS).

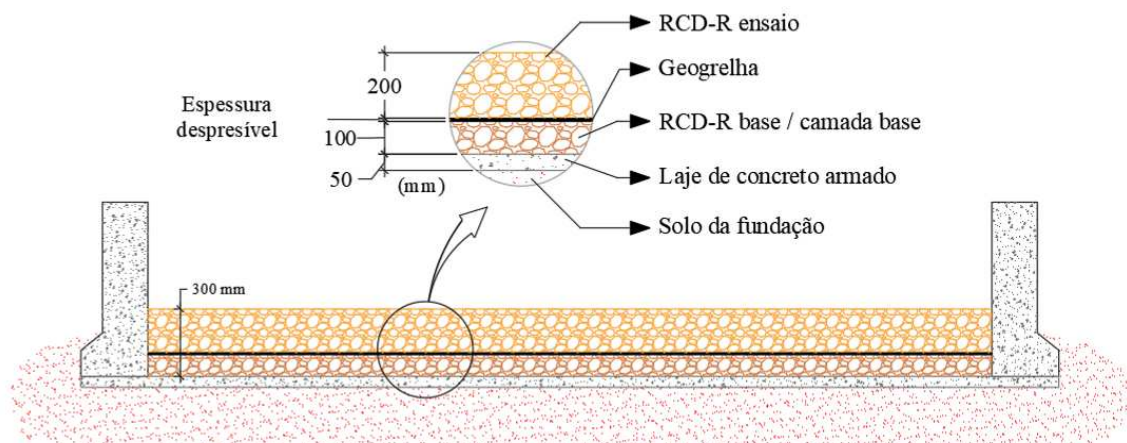
O preenchimento da estrutura ocorreu em três etapas: i) execução de uma camada (100 mm) de RCD-R, denominada 'camada de base', ii) posicionamento das amostras de geogrelha sobre a camada da base e iii) execução de uma camada (200 mm) de RCD-R sobre as

amostras de geogrelhas. A configuração final da espessura final empregada no experimento está apresentada na Figura 3.12.

Tabela 3.5 – Nomenclatura das configurações de ensaio.

GGPVA-A0-SC	GGPET 01-A0-SC	GGPET 02-A0-SC
GGPVA-A1-SC	GGPET 01-A1-SC	GGPET 02-A1-SC
GGPVA-A2-SC	GGPET 01-A2-SC	GGPET 02-A2-SC
GGPVA-A0-CR	GGPET 01-A0-CR	GGPET 02-A0-CR
GGPVA-A1-CR	GGPET 01-A1-CR	GGPET 02-A1-CR
GGPVA-A2-CR	GGPET 01-A2-CR	GGPET 02-A2-CR
GGPVA-A0-CS	GGPET 01-A0-CS	GGPET 02-A0-CS
GGPVA-A1-CS	GGPET 01-A1-CS	GGPET 02-A1-CS
GGPVA-A2-CS	GGPET 01-A2-CS	GGPET 02-A2-CS
GGPVA-A2*-SC	GGPET 01-A2*-SC	GGPET 02-A2*-SC
GGPVA-A2*-CR	GGPET 01-A2*-CR	GGPET 02-A2*-CR
GGPVA-A2*-CS	GGPET01-A2*-CS	GGPET02-A2*-CS

Figura 3.12 – Configuração final da camada em estudo.



3.2.4.1 Compactação da camada base

Sobre o contrapiso de concreto armado, foi executada uma camada compactada de aproximadamente 100 mm de RCD-R. Para a sua execução, foram realizadas quatro passadas de um rolo liso vibratório – com massa operacional de 1400 kg distribuída em um rolo de 900 mm de largura (Figura 3.13a). Ao final de cada experimento, o RCD-R foi removido com auxílio da *bobcat* (Figura 3.13b) e realizada uma nova camada base para o experimento seguinte repetindo-se o processo utilizado para a execução da camada (Figura 3.13a).

A espessura da camada foi aferida com auxílio de trena – estendendo-se uma linha de nylon entre dois conjuntos de defensas e medindo a distância (d) da linha até a camada de solo

compactada. Esse procedimento foi realizado em três pontos para cada linha, conforme ilustrado na Figura 3.14. A média das espessuras aferidas foi de 103,75 mm, com coeficiente de variação (CV) de 10,87%. O mesmo método – com o uso de trena e linha de nylon – foi adotado para aferir a espessura das camadas de RCD-R no experimento de campo.

Figura 3.13 – Camada base: (a) compactação e (b) remoção da camada de RCD-R.



Figura 3.14 – Aferição da espessura da camada da base compactada.

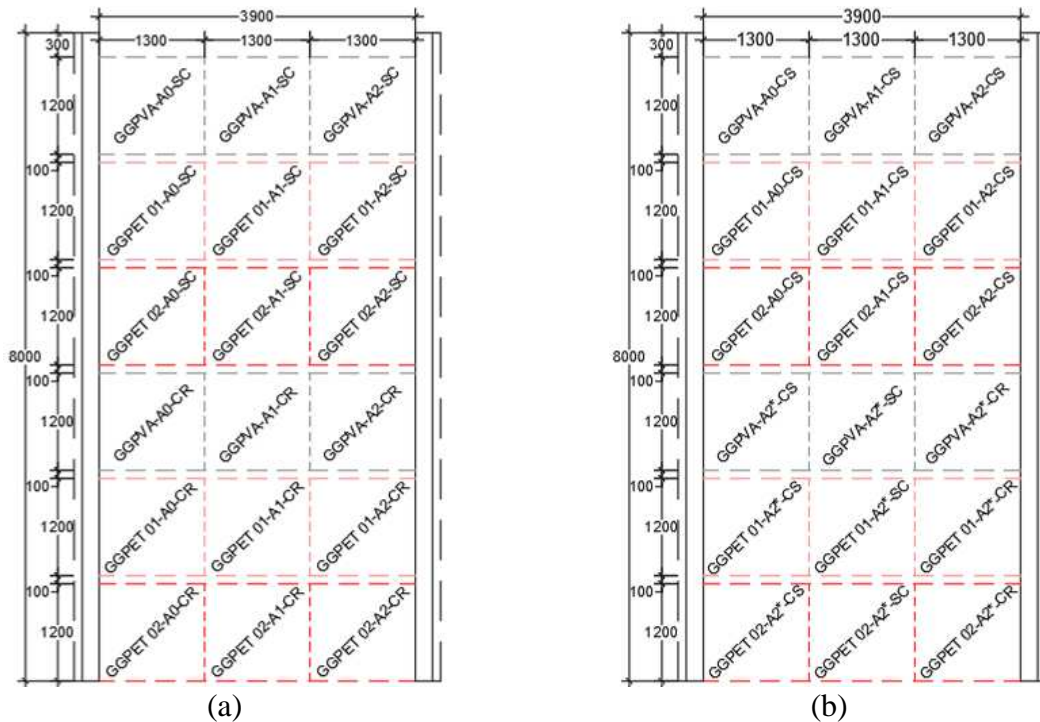


3.2.4.2 Posicionamento das geogrelhas na instalação experimental

A área total da instalação experimental (8,0 m x 3,9 m) possibilitou, em cada preenchimento, a investigação de dezoito configurações de dano. Para cada configuração, foi empregado um trecho de geogrelha de 1,30 m x 1,20 m; logo, para analisar as configurações propostas para o estudo (Tabela 3.5), foram necessários dois preenchimentos da instalação. As Figuras 3.15a e

3.15b ilustram as configurações de ensaio avaliadas no primeiro e no segundo preenchimento da instalação, respectivamente.

Figura 3.15 – Configurações dos ensaios: (a) no primeiro e (b) segundo preenchimento da instalação experimental.



Nota: Dimensões em mm.

3.2.4.3 Simulação de lançamento do material de preenchimento

Com intuito de analisar os danos causados devido ao processo de lançamento do RCD-R, utilizou-se uma *bobcat* para lançar os materiais de alturas de 0,0 metros, 1,0 metro e 2,0 metros.

Devido à rotação que a caçamba realiza antes que o material inicie a queda, a base da caçamba foi posicionada 400 mm acima da altura desejada, ou seja, 2,4 m, para A2, e 1,4 m, para A1. Para garantir que essas alturas fossem atingidas, foram feitas marcações (1,4 e 2,4 m) numa ripa de madeira. Antes do lançamento, a ripa foi posicionada próxima a caçamba para conferência da altura de queda (Figura 3.16).

Em decorrência da largura da caçamba da *bobcat* (1,80 m) ser maior que os trechos de geogrelha (1,30 m) reservados para cada configuração, uma placa de madeira (1,20 m x 1,30

m x 0,04 m) foi posicionada sobre o segmento de geogrelha adjacente (Figura 3.16) de modo a preservá-lo de danos não desejados (simulados em outras configurações de ensaio).

Figura 3.16 – Conferência da altura de queda antes do lançamento do RCD-R.



A camada de proteção – empregada para a configuração A2* – foi executada cuidadosamente depositando o RCD-R sobre a geogrelha com auxílio de uma pá (Figura 3.17a) e a nivelando com enxada (Figura 3.17b). Conforme descrito anteriormente, após a execução e a aferição da camada de proteção, o RCD-R foi lançado de uma altura de 2,0 m (Figura 3.17c).

3.2.4.4 Métodos de compactação empregados no experimento de campo

Os procedimentos de compactação foram iniciados após o completo preenchimento da estrutura, ou seja, com a simulação do lançamento do material. Optou-se pela compactação com dois equipamentos distintos: rolo vibratório e compactador à percussão (tipo sapo), tendo em vista que ambos são utilizados na compactação dos materiais de preenchimento em estruturas de solo reforçado. Segundo a FHWA (2010), o primeiro deve ser adotado para compactação da região não inferior a 1,0 metro da face da estrutura, enquanto o segundo equipamento é usado para a compactação na região mais próximo à face.

Como indicado na Figura 3.15a, no primeiro preenchimento da instalação de campo, metade da sua área total não foi compactada (cenário ‘sem compactação’ – SC), e a outra metade foi compactada com rolo vibratório (cenário ‘compactação com rolo’ – CR). No cenário CR, foram executadas seis passadas do rolo vibratório, resultando em uma espessura compactada média de 192,1 mm, com CV igual a 2,8%. A Figura 3.18 apresenta a região destinada aos

cenários sem compactação (SC) e com compactação com rolo vibratório (CR); e a compactação da camada com rolo.

Figura 3.17 – Execução da camada de proteção: (a) deposição do RCD-R, (b) nivelamento da camada e (c) lançamento do RCD-R.



Figura 3.18 – Primeiro preenchimento da instalação experimental: (a) região destinada aos cenários sem compactação (SC) e com compactação com rolo vibratório (CR) e (b) compactação com rolo vibratório.



No segundo preenchimento da instalação, como mostrado na Figura 3.15b, a metade da área total foi compactada com compactador a percussão tipo sapo (cenário compactação à percussão – CS). Para a compactação à percussão (Figura 3.19), utilizou-se um compactador com massa operacional de 74 kg, distribuída numa placa de 0,09 m² (280 x 320 mm). Observou-se que, após oito passadas do equipamento, a espessura compactada média aferida foi de 195,0 mm, com CV igual a 3,31%.

Figura 3.19 – Compactação com compactador a percussão.



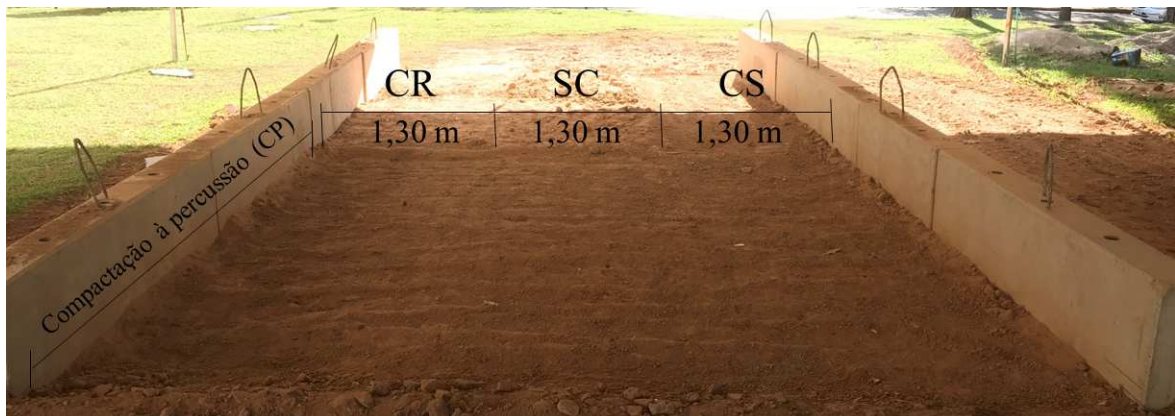
Na outra metade da área total, durante o segundo preenchimento da instalação, foram simulados os cenários com a camada de proteção e altura de queda de 2,0 metros (A2*). Para que os três procedimentos de compactação (SC, CR e CS) fossem realizados, a área foi dividida em três parcelas, todas com 1,3 metros de largura, onde cada parcela foi submetido a um tipo de compactação.

Na investigação do efeito da camada de proteção, a quantidade de passadas de cada equipamento foi idêntica aos procedimentos de compactação anteriores: seis passadas do rolo vibratório e oito passadas do compactador à percussão. A Tabela 3.6 apresenta as espessuras das camadas de RCD-R para cada cenário investigado e seus respectivos coeficientes de variação (CV). A Figura 3.20 apresenta a visão final do experimento de campo após o segundo preenchimento da instalação e realização das simulações de dano.

Tabela 3.6 – Espessuras das camadas compactadas (em mm) da região com camada de proteção.

Cenário	Compactação à percussão		Sem compactação	Compactação com rolo	
	Antes	Depois		Antes	Depois
Média (mm)	230,0	190,0	230,0	227,5	205,0
CV (%)	2,17	5,26	2,17	1,10	0

Figura 3.20 – Larguras dos trechos considerados do segundo preenchimento da instalação experimental.



3.2.4.5 Exumação das geogrelhas

O procedimento de exumação das geogrelhas ocorreu logo após a simulação dos danos em cada preenchimento da instalação, evitando assim a ocorrência de danos adicionais devido ao contato da geogrelha com o RCD-R. Desse modo, assume-se que os eventuais danos sofridos pelas geogrelhas decorram exclusivamente por conta dos procedimentos de instalação simulados. Durante essa fase, as amostras de RCD-R 06 e RCD-R 07 foram coletadas com o auxílio de pá e armazenadas em sacos plásticos (Figura 3.21).

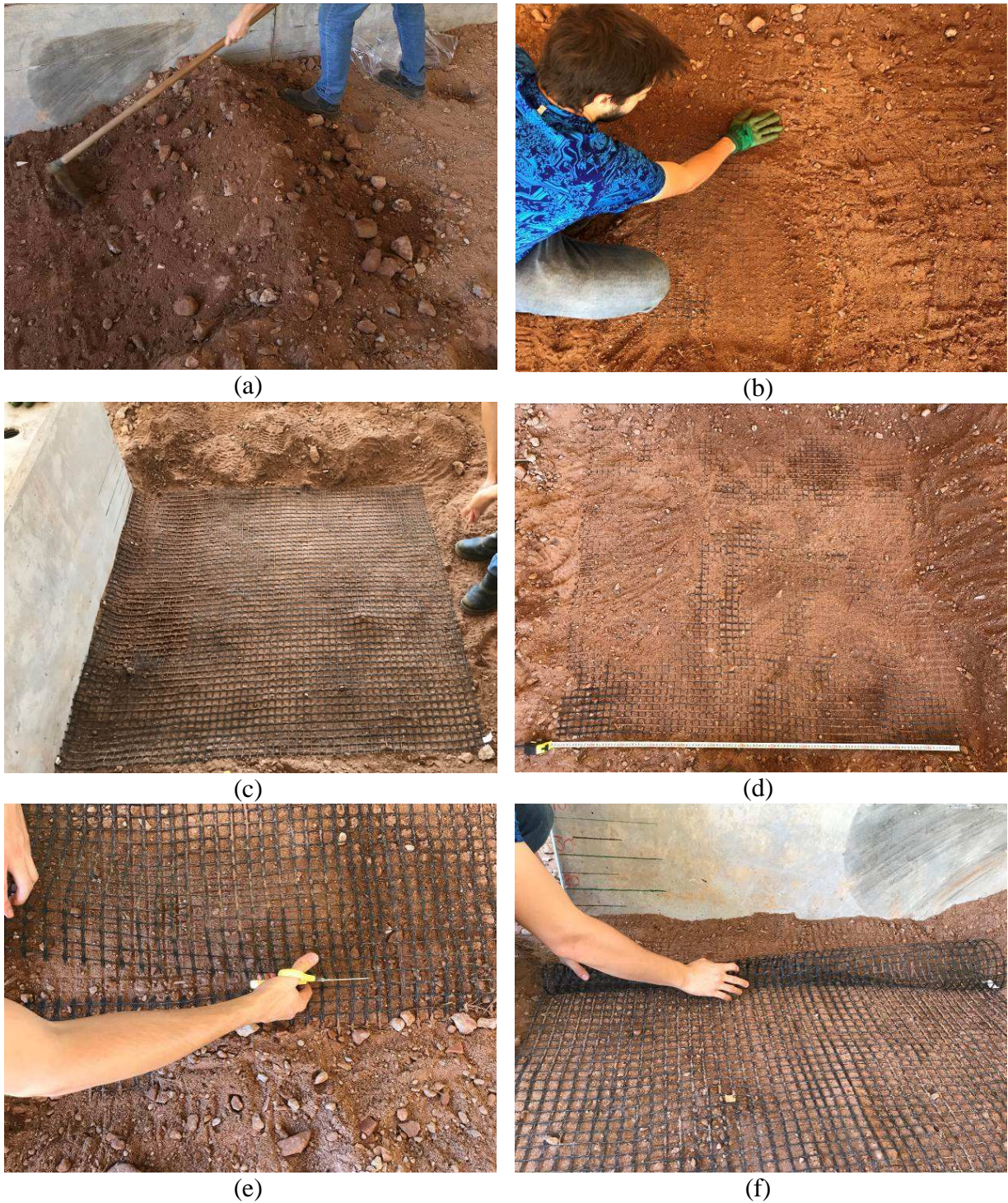
Figura 3.21 – Procedimento de coleta dos RCD-R 06 e RCD-R 07.



A exumação das geogrelhas consistiu em um conjunto de processos que envolveram: i) a remoção do material mais superficial (cerca de 150 mm) com enxada; e ii) a retirada do RCD-R mais próximo às geogrelhas realizada manualmente – sem o auxílio de ferramentas. Esse procedimento foi sendo realizado em regiões de 1,30 m x 1,40 m, o que possibilitou a

exumação das geogrelhas em trechos (cada um com 1,20 m x 1,30 m). A Figura 3.22 apresenta as etapas relativas ao processo de exumação das geogrelhas.

Figura 3.22 – Exumação das geogrelhas: (a) remoção inicial do material de preenchimento com enxada; (b) retirada manual do RCD-R mais próximo a geogrelha; (c) visualização do segmento de geogrelha completo; (d) medição do comprimento do segmento; (e) corte da geogrelha; e (f) procedimento de acondicionamento da geogrelha para estocagem.

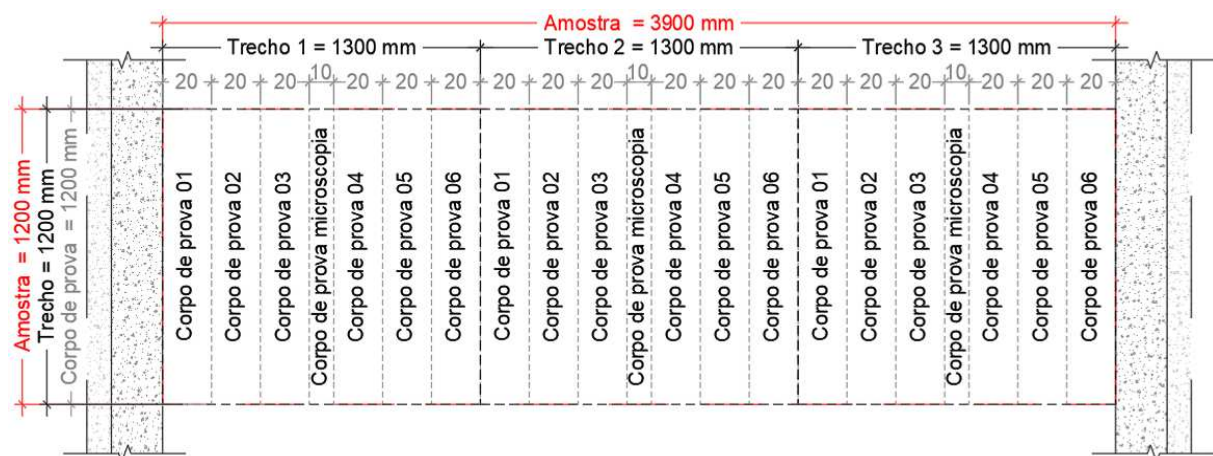


3.2.5 Ensaio de resistência à tração em geogrelhas

Os ensaios de resistência à tração das geogrelhas foram efetuados no Laboratório de Geossintéticos da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP), entre os dias 23 e 27 de outubro de 2017. O transporte das 36 amostras de geogrelhas foi realizado de ônibus, com todas as amostras enroladas em conjunto, envoltas por saco plástico, plástico bolha e duas camadas de papelão.

Cada trecho de geogrelha (1,30 m x 1,20 m) foi dividida em sete corpos de prova (Figura 3.23), sendo seis destinados para os ensaios de resistência à tração e um para a análise visual dos danos. Apesar da possibilidade de efetuar ensaios de resistência à tração com os corpos de prova preparados para tal, optou-se por fazê-los com apenas cinco amostras, o que permitiria executar um ensaio de contraprova, caso necessário.

Figura 3.23 – Divisão das amostras em corpos de prova para o ensaio de resistência à tração.



Os ensaios de resistência à tração foram efetuados segundo as recomendações da “*American Society for Testing and Materials*” (ASTM) D 6637-01 – “*Standard test method for determining tensile properties of geogrids by the single or multi-rib tensile method*” método B, numa prensa universal dotada com garras de rolete (Figura 3.24). O ensaio foi efetuado com deformação constante de 10%/min e com pré-carga abaixo de 10% da carga última prevista – informada pelo fabricante de cada geogrelha.

Figura 3.24 – Prensa universal de ensaios com garras de rolete.



3.2.6 Quantificação dos danos de instalação

Os efeitos dos danos de instalação nas propriedades mecânicas da geogrelha foram avaliados por meio da i) análise de resistência à tração de pico, ii) deformação na ruptura e iii) módulo de elasticidade inicial, conforme indicado por Allan e Bathurst (1994).

Inicialmente, determinou-se um intervalo de confiança de resistência à tração abrangendo os resultados dos ensaios dos cinco corpos de prova virgens. O intervalo foi determinado com base na média de resistência à tração de pico das amostras virgens (\bar{T}_V) atrelada a uma análise estatística. Adotou-se a Distribuição t de Student (Equação 3.1), indicada para análises em que o número de amostras (n) é inferior a trinta e a média populacional (μ) é desconhecida. Assim, o intervalo foi calculado com o uso da Equação 3.2.

$$t = \frac{\bar{T}_V - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (3.1)$$

$$\bar{T}_V \pm \frac{t \cdot s}{\sqrt{n}} \quad (3.2)$$

Onde:

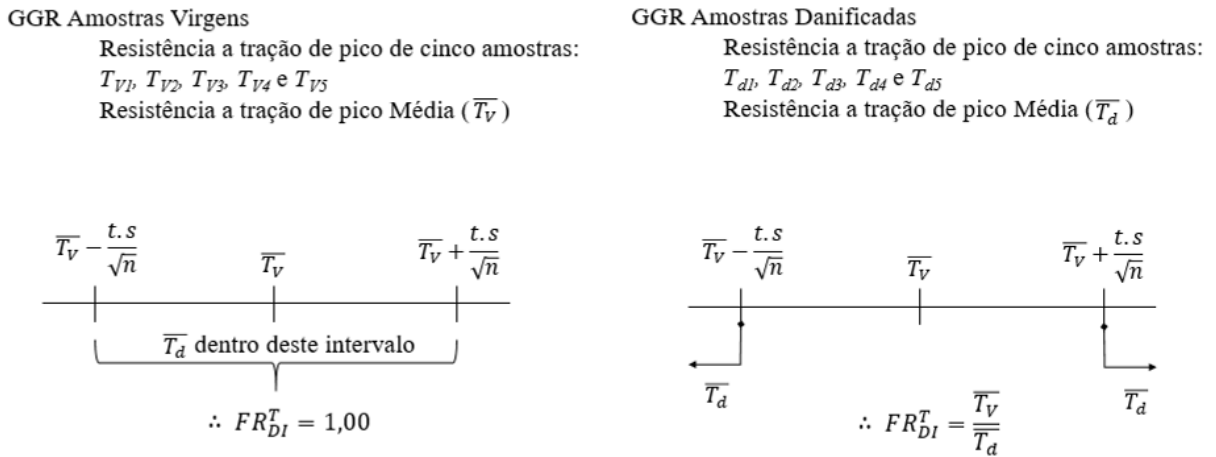
- $\bar{T}_V =$ média da resistência à tração de pico;
 $s =$ desvio padrão amostral;
 $t =$ variável aleatória da Distribuição de Student;
 $\mu =$ média populacional; e
 $n =$ número de amostras.

A variável t é função do grau de liberdade ($n-1$) e do nível de confiança (NC). Em virtude das variáveis \bar{T}_V , s e n não variarem para um cenário analisado, para definir o intervalo que abrange as cinco amostras virgens, o valor de NC foi encontrado.

Após determinado o intervalo de resistência à tração dos corpos de prova virgem, foi verificado se a média da resistência à tração de pico dos corpos de prova das geogrelhas danificadas (\bar{T}_d) de cada configuração de ensaio se encontrava no intervalo estabelecido ($\bar{T}_V - \frac{t.s}{\sqrt{n}} < \bar{T}_d < \bar{T}_V + \frac{t.s}{\sqrt{n}}$). Em caso positivo, considerou-se que não houve dano no cenário avaliado e, assim, atribuiu-se um fator de redução devido ao dano de instalação em relação à resistência à tração de pico (FR_{DI}^T) igual a 1,00. Nos casos em que $\bar{T}_d < \bar{T}_V - \frac{t.s}{\sqrt{n}}$, considerou-se a ocorrência de dano de instalação, e FR_{DI}^T foi calculado pela Equação 3.3. Caso $\bar{T}_d > \bar{T}_V + \frac{t.s}{\sqrt{n}}$, o que indicaria a ocorrência de “ganho” de resistência à tração da geogrelha após a simulação dos danos, calculou-se o FR_{DI}^T segundo a Equação 3.2, porém o resultado é menor que 1,00. A Figura 3.25 ilustra as explicações acima realizadas.

$$FR_{DI}^T = \frac{\bar{T}_V}{\bar{T}_d} \quad (3.3)$$

Figura 3.25 – Procedimento de quantificação dos danos.



Para as propriedades mecânicas de deformação e módulos de rigidez, foram utilizadas as Equações 3.4 e 3.4, respectivamente.

$$FR_{DI}^\varepsilon = \frac{\bar{\varepsilon}_v}{\bar{\varepsilon}_d} \quad (3.4)$$

$$FR_{DI}^{X\%} = \frac{\bar{J}_{sec_V}^{X\%}}{\bar{J}_{sec_d}^{X\%}} \quad (3.5)$$

Onde:

$FR_{DI}^\varepsilon =$ fator de redução devido ao dano de instalação em relação a deformação na ruptura;

$\bar{\varepsilon}_v =$ média da deformação na ruptura das amostras virgens;

$\bar{\varepsilon}_d =$ média da deformação na ruptura das amostras danificadas;

$FR_{DI}^{X\%} =$ fator de redução devido ao dano de instalação em relação a rigidez com $X\%$ de deformação;

$\bar{J}_{sec_V}^{X\%} =$ média da rigidez secante das amostras virgens com $X\%$ de deformação;

$\bar{J}_{sec_d}^{X\%} =$ média da rigidez secante das amostras danificadas com $X\%$ de deformação.

Além da quantificação dos danos por meio dos fatores de redução supracitados, buscou-se avaliar a porcentagem de redução da resistência à tração de pico (*PSR*) através da Equação 3.6.

$$PSR = \frac{\overline{T}_v - \overline{T}_d}{\overline{T}_v} \cdot 100 \quad (3.6)$$

3.2.7 Análise visual dos danos mecânicos de instalação

Com intuito de auxiliar nas análises de resultados e melhor caracteriza-los, foram realizadas análises visuais dos danos mecânicos de instalação. A região central das amostras destinadas a microscopia (Figura 3.23) foi analisada quanto a ocorrência de danos caracterizados da seguinte forma:

- ◆ Abrasão: diminuição da espessura do revestimento, podendo apresentar fibras rompidas do elemento analisado; apresenta coloração diferenciada devido à exposição das fibras (Figura 3.26a);
- ◆ Separação: divisão ou segmentação do elemento analisado em dois ou mais elementos atrelados à visualização das fibras expostas (Figura 3.26b);
- ◆ Contusão: elementos que sofreram danos pontuais e apresentam-se esmagados ou achatados (Figura 3.26c); e
- ◆ Corte: elemento rompido completamente (Figura 3.26d).

Para padronizar a análise dos três tipos de geogrelhas, procurou-se analisar uma área de 100 mm na direção longitudinal por 3 fibras na direção transversal, equivalente a 70 mm (Figura 3.27). Os danos foram quantificados somente na região interior do retângulo vermelho na área efetiva ocupada pela geogrelha (A_{efet}), sendo esta “calculada” subtraindo o somatório da área aberta da malha (A_{aberta}) da região delimitada em vermelho (Figura 3.27).

Por convenção, adotou-se que a A_{efet} possui três tipos de elementos diferentes: i) elementos longitudinais (EL), ii) elementos transversais (ET) e iii) nó – encontro entre os elementos longitudinais e transversais – (NÓ). Desta forma, os quatro tipos de dano analisados foram quantificados nestas regiões para cada cenário simulado na instalação. Primeiramente, foram

definidas as quantidades de EL, ET e NÓ analisados em cada geogrelha a partir da A_{efet} (Tabela 3.7). A GGPVA possui menor quantidade de regiões pois a abertura da malha é maior que as demais geogrelhas analisadas (Tabela 3.3).

Figura 3.26 – Danos mecânicos de instalação: a) abrasão, b) separação, c) contusão e d) corte.

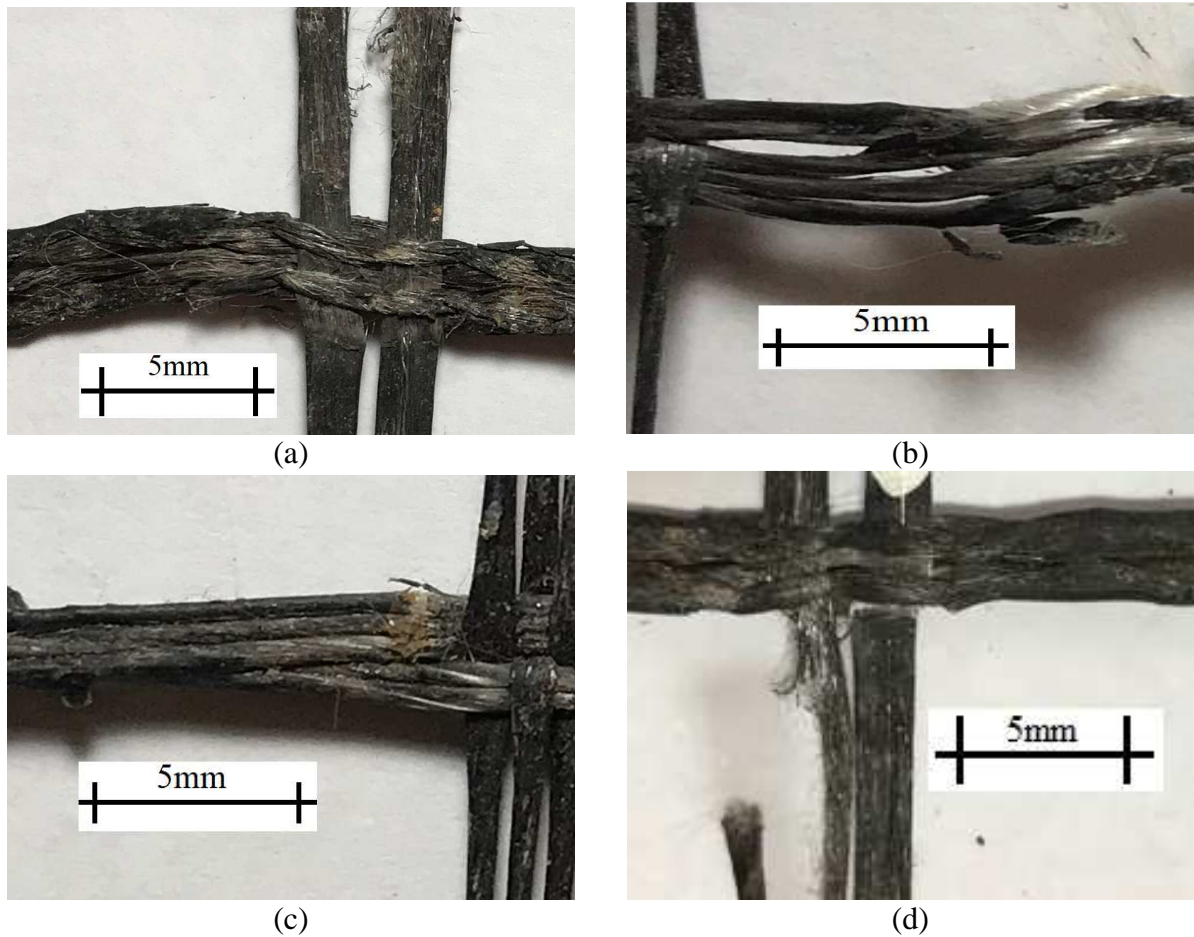


Figura 3.27 – Região analisada das geogrelhas.

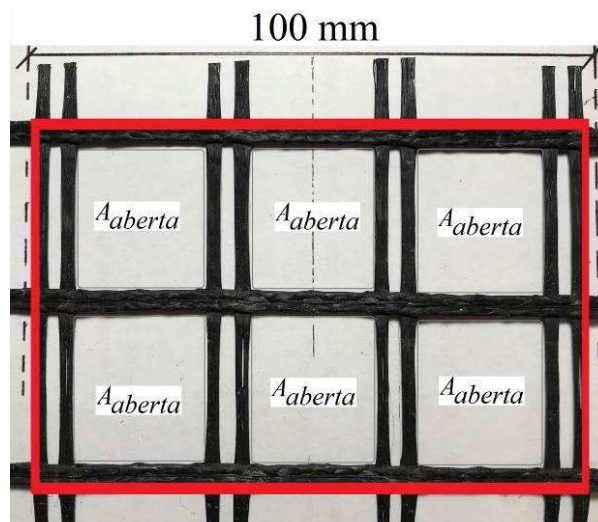


Tabela 3.7 – Quantidade de elementos transversais (ET), elementos longitudinais (EL) e nós (NÓ) avaliados por geogrelha.

	GGPVA	GGPET 01	GGPET 02
EL	9	12	12
ET	6	8	8
NÓ	6	9	9

Os danos foram quantificados mediante a sua ocorrência nos elementos. Por exemplo, a eventual existência de dano caracterizado como abrasão em dois elementos transversais (ET) na GGPET 02 seria expresso como 2/8 (unidades danificadas / unidades analisadas), ou seja, um dano por abrasão de 25% nos elementos transversais.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos pelos ensaios de i) caracterização geotécnica das amostras de RCD-R, ii) resistência à tração das geogrelhas virgens e danificadas e iii) análise visual dos danos de instalação.

4.1 RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO RECICLADOS (RCD-R)

Este subitem apresenta os resultados da caracterização geotécnica das amostras de RCD-R coletadas previamente (RCD-R 01 a 05) e durante a exumação das geogrelhas (RCD-R 06 e 07). Os resultados serão verificados para a aplicação do RCD-R em obras de pavimentação e estrutura de solo reforçado com geossintético.

4.1.1 Análise gravimétrica

Os resultados da análise gravimétrica revelaram a predominância de quatro materiais em todas as amostras: i) solo, ii) concreto, iii) argamassa e iv) cerâmica vermelha (tijolos); semelhante a resultados encontrados por Angulo (2000), Santos (2007, 2011), Oliveira *et al.* (2011), Herrador *et al.* (2012) e Mália *et al.* (2013). Os resultados obtidos pelo ensaio de gravimetria estão apresentados na Tabela 4.1 e Figura 4.1, em massa e porcentagem de cada constituinte, respectivamente.

Constatou-se que os quatro materiais citados compõem, em média, 96,66% em massa das amostras, mostrando uma pequena variabilidade ($CV=1,76\%$), ou seja, menos de 5% do material é composto por outros materiais (rocha alterada, cerâmica polida, metais, tecido, papelão e etc.), permitindo, assim, classificar o material ensaiado como RCD-R Classe A (CONAMA, 2012).

Vale ressaltar a presença, em média, de 26,35% de concreto na composição das amostras, um material tido como ‘valioso’ para as usinas de reciclagem e capaz de conferir ao RCD-R um

melhor comportamento mecânico. Por outro lado, observou-se que, em média, 14,47% da massa do RCD-R é composta por argamassa, um material que, em alguns casos, pode afetar o comportamento mecânico do material conferindo-lhe menor resistência e uma maior permeabilidade.

Tabela 4.1 – Resultados da gravimetria em massa.

Constituintes	Amostras RCD-R						
	01	02	03	04	05	06	07
Solo	4743,64	5790,65	5151,72	5281,66	3525,06	5914,99	6061,17
Concreto	4046,88	1845,32	3060,80	2497,31	2572,77	2735,00	2423,00
Argamassa	840,20	1725,57	1298,60	1572,33	2591,50	926,60	1196,07
Cerâmica	150,90	283,37	272,38	361,10	600,10	225,45	161,59
Cerâmica polida	17,58	139,35	48,22	58,91	309,44	105,78	56,16
Rocha alterada	149,69	111,08	114,71	163,48	249,85	87,25	102,29
Material asfáltico	38,13	97,01	54,28	45,84	90,66	27,34	22,89
Carvão	N.P	0,17	N.P	N.P	N.P	N.P	N.P
Fibrocimento	6,86	N.P	N.P	2,81	N.P	N.P	N.P
Gesso	16,41	14,03	6,53	20,84	41,10	3,80	2,49
Isopor	N.P	N.P	N.P	0,05	N.P	N.P	N.P
Madeira	0,20	0,53	0,59	1,14	0,99	0,20	0,67
Matéria Orgânica	N.P	N.P	N.P	N.P	10,32	0,31	1,80
Metal	N.P	N.P	2,17	12,53	23,55	N.P	1,35
Papel	N.P	0,16	N.P	N.P	N.P	N.P	N.P
Papelão	N.P	N.P	N.P	0,09	N.P	N.P	N.P
Plástico	1,05	0,05	N.P	0,44	N.P	3,88	N.P
Tecido	N.P	N.P	N.P	N.P	2,45	0,24	2,82
Vidro	N.P	1,30	N.P	1,47	1,81	N.P	0,56
Outros	N.P	0,48	N.P	N.P	N.P	N.P	N.P
Massa TOTAL	10011,5	10009,1	10010,0	10020,0	10019,6	10030,8	10032,8

N.P = Não presente

4.1.2 Peso específico dos grãos que passam na peneira de 4,8 mm

Os resultados revelaram que, apesar da variabilidade esperada para esse tipo de material, os valores do peso específico dos grãos que passam pela peneira de 4,8 mm apresentaram uma baixa variabilidade ($CV = 0,63\%$), com valor médio de $26,97 \text{ kN/m}^3$. A Tabela 4.2 apresenta os resultados obtidos do peso específico dos grãos das sete amostras ensaiadas.

O valor médio do peso específico das sete amostras de RCD-R ensaiadas mostrou-se próximo: i) aos pesos específicos encontrados em outras cidades (Tabela 2.4), ii) em relação à agregados reciclados provenientes da cidade de Goiânia–GO – estudados por Ribeiro (2006), Resplandes (2007) e Ribeiro (2007), e iii) e dentro do intervalo aferido por Luiz (2012) para o

solo da região. Porém, o mesmo valor encontra-se 22,6% superior ao peso específico médio encontrado por Angulo e John (2002). Esse resultado pode ser justificado pela diferença de enfoque dado ao estudo do RCD-R.

Figura 4.1 – Composição gravimétrica das amostras RCD-R (a) 01, (b) 02, (c) 03, (d) 04, (e) 05, (f) 06 e (g) 07.

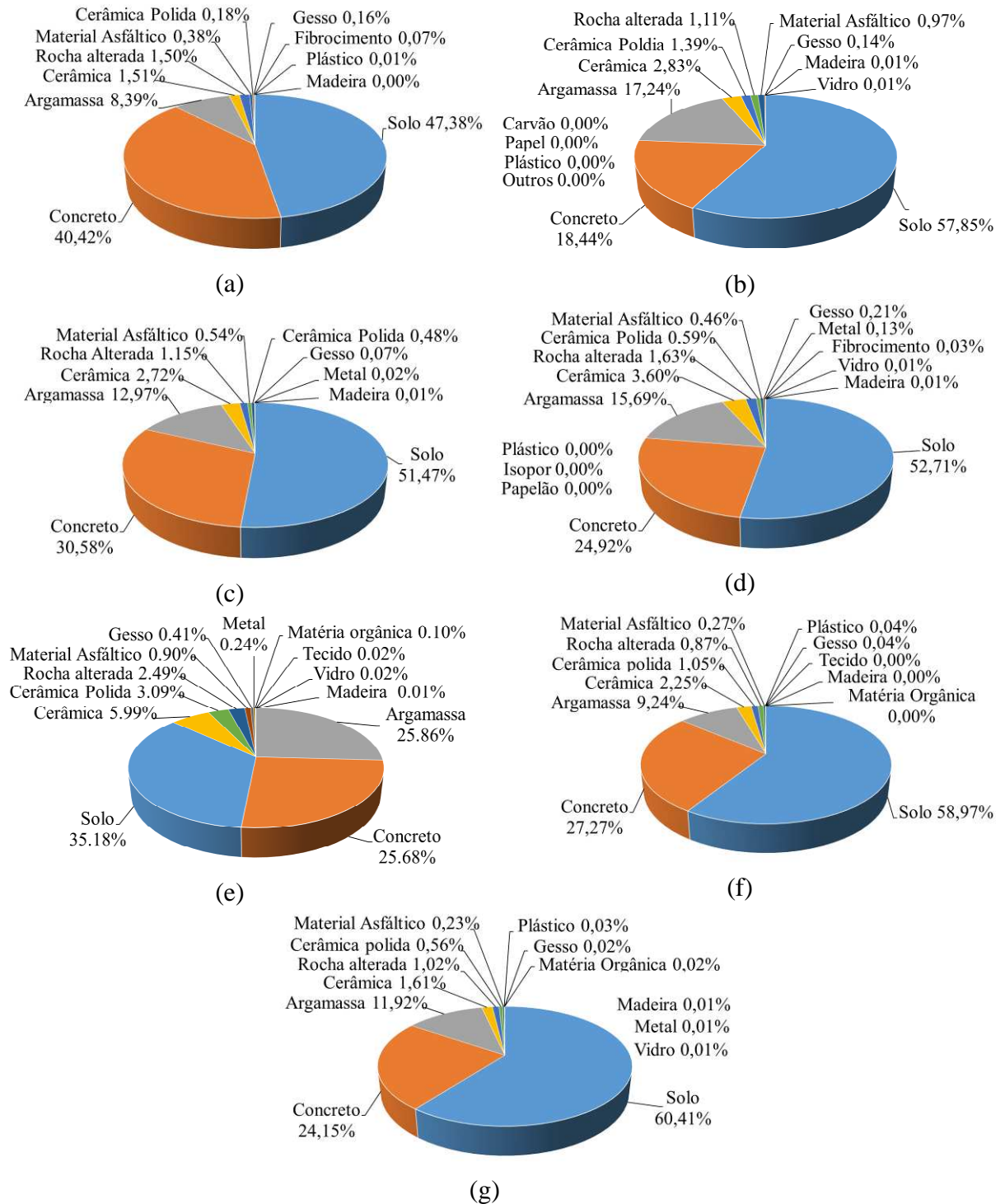


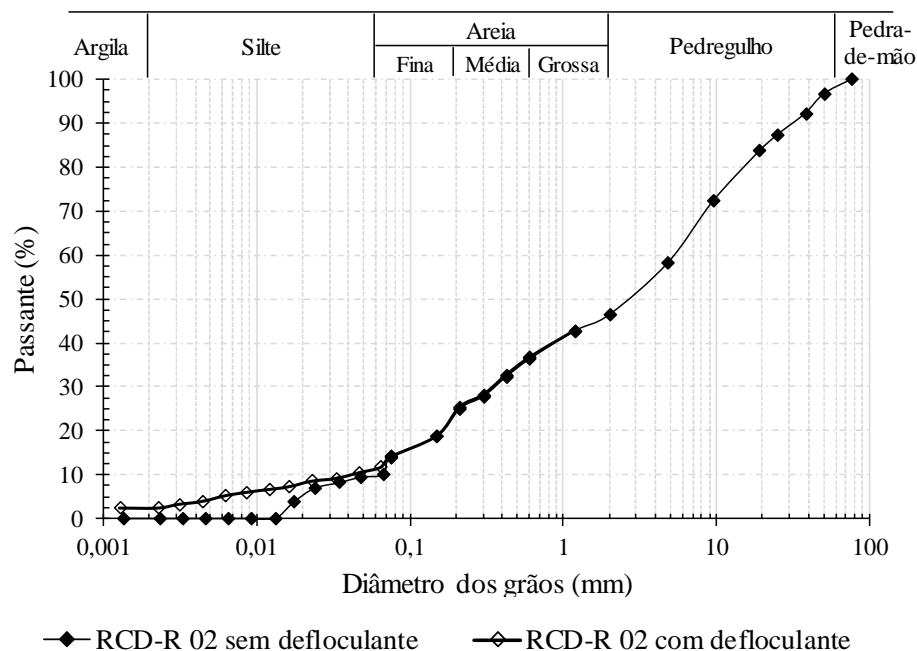
Tabela 4.2 – Peso específico dos grãos passantes na peneira de 4,8 mm das amostras de RCD-R.

Amostras	γ (kN/m ³)
RCD-R 01	26,77
RCD-R 02	26,76
RCD-R 03	26,99
RCD-R 04	26,93
RCD-R 06	26,93
RCD-R 06	27,18
RCD-R 07	27,14
Média (CV)	26,97 (0,63%)

4.1.3 Análise Granulométrica

A análise de distribuição granulométrica do RCD-R revelou uma pequena influência do uso do defloculante (hexametáfosfato de sódio) na curva granulométrica do material. Comportamento semelhante foram identificados nas demais amostras ensaiadas e também no estudo realizado por Dias (2014). A Figura 4.2 apresenta, como exemplo, as curvas granulométricas com e sem defloculante da amostra RCD-R 02.

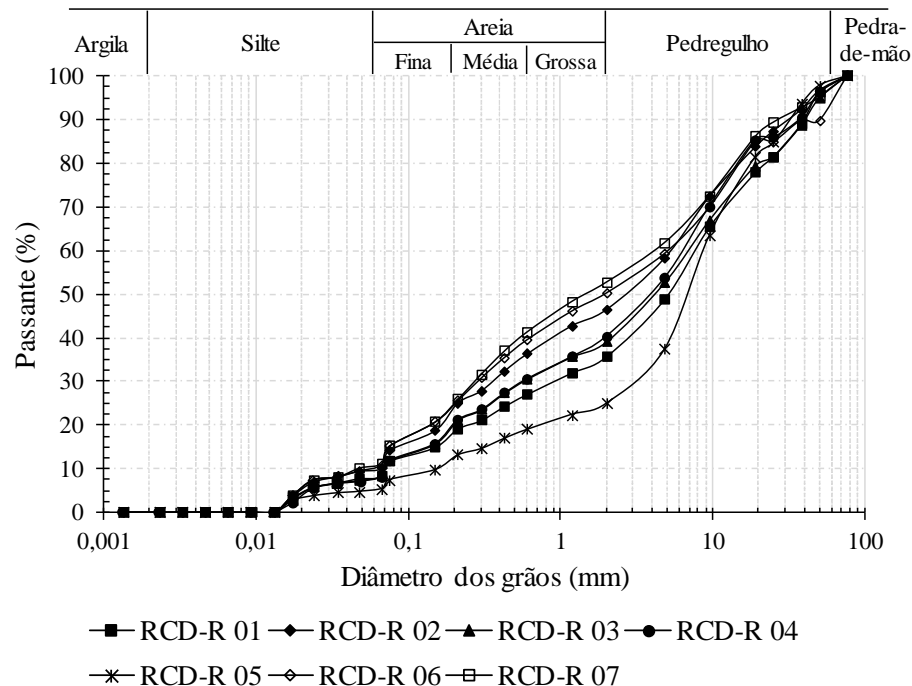
Figura 4.2 – Curvas granulométricas com e sem defloculante da amostra RCD-R 02.



A avaliação da distribuição granulométrica de todas as sete amostras ensaiadas neste estudo revelou a presença de uma variabilidade que deve ser considerada, porém está atribuída à amostra RCD-R 05. Esse resultado pode ser justificado por algum acontecimento ocorrido no dia de produção dessa amostra, tendo em vista que as demais amostras apresentaram uma

variabilidade menor, o que remete a um processo de produção uniforme realizado pela usina de reciclagem. Uma pequena variabilidade também foi encontrada por outros trabalhos da literatura, como Barbosa (2017), Araujo Neto (2017), Barbosa, Silva e Santos (2016) e Santos (2011; 2007). A Figura 4.3 apresenta as curvas de distribuição granulométrica das sete amostras ensaiadas.

Figura 4.3 – Distribuição granulométrica das amostras ensaiadas.



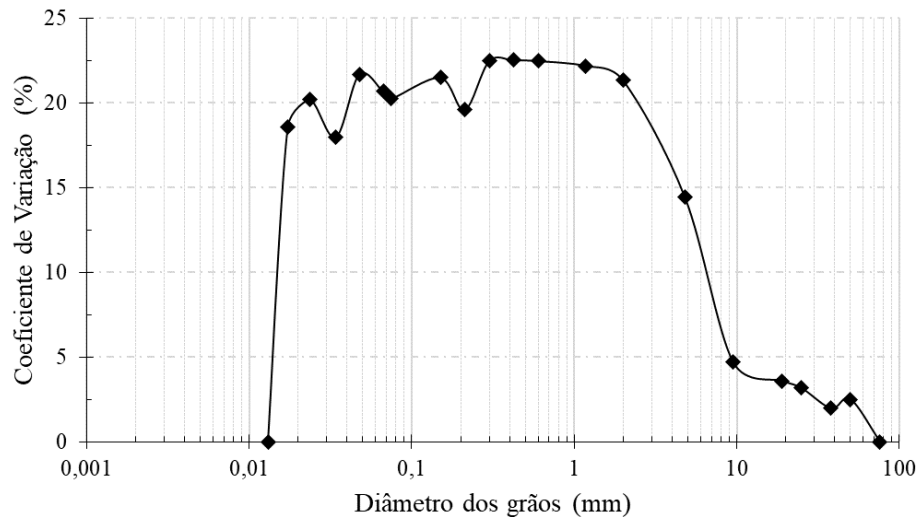
4.1.3.1 Variabilidade da distribuição granulométrica

Ao analisar o CV do percentual de material passante *versus* o diâmetro dos grãos (Figura 4.4), verifica-se que, entre os diâmetros de 0,02 mm e 9 mm, estão concentrados os valores mais altos do CV. Esse fato justifica a diferença nas curvaturas das amostras na região analisada, conforme pode ser observado na Figura 4.3.

Além disso, verificou-se que o trecho analisado (0,02mm a 9mm) é influenciado pela composição gravimétrica da amostra, mais precisamente, pelos teores de solo, concreto e argamassa. Ao analisar as amostras RCD-R 07, RCD-R 03, RCD-R 04 e 05 é validada essa afirmação. A amostra de RCD-R 05 apresenta o menor teor de solo (35,18%) e maior teor de concreto e argamassa (51,54%). O contrário pode ser observado na amostra RCD-R 07, que possui maior teor de solo (60,41%) e baixo teor de concreto e argamassa (36,07%). Já as

amostras RCD-R 03 e RCD-R 04 apresentam teores de solo, concreto e argamassa semelhantes, fazendo com que as distribuições granulométricas das duas amostras se encontrem praticamente sobrepostas.

Figura 4.4 – Relação coeficiente de variação do percentual de material passante *versus* diâmetro dos grãos.



Devido à variabilidade inerente ao material RCD-R, a melhor representação de sua granulometria é dada por uma faixa granulométrica conforme está apresentado na Figura 4.5. A faixa granulométrica do RCD-R apresentada engloba as cinco amostras inicialmente caracterizadas, tendo em vista que as demais amostras (RCD-R 06 e RCD-R 07) foram coletadas após a realização dos procedimentos de compactação, ou seja, estas últimas tendem a apresentar maior quantidade de finos devido à quebra dos agregados que ocorrera durante a compactação em campo, conforme observado na Figura 4.5.

4.1.3.2 Classificação das amostras ensaiadas

Em decorrência do estudo tratar o RCD-R com enfoque para obras geotécnicas, faz-se necessário classificá-lo como solo, de acordo com os sistemas de classificação da i) ABNT, por meio da NBR 6502 – Rochas e solos (ABNT, 1995), ii) Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), por meio da norma ASTM D 2487 – “*Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)*” (ASTM, 2006) e iii) Sistema Rodoviário de Classificação (“*Transportation Research Board*”) – TRB, por meio do Manual de Pavimentação (BRASIL, 2006). As faixas granulométricas de cada amostra e suas classificações estão sumarizadas na Tabela 4.3.

Figura 4.5 – Faixa granulométrica das amostras de RCD-R ensaiadas.

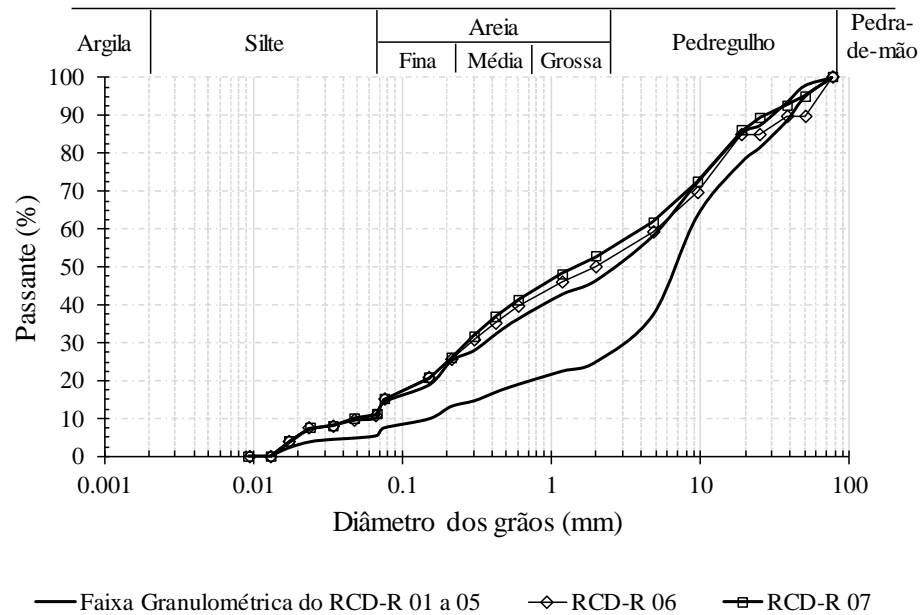


Tabela 4.3 – Faixas granulométricas segundo NBR (6502) e classificação das amostras.

Frações	Amostras						
	RCD-R 01	RCD-R 02	RCD-R 03	RCD-R 04	RCD-R 05	RCD-R 06	RCD-R 07
Matacão	-	-	-	-	-	-	-
Pedra-de-mão	1,0	1,0	2,5	2,0	1,5	2,5	2,5
Pedregulho	63,0	52,5	59,0	58,0	73,5	47,5	45,0
Areia	28,0	36,6	30,5	32,5	20,0	40,0	42,0
Silte	8,0	10,0	8,0	7,5	5,0	10,0	10,5
Argila	-	-	-	-	-	-	-

Classificação							
ABNT	Pedregulho arenoso						
SUCS	GW-GM	SP-SM	SP-SM	SP-SM	GP-GM	SP-SM	SP-SM
TRB	A-1-a	A-1-b	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-b	A-1-b
C_{NU}	-	-	-	-	-	84,17	0,26
C_c	-	-	-	-	-	80,00	0,34

GW-GM – Pedregulho bem graduado com silte

SP-SM – Areia mal graduada com silte

GP-GM – Pedregulho mal graduado com silte

A-1-a – Assemelha a pedregulho bem graduado

A-1-b – Assemelha a areia bem graduada

Com a análise das faixas granulométricas, verifica-se que as sete amostras devem ser consideradas como pedregulho arenoso, visto que em todas ocorrem a predominância de pedregulho, areia e silte, sequencialmente. A faixa granulométrica relativa ao pedregulho

apresentou menor variação – valor de CV igual a 15,8%; em relação as faixas de areia e silte – valores de CV iguais a 21,2%. Analisando a parte mais fina (silte e argila), observou-se que todas as amostras apresentam pouca quantidade de finos, justificando, assim, a pequena diferença encontrada nas distribuições granulométricas com e sem defloculante.

Quanto aos sistemas de classificação SUCS apenas as amostras RCD-R 01 e RCD-R 05 foram classificadas como pedregulho – assim como a classificação pela ABNT. As demais amostras foram enquadradas como areia. De acordo com o sistema de classificação TRB, as amostras RCD-R 02, RCD-R 06 e RCD-R 07, são classificadas como areias, e as demais, como solo pedregulhoso.

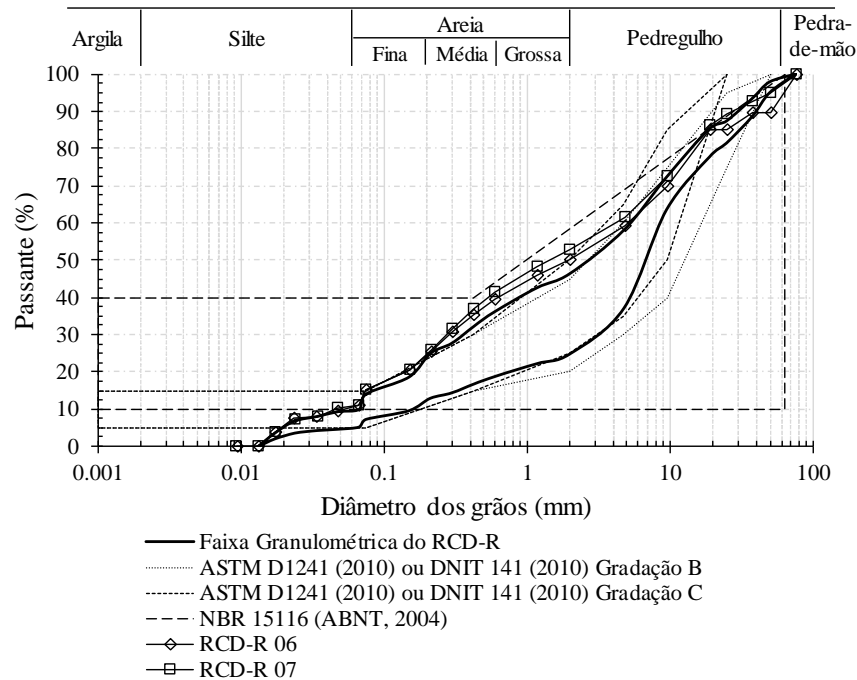
4.1.3.3 Aplicação do material em obras geotécnicas

A análise da adequação granulométrica do RCD-R para uso em obras de pavimentação revelou que 7,12% da faixa granulométrica está fora da gradação preconizada pela NBR 15116 – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – utilização em pavimentação e reparo de concreto sem função estrutural – (ABNT, 2004), relativa a agregados reciclados. Segundo as gradações B e C preconizadas pelo DNIT 141 – Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente (BRASIL, 2010) e pela ASTM D1241-00 – “*Standard specification for materials for soil-aggregate subbase, base, and surface courses*” (ASTM, 2000), Verificou-se que apenas 8,34% da faixa granulométrica não atende a Gradação B, enquanto esse valor é de 10,99% para a gradação C. Desse modo, constata-se que o RCD-R caracterizado neste estudo atende aos requisitos de distribuição granulométrica para aplicação em obras de pavimentação, tendo em vista que, no máximo, 11% da faixa granulométrica não está de acordo com as normativas nacionais. A Figura 4.6 apresenta a faixa granulométrica das amostras de RCD-R e as gradações do material de preenchimento para aplicação em obras de pavimentação.

A avaliação da conformidade granulométrica do RCD-R para uso em estruturas de solo reforçado (ESR) revelou que todas as amostras corresponderam às especificações preconizadas pelas normas internacionais BS 8006 (2010), FHWA (2010) e NCMA (2010), conforme mostrado na Figura 4.7. Ademais, no geral, as amostras atendem aos requisitos

propostos pela normativa alemã (EBGEO, 2011⁴ *apud* Vieira; Pereira, 2015b), que valida a aplicação em ESR de material classificados como SP, GP e GW pelo SUCS.

Figura 4.6 – Faixa granulométrica das amostras de RCD-R e gradações de materiais para aplicação em obras de pavimentação (a partir de ABNT, 2004; DNIT 141, 2010; ASTM D1241-00, 2000).



Os resultados encontrados condizem com as afirmações de alguns autores quanto a possibilidade de aplicação de agregados reciclados em obras geotécnicas como material de preenchimento (SANTOS, 2007, 2011; SANTOS, VILLAR; PALMEIRA, 2010; VIEIRA; PEREIRA, 2015b; CARDOSO *et al.*, 2016).

4.1.4 Limites de Consistência

A realização do ensaio de limite de liquidez (w_l) revelou que somente a RCD-R 01 apresentou w_l (24,1%); enquanto que, para as demais amostras, dois comportamentos distintos foram observados: i) não obtenção de um número de golpes (N) superior a dez (Figura 4.8a) e ii) redução do número de golpes após secagem do material (Figura 4.8b). Quanto ao limite de plasticidade (w_p), os ensaios revelaram que as amostras não apresentam limite de plasticidade

⁴ EBGEO. Recommendations For Design and Analysis of Earth Structures Using Geosynthetic Reinforcements—EBGEO. German Geotechnical Society: Ernst & Sohn GmbH & Co. KG. 2011.

(Nw_p), com o material não possibilitando a moldagem do cilindro de 3 mm de diâmetro (Figura 4.9). Como não foi identificado em nenhuma amostra limite de plasticidade, todas as amostras foram consideradas não plásticas (NP). A Tabela 4.4 resume os resultados de w_l , w_p e índice de plasticidade (IP) encontrados para as cinco amostras ensaiadas

Figura 4.7 – Gradação de materiais para aplicação em estruturas de solo reforçado (a partir de BS 8006, 2010; NCMA, 2010; FHWA, 2010).

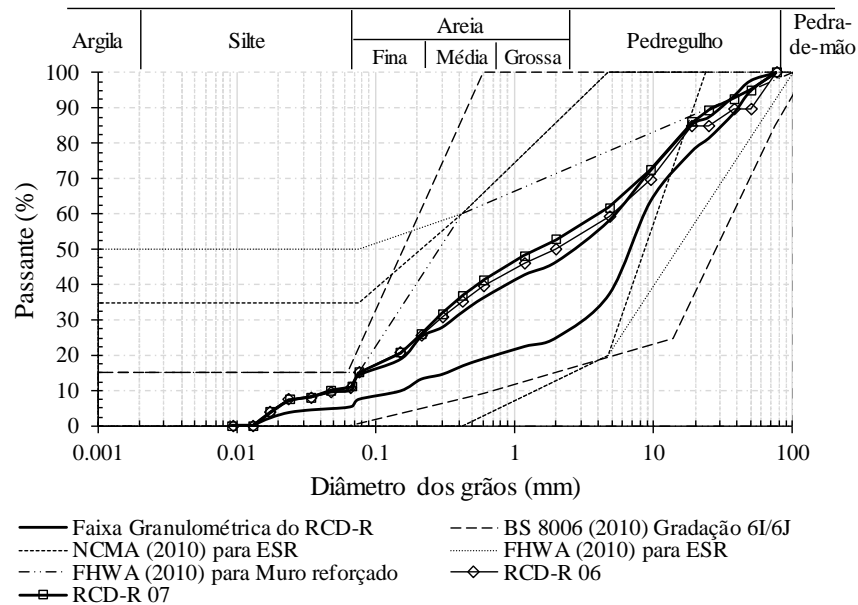
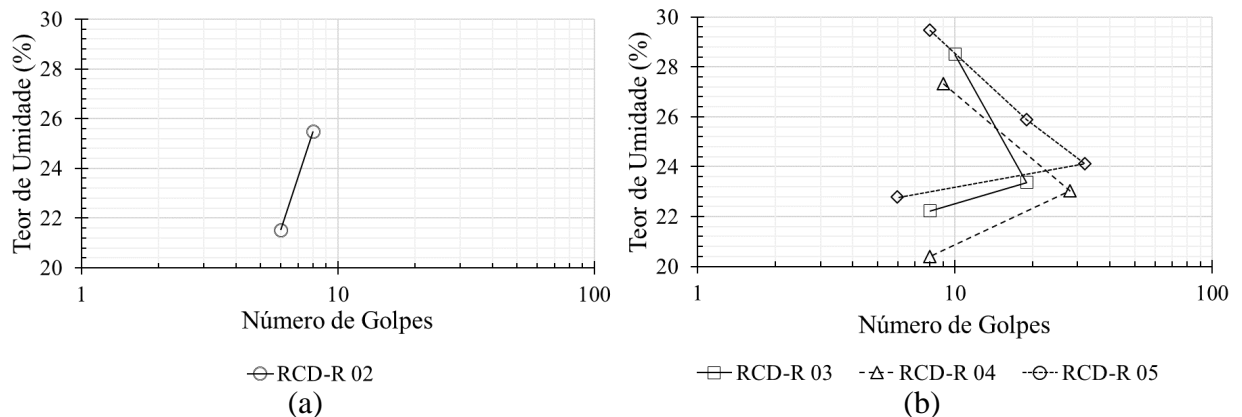


Figura 4.8 – Relação N versus w para as amostras (a) RCD-R 02, (b) RCD-R 03, RCD-R 04 e RCD-R 05.



Os resultados encontrados em relação a plasticidade do RCD-R em estudo estão de acordo com os resultados apresentados na literatura (Tabela 2.4) e validam a sua aplicação em ESR com geossintéticos segundo as recomendações da FHWA (2010) e BS 8006 (2010). Sua

aplicação em obras de pavimentação também é válida de acordo com as normas ASTM D1241-00 (ASTM, 2000) e DNIT 141 (DNIT, 2010).

Figura 4.9 – Ensaio de limite de plasticidade da amostra RCD-R 03: (a) parcela da amostra separada para obter a forma de um cilindro; (b) tentativa de obter o cilindro com três milímetros de diâmetro.



Tabela 4.4 – Resumo dos resultados de WL, WP e IP das amostras de RCD-R.

	Amostras	
	RCD-R 01	RCD-R 02 a RCD-R 07
w_l	24,1%	Nw_l
w_p	Nw_p	Nw_p
IP	NP	NP

4.1.5 Compactação

O ensaio de compactação com energia de compactação Proctor Normal com reuso revelou um valor do peso específico seco máximo ($\gamma_{d_máx}$) médio de 18,11 kN/m³, com valor de CV igual a 2,30%, e umidade ótima ($w_{ótima}$) média de 14,6%, com valor de CV igual a 8,41%. Os valores médios encontrados estão coerentes com os resultados obtidos na literatura (Tabela 2.4). As curvas de compactação das sete amostras de RCD-R estão apresentadas na Figura 4.10.

É possível verificar que a curva relativa à amostra RCD-R 01 exibiu maior valor de $\gamma_{d_máx}$. Esse comportamento justifica-se pela composição do material, que possui o maior teor de materiais oriundos do cimento Portland – detentor de um elevado peso específico – e o menor teor de argamassa – material de menor peso específico – dentre as amostras ensaiadas.

Quanto à umidade ótima, os resultados revelaram que, quanto maior o teor de agregados cerâmicos, maior será a $w_{ótima}$ da amostra analisada. A amostra RCD-R 01 apresentou o menor

teor de materiais cerâmicos (1,51%) e a menor umidade ótima (12,4%). Por outro lado, a amostra RCD-R 05 revelou o maior teor de cerâmica (5,99%), o que resultou na umidade ótima mais elevada (15,8%) das amostras analisadas. Essas análises condizem com os estudos de Brito, Pereira e Correia (2005), Silva, Brito e Dhir (2014) e Cardoso *et al.* (2016). A Tabela 4.5 resume os valores encontrados de $\gamma_{d_máx}$ e $W_{ótima}$ das amostras ensaiadas.

Figura 4.10 – Curvas de compactação das amostras de RCD-R ensaiadas.

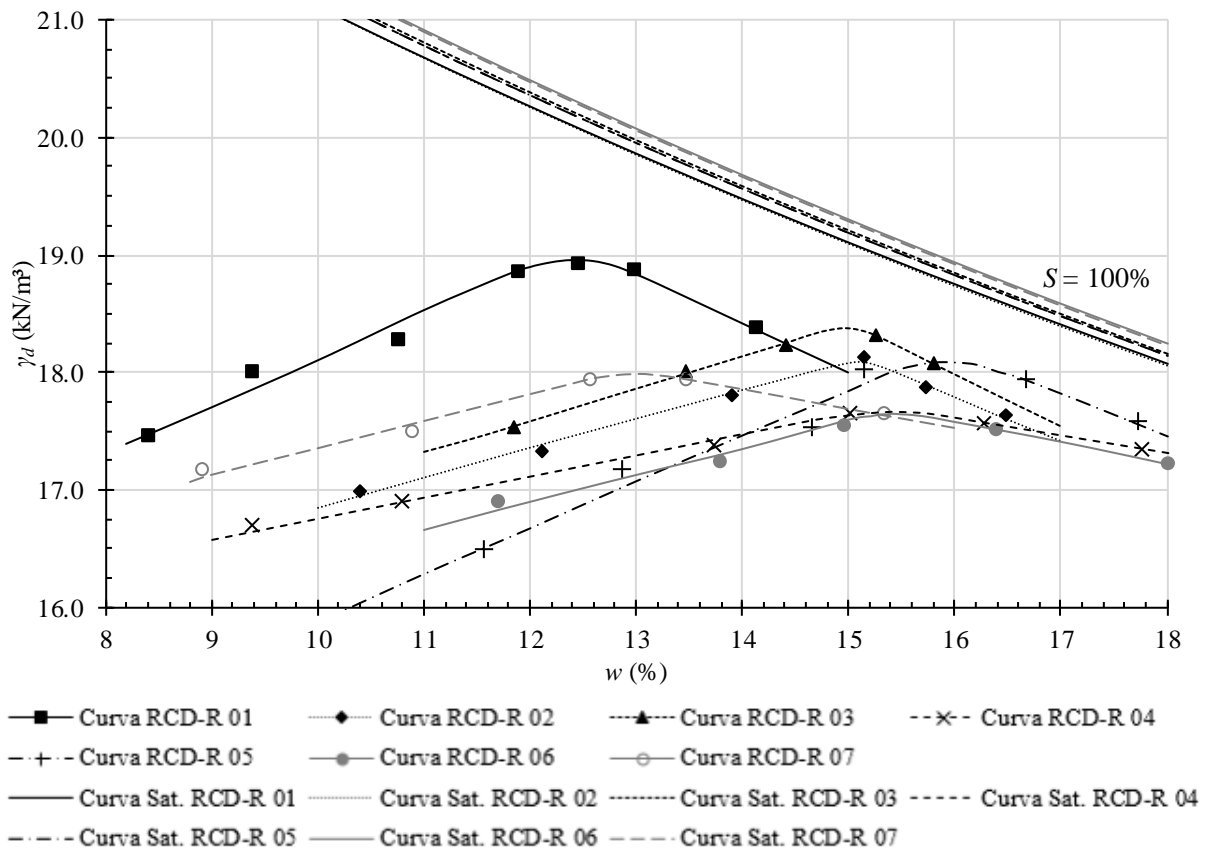


Tabela 4.5 – Resumo dos valores de umidade ótima e peso específico seco máximo das amostras ensaiadas.

	RCD-R 01	RCD-R 02	RCD-R 03	RCD-R 04	RCD-R 05	RCD-R 06	RCD-R 07	Média	CV (%)
$W_{ótima}$ (%)	12,4	15,1	15,0	15,4	15,8	15,4	13,0	14,6	8,41
$\gamma_{d_máx}$ (kN/m ³)	18,96	18,08	18,37	17,66	18,09	17,65	17,99	18,11	2,30

4.1.6 Peso específico do solo após compactação *in situ*

O ensaio de frasco de areia, realizado após o processo de compactação com rolo liso vibratório (quatro passadas) na camada base (100 mm) da instalação experimental, revelou valor de peso específico médio igual a 16,23 kN/m³ (CV = 1,55%) e umidade média de 9,9% (CV = 10,00%). Com os resultados obtidos, verificou-se que o grau de compactação (GC)

atingido foi de 89% da energia Proctor normal – considerando o valor médio do peso específico seco máximo das cinco primeiras amostras de RCD-R ensaiadas (18,23 kN/m³). O valor médio de umidade encontrado está associado ao não umedecimento do material (RCD-R) antes da realização do processo de compactação.

Após a compactação da camada RCD-R de ensaio (200mm) com rolo liso vibratório (seis passadas), o ensaio de frasco de areia revelou valores médios de peso específico e umidade iguais a 16,23 kN/m³ (CV = 0,93%) e 9,84% (CV = 7,03%). O valor do grau de compactação (GC) foi igual ao atingido na camada base (89% da energia Proctor normal), porém, executou-se duas passadas a mais do rolo na compactação da camada em análise. Esse resultado pode estar relacionado ao não umedecimento do material, o que certamente influenciou os limites de GC atingidos.

Já no ensaio realizado após a compactação da camada RCD-R de ensaio com equipamento à percussão (tipo sapo; oito passadas) foi encontrado um valor médio do peso específico igual a 16,80 kN/m³ (CV = 1,01%), o que resultou em um grau de compactação igual a 92% da energia Proctor normal. Quanto à umidade, os valores foram inferiores em relação às camadas compactadas anteriormente apresentadas, com valor médio de umidade igual a 7,16% e coeficiente de variação de 5,14%. Esse resultado está relacionado, além do não umedecimento do material, a perda de umidade que o material sofreu durante o processo de exumação das amostras de geogrelha do primeiro preenchimento da instalação experimental.

A Tabela 4.6 apresenta os resultados de peso específico e umidade encontrados nos ensaios de frasco de areia realizados em cada camada e seus respectivos valores de grau de compactação atingido. Vale ressaltar que os valores de GC foram calculados com base no valor médio do peso específico seco máximo das cinco primeiras amostras de RCD-R ensaiadas (18,23 kN/m³).

Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios de frasco de areia nas camadas compactadas.

	Camada RCD-R base			Camada RCD-R de ensaio					
	Quatro passadas do rolo liso vibratório			Seis passadas do rolo liso vibratório			Oito passadas do compactador tipo sapo		
Ensaio	01	02	03	01	02	03	01	02	03
γ (kN/m ³)	16,58	15,99	16,11	16,23	16,04	16,41	17,03	16,62	16,74
GC (%)	91	88	88	89	88	90	93	91	92
w (%)	8,8	11,2	9,9	10,1	10,6	8,9	7,0	7,7	6,8

4.2 GEOGRELHAS

Neste subitem, serão apresentados os resultados pertinentes aos ensaios de resistência à tração realizados e os fatores de redução encontrados para cada cenário. Optou-se por segmentar os resultados conforme as variáveis analisadas. Dessa forma, estão apresentados os resultados: i) das amostras virgens; ii) das amostras danificadas; iii) do cenário sem compactação (SC) e análise da influência da altura de queda e iv) dos cenários onde foram realizados processos de compactação (CR e CS) – análise da influência do procedimento de compactação.

4.2.1 Ensaios de resistência à tração das amostras virgens

A análise dos ensaios de resistência à tração das amostras virgens revelou que a resistência à tração média das amostras virgens das três geogrelhas ensaiadas mostraram-se abaixo dos valores indicados pelo fabricante; no entanto, revelaram valores de CV baixos e variando de 1,54% (GGPET 02) a 3,06% (GGPET 01). As curvas tensão-deformação das amostras virgens das geogrelhas GGPVA, GGPET 01 e GGPET 02 estão apresentadas nas Figura 4.13, 4.14 e 4.15, respectivamente. A linha preta tracejada, no sentido horizontal, indica o valor médio da resistência à tração obtida para as cinco amostras ensaiadas. A variação das curvas tensão-deformação dos três tipos de geogrelhas ensaiadas pode ser observada na Figura 4.16.

Figura 4.13 – Curvas tensão-deformação: amostras virgens GGPVA.

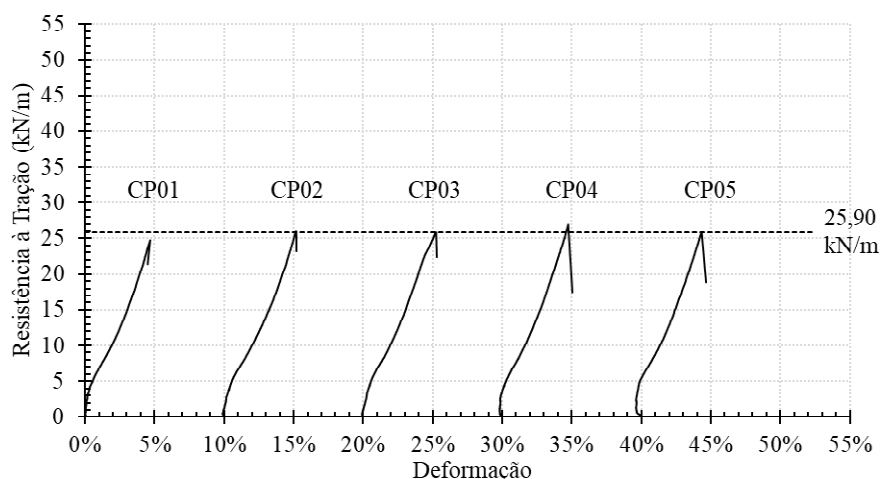


Figura 4.14 – Curvas tensão-deformação: amostras virgens GGPET 01.

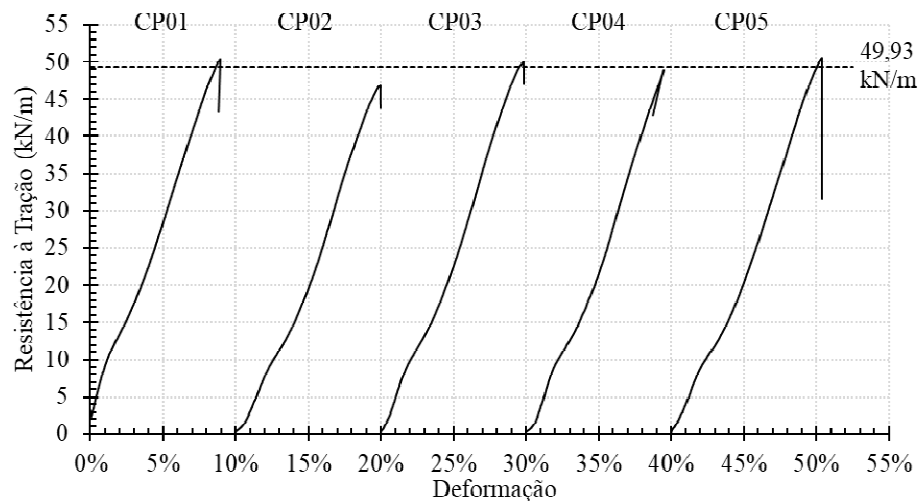


Figura 4.15 – Curvas tensão-deformação: amostras virgens GGPET 02.

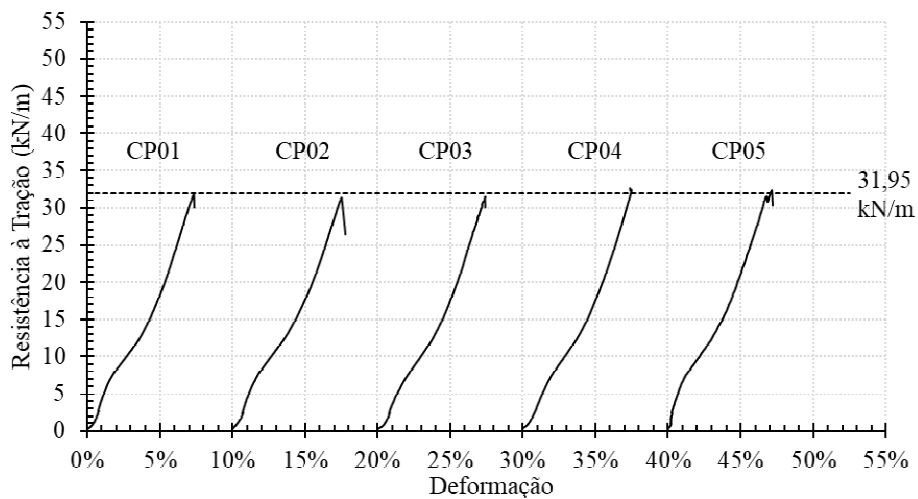
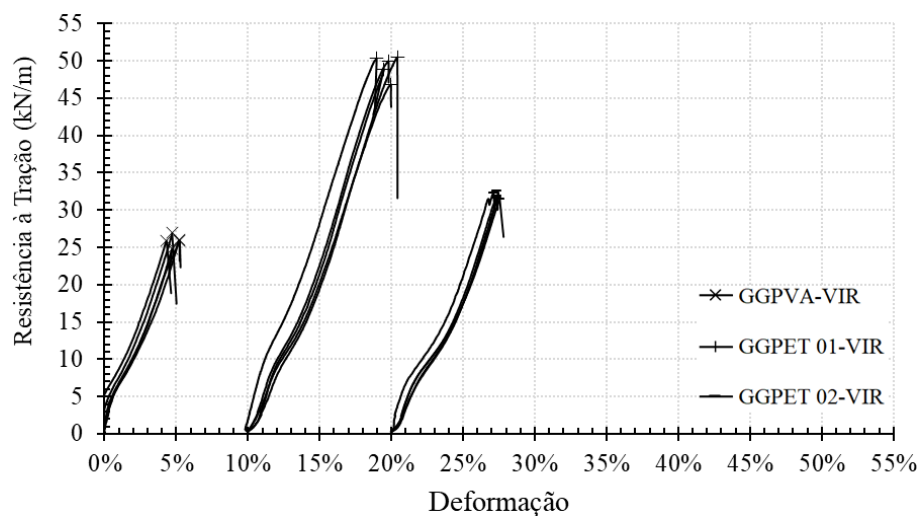


Figura 4.16 – Curvas tensão-deformação das amostras virgens das geogrelhas empregadas no estudo.



A deformação na ruptura das amostras virgens mostrou-se abaixo de 5% para a geogrelha GGPVA e abaixo de 10% para as geogrelhas de poliéster (GGPET), conforme apresentado na Tabela 4.6. Observa-se que os valores encontrados apresentam variabilidade superior em relação a variabilidade da resistência à tração de pico e atendem aos critérios estabelecidos pelo fabricante (Tabela 3.3).

Tabela 4.6 – Deformação na ruptura média virgem das geogrelhas em estudo.

Geogrelhas	$\overline{\varepsilon}_V$ (%)	CV (%)
GGPVA	4,83	7,80
GGPET 01	9,72	5,58
GGPET 02	7,35	2,10

Os ensaios de resistência à tração mostraram que a geogrelha GGPVA pode ser considerada como a mais rígida das geogrelhas ensaiadas. Contudo, devido à sua ruptura ocorrer abaixo da deformação de 5% (Tabela 4.6) não foi quantificado o valor de $\overline{J_{sec_V}^{5\%}}$. A geogrelha GGPET 02 apresentou os menores valores de rigidez, tanto para 2% quanto para 5% de deformação. Os valores médios de rigidez das amostras virgens das geogrelhas para os valores de deformação de 2% ($\overline{J_{sec_V}^{2\%}}$) e de 5% ($\overline{J_{sec_V}^{5\%}}$) e seus respectivos valores de CV estão apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Rigidezes com 2% e 5% de deformação das amostras virgens das geogrelhas ensaiadas.

Rigidez	GGPVA		GGPET 01		GGPET 02	
	Valor (kN/m)	CV (%)	Valor (kN/m)	CV (%)	Valor (kN/m)	CV (%)
$\overline{J_{sec_V}^{2\%}}$	548,98	11,28	491,98	33,48	410,67	11,13
$\overline{J_{sec_V}^{5\%}}$	n.a.	n.a.	449,12	15,48	367,75	8,35

Onde: n.a.– Não se aplica.

Nota-se que os coeficientes de variabilidade dos valores de ambas as rigidezes são superiores aos outros parâmetros analisados (resistência à tração de pico e deformação na ruptura). Ademais, os valores médios de rigidez com 2% de deformação ($\overline{J_{sec_V}^{2\%}}$) exibiram coeficiente de variação superior se comparado ao CV dos valores médios de rigidez com 5% de deformação ($\overline{J_{sec_V}^{5\%}}$).

A Tabela 4.7 ainda revela que as geogrelhas de poliéster (GGPET 01 e GGPET 02) apresentaram valores de $\overline{J_{sec_V}^{2\%}}$ superiores aos valores de $\overline{J_{sec_V}^{5\%}}$. Esse resultado é validado pela análise das curvas tensão-deformação dessas geogrelhas (Figuras 4.14 e 4.15), onde é possível verificar a existência de um trecho com diferente inclinação (“abatimento”) da curva tensão-deformação entre as deformações de 1% e 3%, o que faz com que o valor de $\overline{J_{sec_V}^{2\%}}$ seja superior ao valor $\overline{J_{sec_V}^{5\%}}$.

Com base nos dados das amostras virgens apresentados, foram determinados os intervalos de confiança, utilizando a distribuição t de Student. A Tabela 4.8 mostra os intervalos de confiança da média dos parâmetros analisados para as geogrelhas ensaiadas e os respectivos níveis de confiança. É possível observar que os valores dos níveis de confiança da resistência à tração encontram-se no intervalo entre 96% e 98%, assemelhando aos níveis de confiança encontrados por Santos (2011), Barbosa, Silva e Santos (2016) e Barbosa (2017).

Tabela 4.8 – Intervalo de confiança da média dos parâmetros analisados para as geogrelhas em estudo.

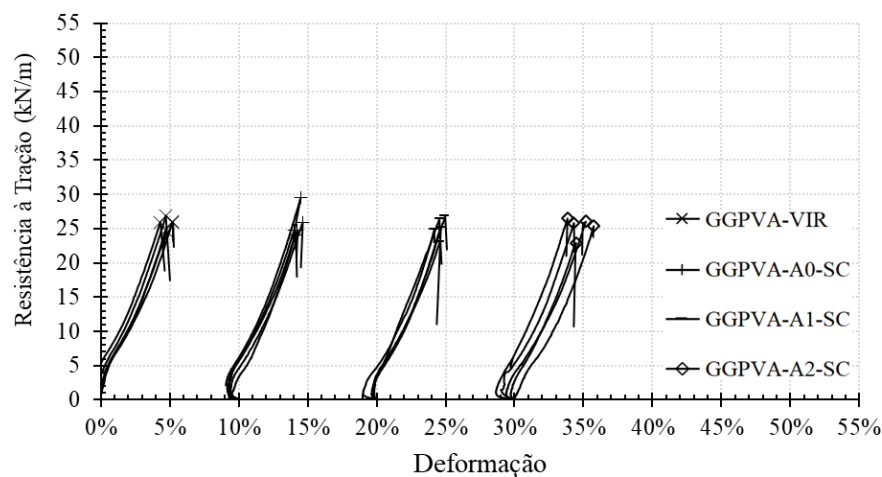
Resistência a tração de pico	Deformação na Ruptura	Rigidez com 2% de deformação	Rigidez com 5% de deformação
GGPVA			
$24,80 \leq \overline{T_v} \leq 27,00$ (kN/m) NC = 97%	$4,32 \leq \overline{\varepsilon_v} \leq 5,33$ (%) NC = 96%	$445,20 \leq \overline{J_{sec_V}^{2\%}} \leq 652,76$ (kN/m) NC = 98%	- -
GGPET 01			
$46,80 \leq \overline{T_v} \leq 51,86$ (kN/m) NC = 98%	$8,92 \leq \overline{\varepsilon_v} \leq 10,52$ (%) NC = 97%	$315,27 \leq \overline{J_{sec_V}^{2\%}} \leq 668,69$ (kN/m) NC = 98%	$346,61 \leq \overline{J_{sec_V}^{5\%}} \leq 551,63$ (kN/m) NC = 98%
GGPET 02			
$31,29 \leq \overline{T_v} \leq 32,61$ (kN/m) NC = 96%	$7,12 \leq \overline{\varepsilon_v} \leq 7,58$ (%) NC = 97%	$334,09 \leq \overline{J_{sec_V}^{2\%}} \leq 487,25$ (kN/m) NC = 98%	$316,31 \leq \overline{J_{sec_V}^{5\%}} \leq 419,18$ (kN/m) NC = 98%

4.2.2 Ensaios de resistência à tração e análise visual das amostras danificadas

4.2.2.1 Geogrelha de Álcool Polivinílico

Para a geogrelha de PVA (GGPVA), os procedimentos de lançamento do material de alturas de queda de 1,0 metro (A1-SC) e 2,0 metros (A2-SC) apresentaram valores de percentual de redução da resistência (*PSR*) à tração média semelhantes: 2,28% e 2,24%, respectivamente. O lançamento do material com altura de zero metros (A0-SC) resultou em um valor de *PSR* de 0,35%. Apesar das simulações de dano mostrarem a ocorrência de redução de resistência à tração, observou-se que os valores de resistência à tração média das amostras danificadas encontram-se dentro do intervalo de resistência relativo às amostras virgens. A Figuras 4.17 apresenta as curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPVA para os cenários VIR, A0-SC, A1-SC e A2-SC.

Figura 4.17 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPVA para os cenários VIR, A0-SC, A1-SC e A2-SC – efeito da altura de queda.



Os valores médios da deformação na ruptura e da rigidez com 2% de deformação para todos os cenários sem compactação (SC) exibiram valores dentro do intervalo de confiança das amostras virgens. Contudo, destaca-se que os valores encontrados no cenário A2-SC apresentaram coeficiente de variação superiores em relação aos demais cenários (VIR, A0-SC e A1-SC), conforme pode ser observado na Figura 4.17. Esse resultado revela que, apesar dos valores de $\overline{\varepsilon}_d$ e $\overline{J}_{sec_d}^{2\%}$ situarem dentro de seus respectivos intervalos de confiança da amostra

virgem, o lançamento do RCD-R da altura de 2,0 metros afetou o comportamento individual das curvas de tensão deformação de maneira significativa.

As análises visuais mostraram que, para os cenários em análise, o dano de abrasão pode ter sido um fator responsável pela redução da resistência das geogrelhas. O dano de abrasão atingiu 16,7% dos elementos longitudinais no cenário A0-SC e 33,3% no cenário A2-SC, no mesmo elemento – EL. Não foi observada nenhuma ocorrência de danos visuais no cenário A1-SC. A Tabela 4.9 apresenta os resultados da análise visual dos danos para todos os cenários investigados da GGPVA.

Tabela 4.9 – Resultado da análise visual dos danos mecânicos simulados na GGPVA.

Cenários	Contusão (%)			Separação (%)			Corte (%)			Abrasão (%)		
	NÓ	ET	EL	NÓ	ET	EL	NÓ	ET	EL	NÓ	ET	EL
A0-SC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33,3	16,7
A1-SC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A2-SC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33,3
A0-CR	11,1	16,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16,7
A1-CR	0	0	16,7	0	0	0	0	0	0	44,4	0	50,0
A2-CR	0	0	0	0	0	16,7	0	0	0	22,2	16,7	16,7
A0-CS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33,3	16,7	33,3
A1-CS	0	16,7	33,3	0	0	0	0	0	0	22,2	33,3	33,3
A2-CS	11,1	11,1	0	0	0	0	0	0	0	55,6	0	50,0
A2*-SC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50,0
A2*-CR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	66,7
A2*-CS	0	0	16,7	0	0	0	0	0	0	11,1	50,0	33,3

A análise dos processos de compactação com rolo vibratório (A0-CR) exibiu valor de PSR igual a 1,43%; já a compactação à percussão (A0-CS) exibiu valor de \overline{T}_d abaixo do intervalo de confiança das amostras virgens, com o valor PSR igual a 18,11%. A maior redução causada pela compactação à percussão pode ser justificada pelo grau de compactação atingido – 92% para o cenário A0-CS, e 89% para A0-CR. A Figura 4.18 apresenta as curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPVA para os cenários VIR, A0-CR, A1-CR e A2-CR; e a Figura 4.19 os cenários VIR, A0-CS, A1-CS e A2-CS.

Ambos os processos de compactação causaram redução da rigidez com 2% de deformação: 13,48%, para o cenário A0-CR, e 20,59%, para o cenário A0-CS. Observou-se que somente o valor de $\overline{J}_{sec_d}^{2\%}$ obtido no cenário A0-CS mostrou-se abaixo do intervalo de rigidez das

amostras virgens. Os coeficientes de variação de ambos os cenários mostraram-se elevados: 18,91%, para o cenário A0-CR, e 15,77%, para o cenário A0-CS.

Figura 4.18 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPVA para os cenários VIR, A0-CR, A1-CR e A2-CR – efeito da altura de queda com compactação com rolo.

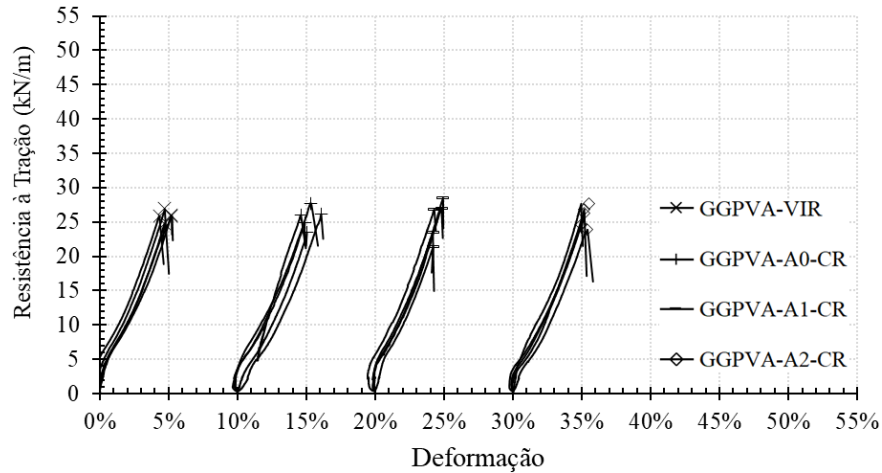
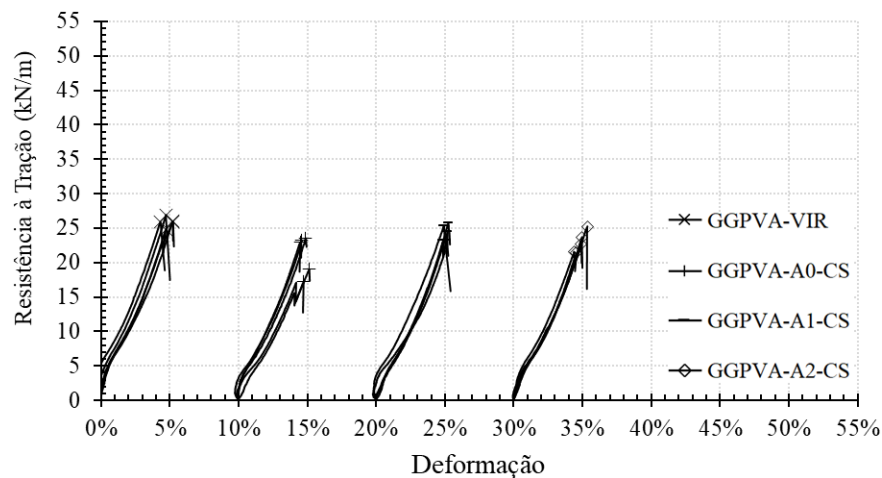


Figura 4.19 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPVA para os cenários VIR, A0-CS, A1-CS e A2-CS – efeito da altura de queda com compactação à percussão.



Em relação aos danos causados pelo processo de compactação, a análise visual (Tabela 4.9) mostrou que o cenário A0-CR apresentou 50% dos elementos longitudinais com dano de abrasão e 16,7% com dano de contusão, porém estes danos não causaram valores \overline{T}_d , $\overline{\varepsilon}_d$ e $\overline{J_{sec_d}^{2\%}}$ abaixo dos respectivos intervalos de confiança da amostra virgem. Já o cenário A0-CS apresentou, em média, 29,6% de seus nós e elementos (longitudinais e transversais) com danos de abrasão, e 33,3% de danos de contusão nos elementos longitudinais. Esse resultado

indica que o dano de contusão possui maior influência na perda de resistência da GGPVA em relação ao dano de abrasão.

Observando-se as Figuras 4.18 e 4.19, verifica-se que a compactação com rolo após o lançamento de material – cenários A1-CR e A2-CR – apresentou uma menor redução de resistência na geogrelha – com valores de PSR abaixo de 1,70%. Por outro lado, a compactação à percussão – cenários A1-CS e A2-CS – resultaram em uma elevada redução de resistência, com valores de $\overline{T_d}$ abaixo do intervalo de resistência das amostras virgens. A compactação à percussão causou valores de PSR iguais a 5,71%, para o cenário A1-CS, e 11,54%, para o cenário A2-CS.

Quanto a deformação, esses cenários – A1-CR, A2-CR, A1-CS e A2-CS – obtiveram resultados dentro do intervalo de deformação das amostras virgens. Quanto a módulo de rigidez com 2% de deformação, somente os valores de $\overline{J_{sec_d}^{2\%}}$ dos cenários com compactação à percussão (A1-CS e A2-CS) mostraram-se inferiores aos intervalos de rigidez das amostras virgens. As análises visuais (Tabela 4.9) destes cenários revelaram ocorrência de danos de abrasão nos nós e nos elementos (longitudinais e transversais). Danos de contusão nas fibras longitudinais foram verificados nos cenários A1-CR (16,7%) e A1-CS (33,3%).

Ao se analisar as distintas alturas de queda, o procedimento de compactação com rolo causou redução da resistência à tração somente quando o RCD-R foi lançado da menor altura possível (A0-CR). Já os cenários com compactação à percussão, observou-se maiores reduções em relação aos cenários sem compactação. As Figuras 4.20, 4.21 e 4.22 ilustram as curvas tensão deformação para as distintas alturas de queda.

Quanto aos resultados relativos ao cenário de altura de queda de 2,0 m com a adoção da camada de proteção (A2*), verificou-se que os cenários A2*-SC e A2*-CR apresentaram valores de PSR semelhantes, aproximadamente 9,71%. Já o cenário A2*-CS o valor de PSR foi de 3,82%, mostrando-se inferior aos demais cenários com camada de proteção. Esse resultado revela que a adoção da camada de proteção não minimizou os danos causados pelo lançamento e compactação do RCD-R na GGPVA; e pode ser justificado pelo fato da camada de proteção ter sido feita com o próprio RCD-R (mesma granulometria), o que pode ter uma influência nos danos em decorrências de partículas graúdas já estarem próximas ou em contato com os elementos da geogrelha. As curvas tensão-deformação dos ensaios de

resistência à tração da GGPVA para os cenários VIR, A2*-SC, A2*-CR e A2*-CS estão apresentadas na Figura 4.24.

Figura 4.20 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPVA para os cenários VIR, A0-SC, A0-CR e A0-CS – efeito da compactação para altura de queda de zero metros.

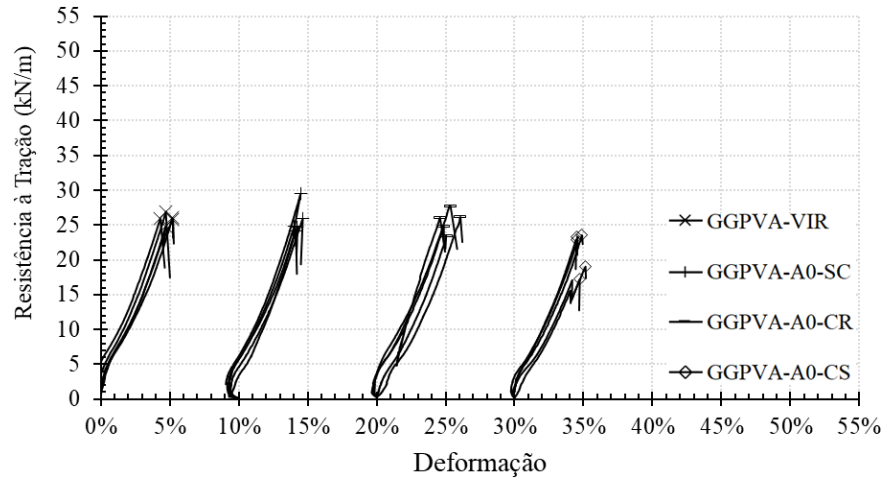
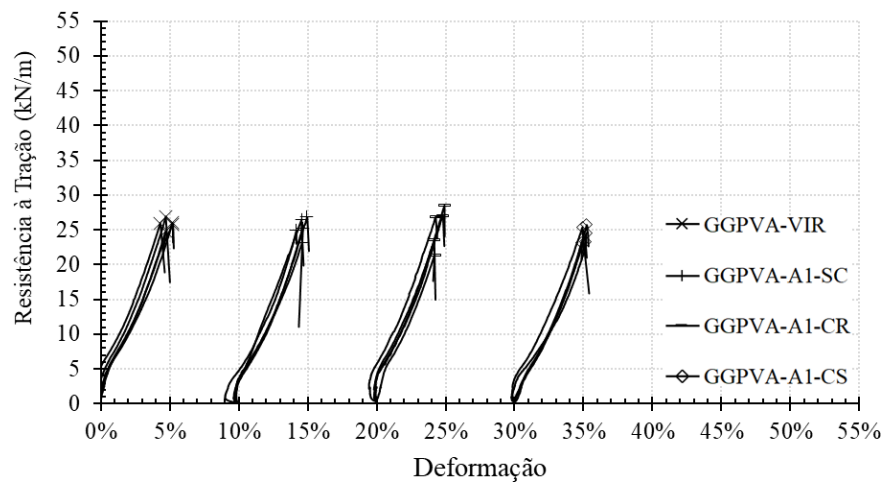


Figura 4.21 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPVA para os cenários VIR, A1-SC, A1-CR e A1-CS – efeito da compactação para altura de queda de 1,0 metro.



Vale destacar que os valores de $\overline{J_{sec_d}^{2\%}}$ obtidos em todos os cenários com camada de proteção encontram-se abaixo do intervalo de rigidez das amostras virgens, com reduções de 24,23%, 22,02% e 20,25% em relação as amostras virgens para os cenários A2*-SC, A2*-CR e A2*-CS, respectivamente. Os valores médios de $\overline{T_d}$, $\overline{\varepsilon_d}$ e $\overline{J_{sec_d}^{2\%}}$ relativos aos cenários simulados na GGPVA são exibido na Tabela 4.10 – com os valores de CV apresentados entre parênteses.

Figura 4.22 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPVA para os cenários VIR, A2-SC, A2-CR e A2-CS – efeito da compactação para altura de queda de 2,0 metros.

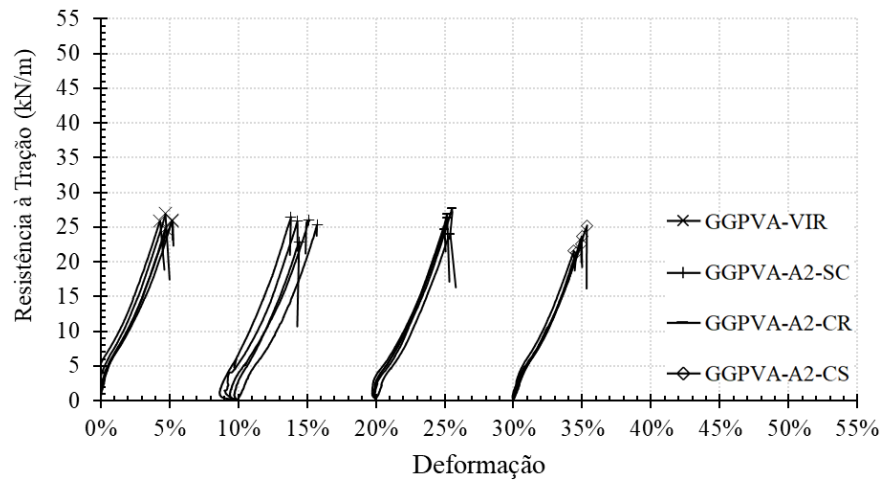
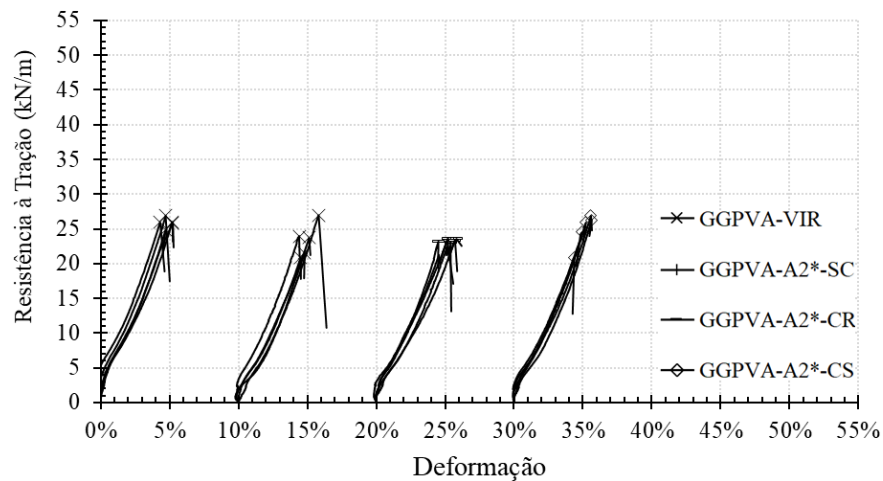


Figura 4.24 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPVA para os cenários VIR, A2*-SC, A2*-CR e A2*-CS – efeito da camada de proteção.



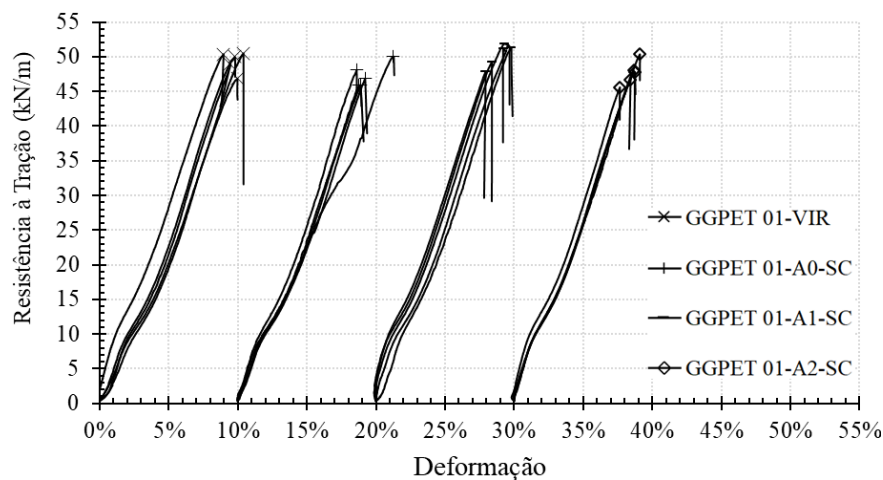
4.2.2.2 Geotêxtil de Poliéster 01

Os ensaios de resistência à tração realizados com a geotêxtil de PET 01 (GGPET 01) submetida a danos de instalação sem a aplicação de compactação revelaram um valor médio, para o cenário A1-SC, 1,95% superior em relação à \overline{T}_v . Já os cenários A0-SC e A2-SC resultaram em valores de PSR muito próximos (3,93% e 3,26%, respectivamente). Vale ressaltar que esses resultados analisados encontram-se dentro do intervalo de confiança das amostras virgens. A Figura 4.25 apresenta as curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 01 para os cenários VIR, A0-SC, A1-SC e A2-SC.

Tabela 4.10 – Resumo dos resultados de \overline{T}_d , $\overline{\varepsilon}_d$ e $\overline{J}_{sec_d}^{2\%}$ da GGPVA.

Cenários	\overline{T}_d	$\overline{\varepsilon}_d$	$\overline{J}_{sec_d}^{2\%}$	$\overline{J}_{sec_d}^{5\%}$
	kN/m (CV %)	% (CV %)	kN/m (CV %)	kN/m (CV %)
GGPVA-VIR	25,90 (2,89)	4,83 (7,80)	548,98 (11,28)	-
GGPVA-A0-SC	25,81 (8,37)	4,31 (5,96)	636,44 (9,90)	-
GGPVA-A1-SC	25,31 (5,87)	4,59 (6,00)	560,29 (11,62)	-
GGPVA-A2-SC	25,32 (5,60)	4,70 (15,99)	559,56 (28,06)	-
GGPVA-A0-CR	25,53 (6,99)	5,12 (11,82)	475,00 (18,91)	-
GGPVA-A1-CR	25,47 (11,43)	4,48 (7,93)	582,19 (12,14)	-
GGPVA-A2-CR	25,86 (6,05)	5,27 (4,05)	449,92 (10,65)	-
GGPVA-A0-CS	21,21 (13,60)	4,76 (5,60)	435,96 (15,77)	-
GGPVA-A1-CS	24,42 (4,73)	5,08 (3,37)	432,83 (13,30)	-
GGPVA-A2-CS	22,91 (7,01)	4,84 (7,86)	433,22 (6,22)	-
GGPVA-A2*-SC	23,39 (10,30)	4,94 (11,44)	415,94 (19,19)	-
GGPVA-A2*-CR	23,38 (1,02)	5,33 (9,73)	428,09 (10,57)	-
GGPVA-A2*-CS	24,91 (9,59)	5,15 (10,13)	437,80 (9,24)	-

Figura 4.25 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 01 para os cenários VIR, A0-SC, A1-SC e A2-SC – efeito da altura de queda.



Destaca-se que o cenário A0-SC, para o qual esperava-se menores ocorrências de dano, apresentou valores de resistência à tração inferiores aos observados para a altura de queda de 2,0 metros – A2-SC, contudo dentro do intervalo de resistência das amostras virgens. Esse resultado revela a necessidade de realizar uma análise estatística para quantificar os danos de instalação.

Os valores de deformação na ruptura foram influenciados pelo aumento da altura de queda, exibindo redução dos valores de deformação na ruptura média danificada ($\overline{\varepsilon}_d$) iguais a 3,91%, 7,92% e 12,95% para os cenários A0-SC, A1-SC e A2-SC, respectivamente. A análise

da rigidez para valores de deformação de 2% e 5% das amostras danificadas revelou valores superiores à rigidez média das amostras virgens em todos os cenários sem compactação – A0-SC, A1-SC e A2-SC. Apesar dessas variações, os valores das deformações na ruptura e de rigidez das amostras danificadas estão dentro do intervalo das amostras virgens. No entanto, vale ressaltar que os valores de $\overline{T_d}$, $\overline{\varepsilon_d}$, $\overline{J_{sec_d}^{2\%}}$ e $\overline{J_{sec_d}^{5\%}}$ apresentaram coeficiente de variação (CV) superiores às amostras virgens.

A análise visual dos danos de abrasão revelou que somente 8,3% dos nós foram danificados no cenário A0-SC. Considerando os elementos longitudinais, verificou-se a não ocorrência de danos visuais para os cenários sem compactação – A0-SC, A1-SC e A2-SC. A Tabela 4.11 apresenta os resultados da análise visual dos danos mecânicos em todos os cenários simulados na GGPET 01.

Tabela 4.11 – Resultado da análise visual dos danos mecânicos simulados na GGPET 01.

Cenários	Contusão (%)			Separação (%)			Corte (%)			Abrasão (%)		
	NÓ	ET	EL	NÓ	ET	EL	NÓ	ET	EL	NÓ	ET	EL
A0-SC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8,3	0	0
A1-SC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A2-SC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A0-CR	0	25,0	0	0	0	0	0	0	0	8,3	0	11,1
A1-CR	8,3	0	0	0	0	0	0	0	0	16,7	12,5	0
A2-CR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8,3	0	11,1
A0-CS	25,0	25,0	33,3	0	0	0	0	0	0	33,3	50,0	0
A1-CS	8,3	25,0	11,1	0	0	0	0	0	0	25,0	25,0	0
A2-CS	0	25,0	11,1	0	0	0	0	25,0	0	33,3	25,0	44,4
A2*-SC	8,3	0	11,1	0	0	0	0	0	0	0	12,5	0
A2*-CR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16,7	37,5	0
A2*-CS	0	12,5	0	0	0	0	0	0	0	16,7	37,5	11,1

Para o processo de compactação à percussão, a geogrelha de PET 01 (GGPET 01) não apresentou redução de resistência à tração após o dano no cenário de altura de queda zero (A0-CS). Contudo a compactação com rolo vibratório (A0-CR) provocou uma redução de - 8,78% em relação à resistência de pico das amostras virgens ($\overline{T_v}$). Os coeficientes de variação dos valores de resistência à tração de pico danificada ($\overline{T_d}$) desses cenários mostraram-se próximos (5,56% para A0-CR e 6,08% para A0-CS). A análise visual dos danos de abrasão revelou a ocorrência de 11,1% desse dano nos elementos longitudinais no cenário A0-CR; no cenário A0-CS observou-se 33,3% de danos de contusão em tais elementos. A Figura 4.26

apresenta as curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 01 para os cenários VIR, A0-CR, A1-CR e A2-CR; e a Figura 4.27 dos cenários VIR, A0-CS, A1-CS e A2-CS.

Figura 4.26 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 01 para os cenários VIR, A0-CR, A1-CR e A2-CR – efeito da altura de queda com compactação com rolo.

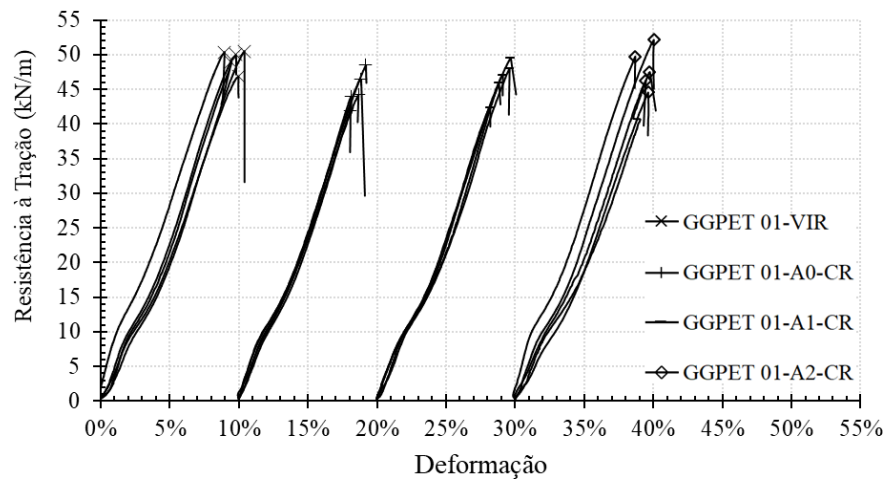
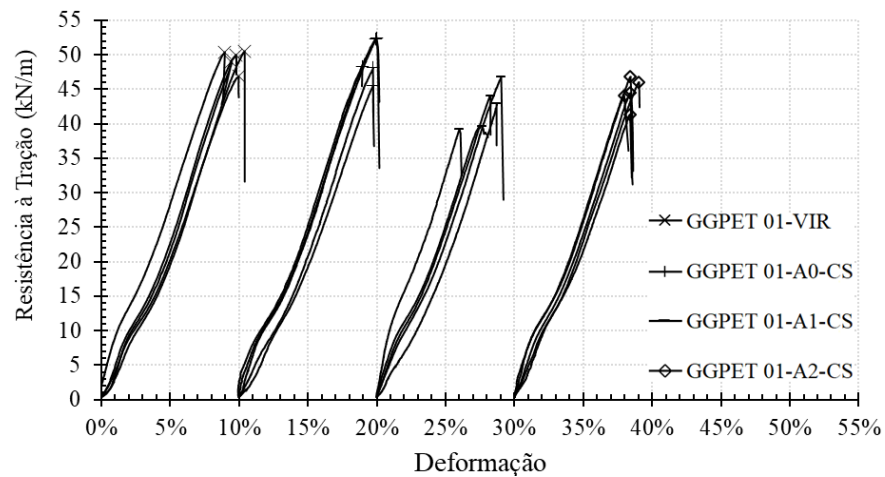


Figura 4.27 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 01 para os cenários VIR, A0-CS, A1-CS e A2-CS – efeito da altura de queda com compactação à percussão.



Quanto à deformação na ruptura do cenário sem altura de queda e com compactação com rolo (A0-CR), a GGPET 01 exibiu redução de 11,72% em relação as amostras virgens. Para a compactação à percussão (A0-CS), a redução foi de apenas 0,51%. Verificou-se que os coeficientes de variação dos valores de $\overline{\varepsilon_d}$ em ambos os cenários apresentaram-se próximos de 5,00%. Quanto à rigidez, o cenário A0-CR exibiu acréscimo dos valores de rigidez superiores em relação as amostras virgens (4,24% de $\overline{J_{sec_d}^{2\%}}$ e 5,57% de $\overline{J_{sec_d}^{5\%}}$). O cenário A0-

CS apresentou pequena redução (1,61%) na rigidez com 2% de deformação e pequeno acréscimo (1,10%) na rigidez com 5% de deformação. Os valores de $\overline{\varepsilon}_d$, $\overline{J}_{sec_d}^{2\%}$ e $\overline{J}_{sec_d}^{5\%}$ dos cenários avaliados (A0-CR e A0-CS) situam dentro de seus respectivos intervalos de confiança das amostras virgens. Os coeficientes de variação dos valores de rigidezes no cenário A0-CS foram superiores se comparados ao cenário A0-CR, como pode ser observado nas Figuras 4.25 e 4.26.

Nas condições em que ambos os mecanismos de dano foram simulados, observou-se que os cenários com altura de queda de 1,0 metro – A1-CR e A1-CS – exibiram valores de PSR superiores aos cenários com altura de queda de 2,0 metros – A2-CR e A2-CS. Os valores de PSR foram de 5,66% (A1-CR), 2,62% (A2-CR), 13,83% (A1-CS) e 9,69% (A2-CS). Evidencia-se que os cenários com compactação à percussão apresentaram valores de PSR superiores aos observados nos cenários com compactação com rolo vibratório. Os valores de \overline{T}_d dos cenário CS apresentaram-se abaixo do intervalo de resistência das amostras virgens.

A análise visual do cenário A1-CR revelou que os danos de abrasão atingiram valores médios e iguais a 14,6% nos nós e nos elementos transversais. No cenário A2-CR, observou-se 11,1% dos elementos longitudinais danificadas por abrasão. No cenário A1-CS, os danos de abrasão apresentaram valores iguais (25%) para os nós e elementos transversais. Quanto a contusão, os danos atingiram 8,3% dos nós e 11,1% dos elementos longitudinais. De forma a demonstrar a dificuldade de estabelecer uma relação entre danos visuais e o percentual de redução de resistência (PSR), chama-se a atenção para o fato do cenário A2-CR ter exibido danos de abração acima de 25% nos nós e nos elementos (transversais e longitudinais) e de contusão igual a 11,1% nos elementos longitudinais, valores de danos visuais superiores aos observados no cenário A1-CR, que apresentou maior valor de PSR.

A análise dos ensaios de resistência à tração da GGPET 01 para a altura de queda igual a 0,0 metro, revelou que a compactação com rolo vibratório (A0-CR) exibiu maior redução se comparado aos demais cenários (A0-SC e A0-CS). Para a altura de queda de 1,0 metro, verificou-se que a redução da resistência à tração das geogrelhas aumentaram na ordem dos seguintes cenários: A1-SC, A1-CR e A1-CS. Para a altura de queda de 2,0 metros, a compactação à percussão (A2-CS) exibiu o maior valor de PSR, seguido pelos cenários A2-

SC e A2-CR. As Figuras 4.28, 4.29 e 4.30 ilustram as curvas tensão deformação para as distintas alturas de queda.

Figura 4.28 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 01 para os cenários VIR, A0-SC, A0-CR e A0-CS – efeito da compactação para altura de queda de zero metros.

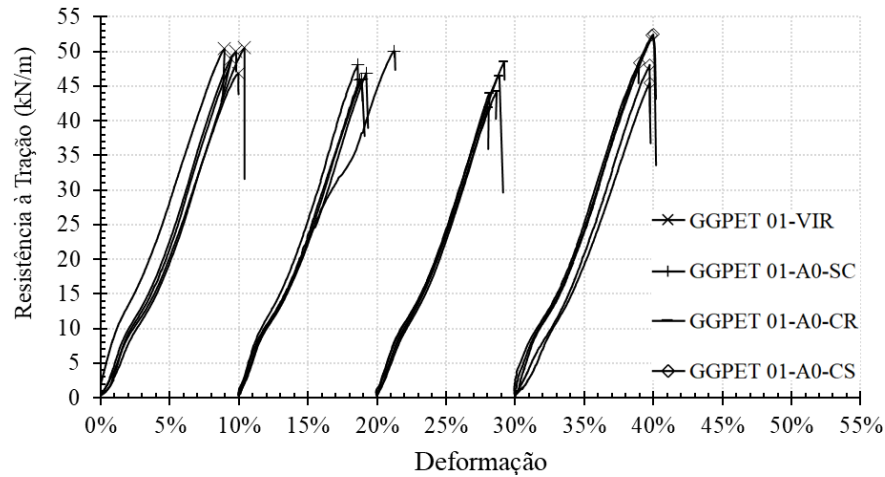
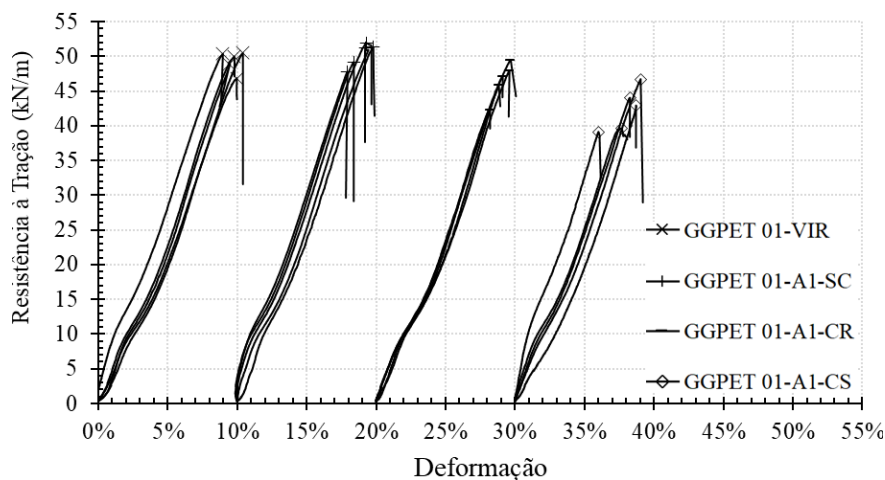


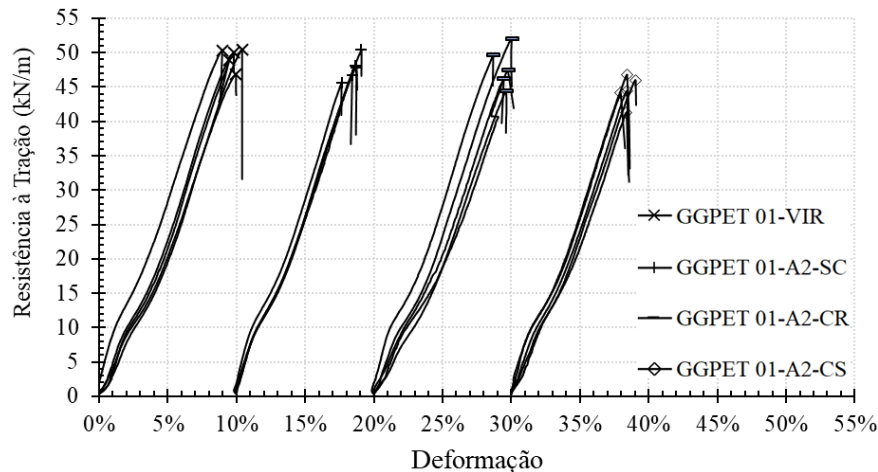
Figura 4.29 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 01 para os cenários VIR, A1-SC, A1-CR e A1-CS – efeito da compactação para altura de queda de 1,0 metro.



A análise da deformação na ruptura revelou que dentre os cenários com altura de queda de 0,0 metro, o processo de compactação com rolo apresentou maior redução em relação à deformação das amostras virgens. Já para as alturas de queda de 1,0 metro e 2,0 metros, verificou-se que as maiores reduções nos valores de $\overline{\varepsilon}_d$ ocorreram quando o processo de compactação à percussão foi realizado. Quanto às rigidezes, os resultados apresentaram grande dispersão, a qual pode ser justificada pelo fato dos coeficientes de variação deste

parâmetro exibirem valores superiores em relação aos outros parâmetros analisados (resistência à tração de pico e deformação na ruptura).

Figura 4.30 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 01 para os cenários VIR, A2-SC, A2-CR e A2-CS – efeito da compactação para altura de queda de 2,0 metros.



Verificou-se que a camada de proteção apresentou comportamento satisfatório quando disposta sobre a GGPET 01, tendo em vista que houve uma redução dos danos causados pela altura de queda de 2,0 metros. De fato, a amostra chegou a apresentar resistência à tração média superior (0,20%) a apresentada pelas amostras virgens (\overline{T}_V); contudo o valor de \overline{T}_d mostrou-se dentro do intervalo de confiança da amostra virgem, mais uma vez evidenciando a importância da adoção de análises estatísticas para avaliar os danos mecânicos em geogrelhas. A Figura 4.31 apresenta as curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 01 para os cenários VIR, A2*-SC, A2*-CR e A2*-CS.

Por outro lado, observou-se que o cenário A2*-CR apresentou maior valor de PSR (3,59%) em relação ao cenário em que não havia camada de proteção – A2-CR (PSR = 2,62%). Já com a compactação à percussão (A2*-CS) a camada de proteção exibiu pequena interferência nos valores de PSR, uma vez que foi observado valor de 9,69% para o cenário A2-CS e 9,47% para o cenário A2*-CS. Embora a geogrelha PET 01 e GGPVA tenham características bastantes distintas, a ineficiência da camada de proteção pode estar também relacionada ao fato de a camada de proteção ter sido executada com o RCD-R de mesma granulometria. A média dos valores de \overline{T}_d , $\overline{\epsilon}_d$, $\overline{J_{sec_d}^{2\%}}$ e $\overline{J_{sec_d}^{5\%}}$ relativos aos cenários simulados na GGPET 01 estão exibido na Tabela 4.12 – com os valores de CV apresentados entre parênteses.

Figura 4.31 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 01 para os cenários VIR, A2*-SC, A2*-CR e A2*-CS – efeito da camada de proteção.

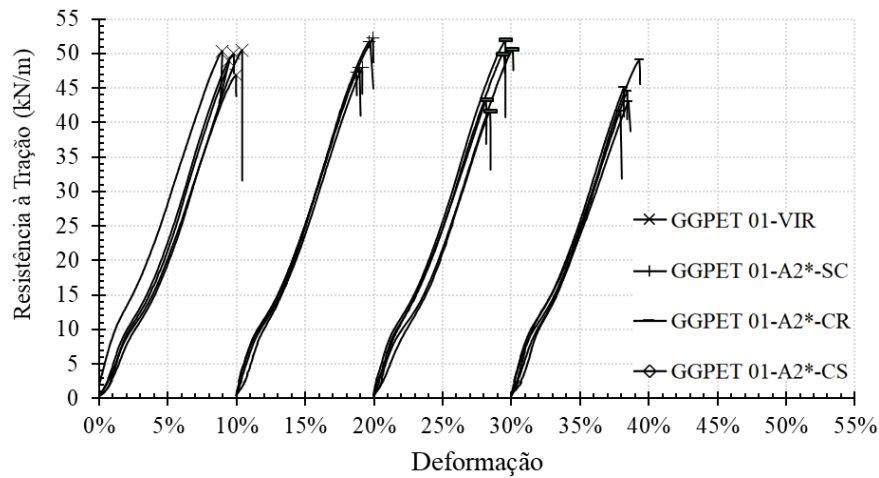


Tabela 4.12 – Resumo dos resultados de \overline{T}_d , $\overline{\varepsilon}_d$, $\overline{J}_{sec_d}^{2\%}$ e $\overline{J}_{sec_d}^{5\%}$ da GGPET 01.

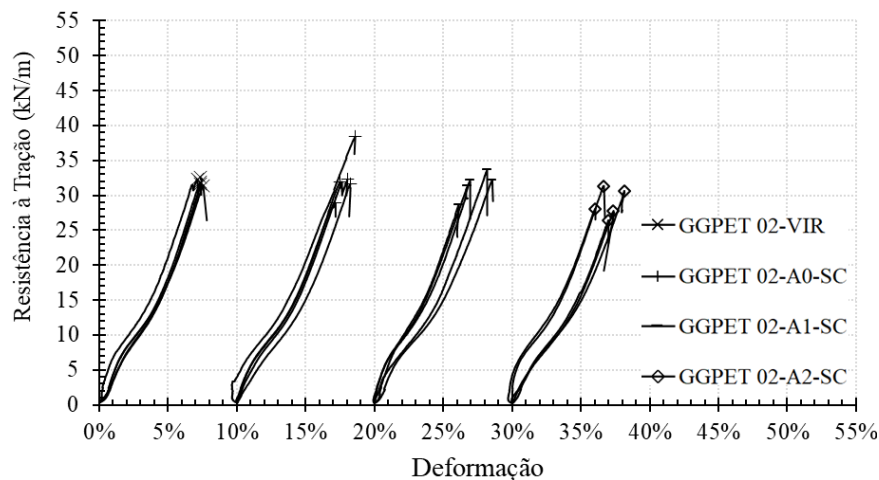
Cenários	\overline{T}_d	$\overline{\varepsilon}_d$	$\overline{J}_{sec_d}^{2\%}$	$\overline{J}_{sec_d}^{5\%}$
	kN/m (CV %)	% (CV %)	kN/m (CV %)	kN/m (CV %)
GGPET 01-VIR	49,33 (3,06)	9,72 (5,58)	491,98 (21,43)	449,12 (13,62)
GGPET 01-A0-SC	47,39 (3,65)	9,34 (11,62)	524,66 (5,40)	466,56 (5,81)
GGPET 01-A1-SC	50,29 (3,39)	8,95 (8,50)	616,08 (12,52)	544,01 (10,03)
GGPET 01-A2-SC	47,72 (3,73)	8,51 (6,27)	598,23 (6,56)	529,84 (4,50)
GGPET 01-A0-CR	45,00 (5,56)	8,58 (5,59)	512,82 (5,49)	474,15 (2,85)
GGPET 01-A1-CR	46,54 (5,82)	9,08 (6,65)	494,87 (2,76)	446,39 (4,27)
GGPET 01-A2-CR	48,04 (6,17)	9,51 (5,30)	470,95 (23,12)	441,28 (16,27)
GGPET 01-A0-CS	49,33 (6,08)	9,67 (4,28)	484,04 (19,97)	454,04 (11,21)
GGPET 01-A1-CS	42,51 (7,44)	7,93 (15,16)	540,51 (29,97)	498,91 (19,24)
GGPET 01-A2-CS	44,55 (4,74)	8,44 (4,56)	529,04 (10,97)	483,84 (7,95)
GGPET 01-A2*-SC	49,43 (4,75)	9,28 (5,51)	549,20 (5,30)	496,47 (2,34)
GGPET 01-A2*-CR	47,56 (9,81)	9,12 (8,85)	525,34 (11,56)	471,77 (8,35)
GGPET 01-A2*-CS	44,66 (6,33)	8,47 (6,22)	554,00 (7,62)	491,43 (3,15)

4.2.2.3 Geogrelha de Poliéster 02

Os resultados obtidos dos ensaios de resistência à tração realizados com a geogrelha de PET 02 (GGPET 02), submetidos ao cenário com altura de queda de zero metro sem compactação revelaram que o valor de resistência à tração de pico danificada (\overline{T}_d) foi 2,07% acima do valor de \overline{T}_v , porém dentro do intervalo de resistência das amostras virgens.. Os cenários com alturas de queda de 1,0 metro (A1-SC) e 2,0 metros (A2-SC) apresentaram valores de percentual de redução de resistência à tração (PSR) iguais a 1,00% e 9,67%, respectivamente.

Constatou-se que o aumento da altura de queda provocou maior redução da resistência à tração de pico, porém, apenas o cenário A2-SC apresentou valor de $\overline{T_d}$ abaixo e fora do intervalo de resistência de $\overline{T_v}$. As curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 02 para os cenários VIR, A0-SC, A1-SC e A2-SC estão apresentadas na Figura 4.32.

Figura 4.32 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 02 para os cenários VIR, A0-SC, A1-SC e A2-SC – efeito da altura de queda.



Quanto à deformação na ruptura, o cenário com altura de queda zero e sem compactação (A0-SC) apresentou valor médio 7,62% superior em relação ao observado nas amostras virgens. Esse acréscimo na deformação mostrou-se acima e fora do intervalo de deformação das amostras virgens. O cenário A1-SC e A2-SC exibiram redução nos valores de deformação na ruptura de 0,41% e 4,22%, respectivamente, mas somente o cenário A2-SC apresentou valor de deformação na ruptura abaixo e fora do intervalo de deformação das amostras virgens.

A análise da rigidez para valores de deformação de 2% ($J_{sec_d}^{2\%}$) revelou valores superiores à rigidez média das amostras virgens. Quanto à rigidez para deformação de 5%, os cenários A0-SC e A2-SC revelaram pequena percentual de redução (inferiores a 2,00%). Por outro lado, o cenário A1-SC apresentou acréscimo de 3,87%. Apesar dessas alterações (redução ou aumento), vale ressaltar que os valores obtidos apresentaram-se dentro de seus respectivos intervalos de rigidez das amostras virgens.

Cabe destacar que os coeficientes de variação encontrados para as diferentes alturas de queda e sem compactação mostraram-se elevados se comparados com os obtidos das amostras virgens, uma vez que foram obtidos valores de CV iguais a 7,90% para $\overline{T_d}$, 10,80% para $\overline{\varepsilon_d}$, 16,70% para $\overline{J_{sec_d}^{2\%}}$ e 16,01% para $\overline{J_{sec_d}^{5\%}}$.

A análise visual dos danos de abrasão na GGPET 02 indicou que o cenário A0-SC apresentou um valor médio de 28,2% dos nós e elementos (transversais e longitudinais) com dano. No cenário A1-SC verificou-se danos de abrasão em 22,2% dos elementos longitudinais. Tendo em vista o dano de contusão, verificou-se a sua ocorrência em 11,1% dos elementos longitudinais no cenário A0-SC. O cenário com altura de queda de 2,0 metros (A2-SC) não apresentou danos pela análise visual. Os resultados da análise visual dos danos mecânicos em todos os cenários simulados na GGPET 02 estão apresentados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Resultado da análise visual dos danos mecânicos simulados na GGPET 02.

Cenários	Contusão (%)			Separação (%)			Corte (%)			Abrasão (%)		
	NÓ	ET	EL	NÓ	ET	EL	NÓ	ET	EL	NÓ	ET	EL
A0-SC	0	0	11,1	0	0	0	0	0	0	25,0	37,5	22,2
A1-SC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22,2
A2-SC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A0-CR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	58,3	50,0	67,7
A1-CR	8,33	0	11,1	0	0	0	0	0	0	16,7	50,0	44,4
A2-CR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8,3	50,0	55,6
A0-CS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16,7	37,5	33,3
A1-CS	25,0	0	11,1	0	0	0	0	0	0	25,0	75,0	33,3
A2-CS	8,33	25,0	11,1	0	0	0	0	0	0	16,7	37,5	22,2
A2*-SC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33,3	12,5	0
A2*-CR	0	0	11,1	0	0	0	0	0	0	16,7	37,5	11,1
A2*-CS	0	12,5	0	0	0	0	0	0	0	8,3	12,5	11,1

A análise dos resultados de resistência à tração realizados em amostras danificadas por processos de compactação revelou valores de PSR semelhantes para a compactação com rolo vibratório (17,18%) e à percussão (17,65%). Contudo, os coeficientes de variação dos valores de $\overline{T_d}$ foram elevados – 10,43% e 17,71% para A0-CR e A0-CS, respectivamente. A Figura 4.33 apresenta as curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 02 para os cenários VIR, A0-CR, A1-CR e A2-CR; e a Figura 4.34 e cenários VIR, A0-CS, A1-CS e A2-CS, respectivamente.

Figura 4.33 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 02 para os cenários VIR, A0-CR, A1-CR e A2-CR – efeito da altura de queda com compactação com rolo.

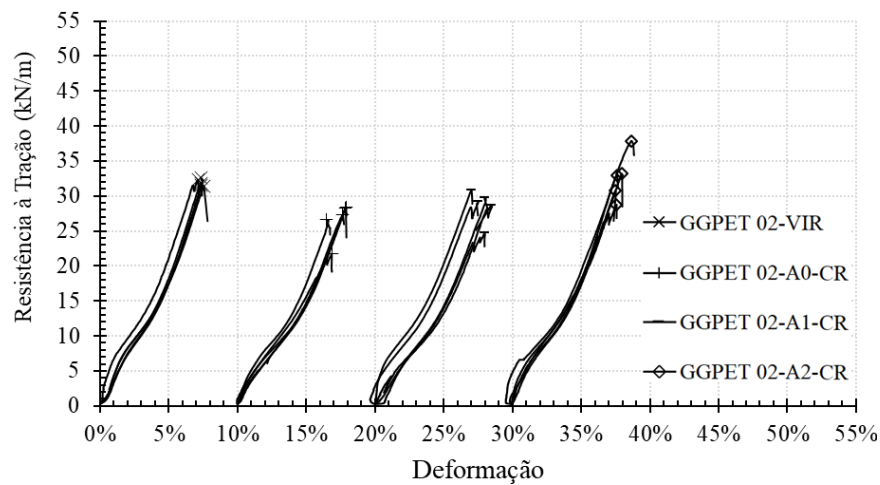
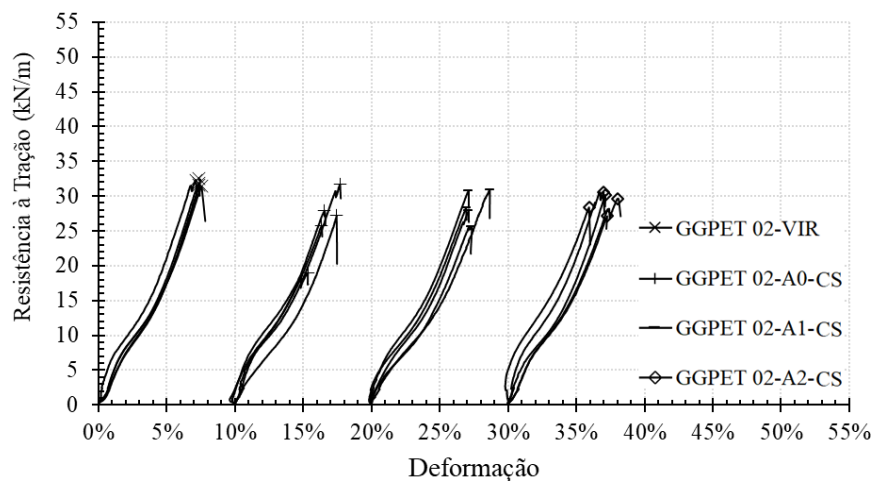


Figura 4.34 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 02 para os cenários VIR, A0-CS, A1-CS e A2-CS – efeito da altura de queda com compactação à percussão.



Foi verificado que a compactação com rolo (A0-CR) não causou alteração no valor de deformação na ruptura das amostras danificadas em relação às amostras virgens. No cenário com compactação à percussão (A0-CS), observou-se uma redução no valor de deformação na ruptura igual a 9,25%, mostrando-se abaixo e fora do intervalo de deformação das amostras virgens. Os valores de rigidez com deformação de 2% e 5% exibiram redução semelhantes (aproximadamente 16,11%) para o cenário A0-CR. Para a compactação à percussão, observou-se acréscimo de 5,50% no valor de rigidez com deformação de 2%, e diminuição de 2,76% para a rigidez com 5% de deformação. Não foram observados valores de rigidez com deformação de 2% e 5% fora do intervalo de rigidez das amostras virgens.

A análise visual dos danos nos elementos longitudinais no cenário A0-CR apresentou valor de danos de abrasão (66,7%) igual a duas vezes o observado no cenário com compactação à percussão (A0-CS; 33,3%). A análise dos danos visuais verificados nos nós e nos elementos transversais revelam que a compactação com rolo causou maior incidência de danos de abrasão em relação à compactação à percussão. Contudo, só foram verificados danos de contusão no cenário com compactação à percussão (A0-CS), ocorrendo em 11,1% dos elementos longitudinais.

Para as alturas de queda de zero metro e 1,0 metro, observou-se que a compactação com rolo (A0-CR e A1-CR) e à percussão (A0-CS e A1-CS) causaram reduções de resistência à tração semelhantes. Para altura de queda de zero metro (A0-CR e A0-CS), os valores de PSR foram próximos à 17,42%, enquanto que para a altura de queda de 1,0 metro (A1-CR e A1-CS) as reduções foram próximas a 10,21%. Por sua vez, para a altura de queda de 2,0 metros, o cenário sem compactação (A2-SC) causou um valor de PSR igual a 9,67%. Nesse contexto, observou-se que o cenário com a compactação à percussão causou um PSR igual a 8,64% em relação as amostras virgens. Valor este inferior ao observado para a mesma altura de queda sem compactação. Contudo, para a mesma altura de queda (2,0 metros), a compactação com rolo vibratório (A2-CR) exibiu um valor de \overline{T}_d 2,38% maior do que o valor de (\overline{T}_v) .

Todas as alterações (redução ou aumento de resistência) observadas nessa análise (efeitos de altura de queda e compactação) encontram-se fora do intervalo de resistência das amostras virgens. Vale ressaltar que a GGPE 02 apresentou um baixo valor de coeficiente de variação dos valores de resistência à tração das amostras virgens, que contribuiu para intervalo de resistência mais estreitos. As Figuras 4.35, 4.36 e 4.37 ilustram as curvas tensão deformação para as distintas alturas de queda.

Quanto à deformação na ruptura, observou-se coeficientes de variação acima de 6% em todos os cenários de dano. Com altura de queda de zero metro, o cenário A0-CS causou a maior redução no valor da deformação na ruptura (9,25%). Para as alturas de queda de 1,0 metro e 2,0 metros, quando não houve compactação (A1-SC e A2-SC), foram visualizadas as maiores reduções nos valores de deformação de ruptura (0,41% e 4,22%, respectivamente). As rigidezes mostraram resultados dispersos com coeficiente de variação médio de 14,96%.

Figura 4.35 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 02 para os cenários VIR, A0-SC, A0-CR e A0-CS – efeito da compactação para altura de queda de zero metros.

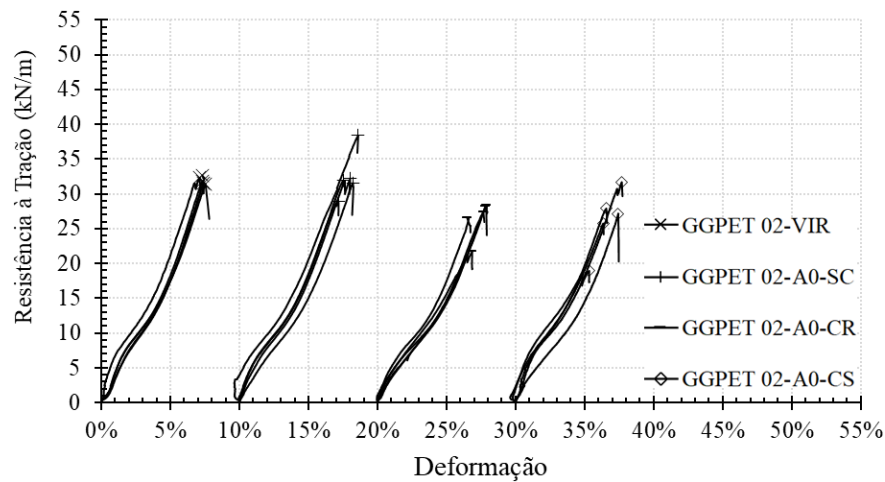
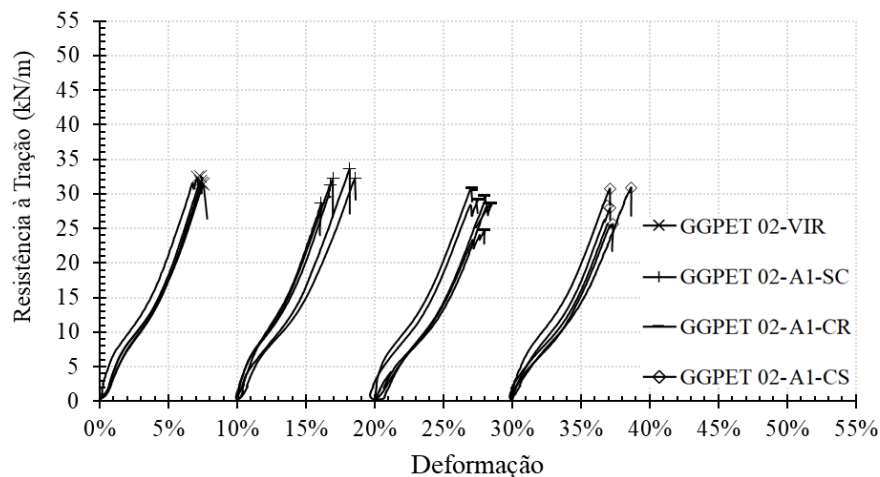


Figura 4.36 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 02 para os cenários VIR, A1-SC, A1-CR e A1-CS – efeito da compactação para altura de queda de 1,0 metro.



Os cenários com lançamento de RCD-R de 2,0 metros de altura sobre a camada de proteção (A2*-SC) revelou um valor de resistência à tração 6,01% superior ao valor de \overline{T}_v , resultando em uma \overline{T}_d acima e fora do intervalo de resistência da amostra virgem. Os cenários A2*-CR e A2*-CS revelaram percentuais de redução da resistência à tração distintos e iguais a -2,35% e -10,61%, respectivamente. As curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 02 para os cenários VIR, A2*-SC, A2*-CR e A2*-CS estão apresentadas na Figura 4.38.

Foram visualizados acréscimo nos valores de $\overline{\epsilon}_d$ nos cenários com camada de proteção – A2*-SC, A2*-CR e A2* CS, superiores e fora do intervalo de deformação das amostras

virgens. Quanto às rigidezes, observou-se variações entre +1,62% e -7,75%, porém com valores de $\overline{J}_{sec_d}^{2\%}$ e $\overline{J}_{sec_d}^{5\%}$ dentro do intervalo de confiança de rigidez das amostras virgens.

Figura 4.37 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 02 para os cenários VIR, A2-SC, A2-CR e A2-CS – efeito da compactação para altura de queda de 2,0 metros.

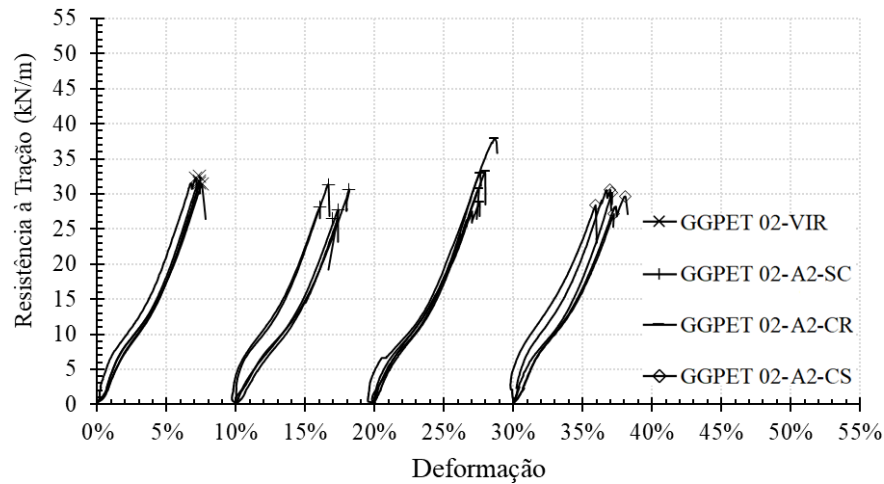
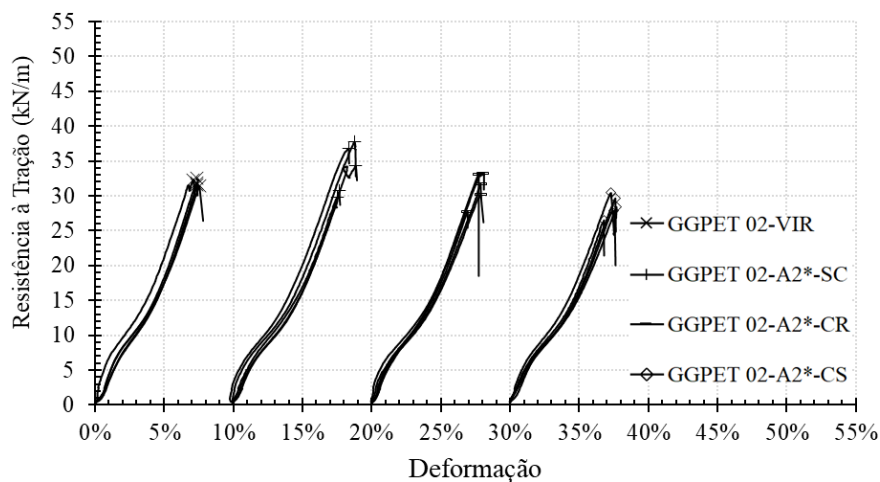


Figura 4.38 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de resistência à tração da GGPET 02 para os cenários VIR, A2*-SC, A2*-CR e A2*-CS – efeito da camada de proteção.



Com o uso da camada de proteção a análise visual dos danos revelou que não houve ocorrência de danos visuais no cenário sem compactação (A2*-SC). Contudo, nos cenários A2*-CR e A2*-CS, foram observados danos de abrasão com mesmos valores (11,1%) nos elementos longitudinais. Danos de contusão também foram verificados em 11,1% dos elementos longitudinais do cenário A2*-CR. A Tabela 4.14 exibi a média dos valores de \overline{T}_d ,

$\overline{\varepsilon}_d$, $\overline{J_{sec_d}^{2\%}}$ e $\overline{J_{sec_d}^{5\%}}$ relativos aos cenários simulados na GGPET 02 – com os valores de CV apresentados entre parênteses.

Tabela 4.14 – Resumo dos resultados de \overline{T}_d , $\overline{\varepsilon}_d$, $\overline{J_{sec_d}^{2\%}}$ e $\overline{J_{sec_d}^{5\%}}$ das amostras virgens e danificadas da GGPET 02.

Cenários	\overline{T}_d kN/m (CV %)	$\overline{\varepsilon}_d$ % (CV %)	$\overline{J_{sec_d}^{2\%}}$ kN/m (CV %)	$\overline{J_{sec_d}^{5\%}}$ kN/m (CV %)
GGPET 02-VIR	31,95 (1,54)	7,35 (2,10)	410,67 (11,13)	367,75 (8,35)
GGPET 02-A0-SC	32,61 (10,74)	7,91 (7,23)	410,32 (14,43)	360,57 (11,03)
GGPET 02-A1-SC	31,63 (5,79)	7,32 (13,97)	431,67 (13,74)	381,98 (16,42)
GGPET 02-A2-SC	28,86 (7,18)	7,04 (11,20)	418,60 (21,93)	364,89 (20,58)
GGPET 02-A0-CR	26,46 (10,43)	7,35 (8,74)	345,75 (11,24)	307,41 (8,44)
GGPET 02-A1-CR	28,66 (8,12)	7,80 (7,02)	357,67 (24,96)	322,21 (19,58)
GGPET 02-A2-CR	32,71 (10,40)	7,86 (6,04)	420,10 (6,64)	362,47 (4,11)
GGPET 02-A0-CS	26,31 (17,71)	6,67 (14,09)	433,27 (16,97)	357,61 (11,21)
GGPET 02-A1-CS	28,72 (7,65)	7,42 (9,43)	392,69 (16,54)	340,43 (13,57)
GGPET 02-A2-CS	29,19 (4,83)	7,07 (10,75)	458,27 (21,55)	382,03 (16,41)
GGPET 02-A2*-SC	33,87 (10,49)	8,24 (7,39)	417,31 (9,92)	351,45 (9,20)
GGPET 02-A2*-CR	31,20 (7,35)	7,68 (5,71)	408,62 (4,92)	348,71 (4,26)
GGPET 02-A2*-CS	28,56 (5,39)	7,37 (4,85)	388,00 (6,19)	339,24 (7,30)

4.2.3 Determinação e análise dos fatores de redução

De posse do: i) valor médio de cada parâmetro determinado a partir dos ensaios de resistência à tração nas amostras virgens (Item 4.2.1), ii) dos intervalos de confiança estabelecidos para cada parâmetro (Tabela 4.8) e iii) dos resultados dos ensaios de resistência à tração nas amostras danificadas (Tabelas 4.10, 4.12 e 4.14), foram calculados os fatores de redução devido ao dano de instalação (FR_{DI}). Os fatores de redução da resistência de pico (FR_{DI}^T), da deformação na ruptura (FR_{DI}^ε) e das rigidezes com deformação de 2% ($FR_{DI}^{2\%}$) e de 5% ($FR_{DI}^{5\%}$) estão apresentadas na Tabela 4.15, para todos os cenários analisados.

Pelos fatores de redução apresentados, observa-se que os valores de FR_{DI}^T estão dentro do intervalo de 0,94 a 1,22, o que se mostra de acordo com o encontrado na literatura (0,87 a 2,33) para ensaios realizados em campo. Os valores de FR_{DI}^ε , $FR_{DI}^{2\%}$ e $FR_{DI}^{5\%}$, também estão de acordo com a literatura consultada, e apresentaram, em sua maioria, valores menores se

comparados aos valores de FR_{DI}^T . Resultados semelhantes foram encontrados por Gonzalez-Torre *et al.* (2014) e Allen e Bathurst (1994).

Tabela 4.15 – Fatores de redução dos parâmetros analisados para todos os cenários em estudo.

Cenários	FR_{DI}^T	FR_{DI}^{ε}	$FR_{DI}^{2\%}$	$FR_{DI}^{5\%}$
GGPVA-A0-SC	1,00	1,00	1,00	-
GGPVA-A1-SC	1,00	1,00	1,00	-
GGPVA-A2-SC	1,00	1,00	1,00	-
GGPVA-A0-CR	1,00	1,00	1,00	-
GGPVA-A1-CR	1,00	1,00	1,00	-
GGPVA-A2-CR	1,00	1,00	1,00	-
GGPVA-A0-CS	1,22	1,00	1,26	-
GGPVA-A1-CS	1,06	1,00	1,27	-
GGPVA-A2-CS	1,13	1,00	1,27	-
GGPVA-A2*-SC	1,11	1,00	1,32	-
GGPVA-A2*-CR	1,11	1,00	1,28	-
GGPVA-A2*-CS	1,00	1,00	1,25	-
GGPET 01-A0-SC	1,00	1,00	1,00	1,00
GG PET 01-A1-SC	1,00	1,00	1,00	1,00
GG PET 01-A2-SC	1,00	1,14	1,00	1,00
GG PET 01-A0-CR	1,10	1,13	1,00	1,00
GG PET 01-A1-CR	1,06	1,00	1,00	1,00
GG PET 01-A2-CR	1,00	1,00	1,00	1,00
GG PET 01-A0-CS	1,00	1,00	1,00	1,00
GG PET 01-A1-CS	1,16	1,23	1,00	1,00
GG PET 01-A2-CS	1,11	1,15	1,00	1,00
GG PET 01-A2*-SC	1,00	1,00	1,00	1,00
GG PET 01-A2*-CR	1,00	1,00	1,00	1,00
GG PET 01-A2*-CS	1,10	1,15	1,00	1,00
GGPET 02-A0-SC	1,00	0,93*	1,00	1,00
GG PET 02-A1-SC	1,00	1,00	1,00	1,00
GG PET 02-A2-SC	1,11	1,04	1,00	1,00
GG PET 02-A0-CR	1,21	1,00	1,00	1,00
GG PET 02-A1-CR	1,12	0,94*	1,00	1,00
GG PET 02-A2-CR	0,98*	0,93*	1,00	1,00
GG PET 02-A0-CS	1,21	1,10	1,00	1,00
GG PET 02-A1-CS	1,11	1,00	1,00	1,00
GG PET 02-A2-CS	1,09	1,04	1,00	1,00
GG PET 02-A2*-SC	0,94*	0,89*	1,00	1,00
GG PET 02-A2*-CR	1,02	0,96*	1,00	1,00
GG PET 02-A2*-CS	1,12	1,00	1,00	1,00

* Recomenda-se a adoção de fatores de segurança maior ou igual a 1,00

Alguns cenários da GGPET 02 exibiram valores de resistência superiores às amostras virgens nos ensaios de resistência à tração de pico ou aumento da deformação na ruptura, resultando em fatores de redução menores que 1,00. Huang e Chiou (2006) e Paula, Pinho-Lopes e Lopes (2004) afirmaram que valores de fator de redução (FR) menores que 1,00 podem estar associados à acomodação das fibras dos geossintéticos. Porém, neste estudo este comportamento não pode ser confirmado tendo em vista que não foram realizadas análises da acomodação de fibras após a simulação dos danos. Deste modo, esses resultados devem ser expressos com $FR = 1,00$.

A observação de uma grande quantidade de fatores de redução com valor unitário (1,00) difere de muitos estudos reportados pela literatura consultada. No entanto, deve-se ressaltar que tais estudos não se valeram de análises estatísticas para a avaliação dos danos em materiais geossintéticos.

Neste estudo, os fatores de redução superiores a 1,00 revelam que os danos causados as geogrelhas mostraram-se superiores ao intervalo de confiança das amostras virgens, o que traz uma maior segurança para a afirmação da ocorrência de danos. Nesse cenário, verifica-se a necessidade de atribuir uma análise estatística no cálculo dos fatores de redução em geogrelhas. Fatores de redução iguais a 1,00 mostram que os eventuais danos causados são equivalentes a própria variabilidade existente das geogrelhas virgens e, portanto, não deveriam ser considerados nos projetos de engenharia.

4.2.4 Comparação dos resultados das geogrelhas

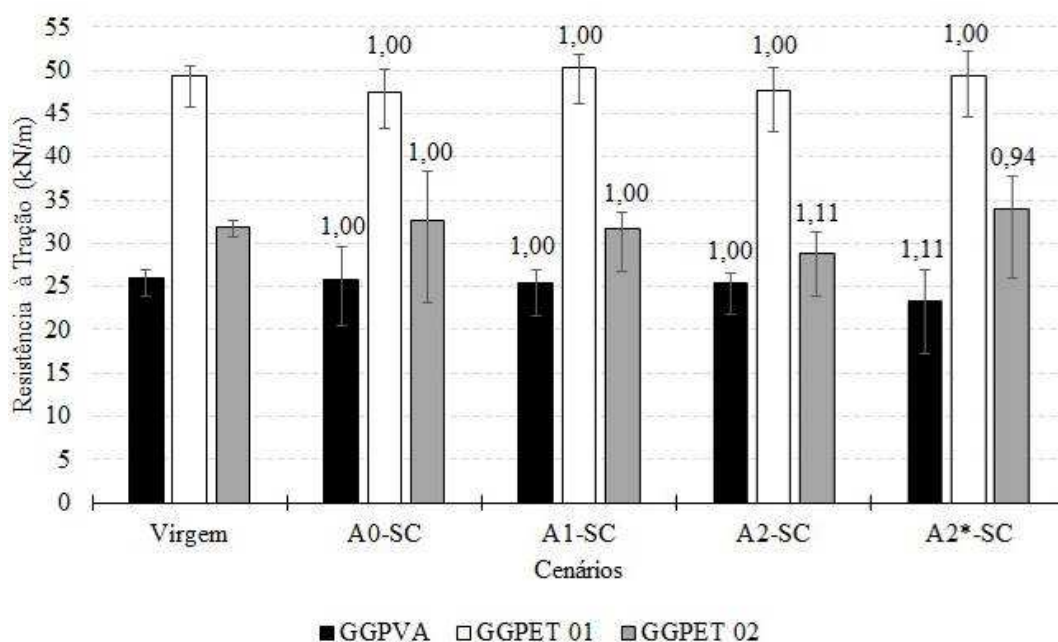
4.2.4.1 Análise do cenário sem compactação (SC)

O cenário sem compactação (SC) permite identificar a influência da altura de queda e da camada de proteção nos danos mecânicos das geogrelhas. Os valores médios e limites (máximos e mínimos) de resistência à tração das amostras pertinentes às amostras virgem e danificadas sem compactação das geogrelhas em estudo estão apresentados na Figura 4.39.

A partir da Figura 4.39, observa-se os limites (máximos e mínimos) dos cenários que simulam danos à geogrelha foram superiores aos das amostras virgens, ou seja, apresentaram CV superiores as amostras virgens. Gonzalez Torres *et al.* (2014) e Paula, Pinho-Lopes e Lopes

(2004) também encontraram o mesmo comportamento do coeficiente de variação em amostras danificadas. Desse modo, apesar do valor de \overline{T}_d estar presente no intervalo de confiança de \overline{T}_v , verifica-se a existência de amostras que se encontram-se fora desse intervalo de confiança, ou seja, amostras em que, se analisadas individualmente, apresentariam FR_{Di}^T diferente de 1,00. Esse resultado ratifica a necessidade da adoção de análises estatísticas para aferição dos danos em materiais poliméricos.

Figura 4.39 – Valores médios e limites (máximos e mínimos) de resistência à tração das amostras virgem e danificadas no cenário sem compactação.



Os cenários que simulam altura de queda de zero metros (A0-SC) retratam a condição de menor altura de queda que o material pode ser lançado. Verificou-se comportamento aleatório para cada tipo de geogrelha: redução de resistência para GGPVA (0,35%) e GGPET 01 (3,93); e acréscimo de resistência para GGPET 02 (2,07%). Apesar desse comportamento, a análise visual dos danos mostrou a existência de danos de abrasão, nas três geogrelhas, e contusão, na GGPET 02. Esta última apresentou maior quantidade de dano (pela análise visual), porém não exibiu perda de resistência à tração de pico. Contudo, deve-se ressaltar que os danos observados visualmente poderiam potenciais outros tipos de danos futuros.

Para a GGPVA, o lançamento de material com altura de 1,0 metro e 2,0 metros provocou perdas semelhantes de resistência, 2,3% e 2,2%, respectivamente. A GGPET 01, mostrou

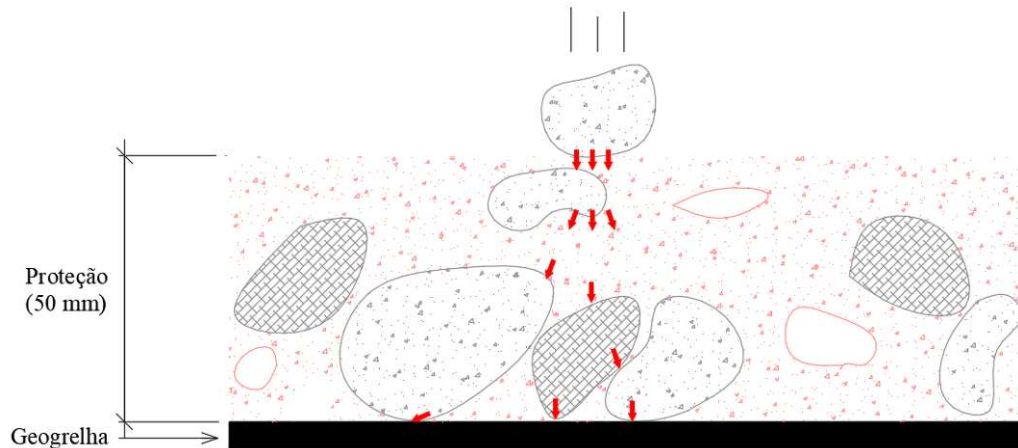
pequeno “ganho” de resistência (1,95%), com altura de queda de 1,0 metro (A1-SC), e perda de resistência (3,26%) com altura de 2,0 metros (A2-SC). Já a GGPET 02 mostrou-se mais afetada pelos danos de lançamento do RCD-R, exibindo $FR_{DI}^T = 1,12$ (perda de 9,67%), para a altura de 2,0 metros (A2-SC).

Observou-se que o dano decorrente da altura de queda de 2,0 metros (A2-SC) tende a ser mais severo de acordo com a rigidez do material – quanto menor a rigidez, maior o dano. Além disso, a geogrelha com fibra de álcool polivinílico (PVAL) mostrou-se mais resistentes aos danos de lançamento em relação à de fibras de poliéster (PET). Quanto a gramatura, a geogrelha de menor massa por unidade de área (185 g/m² – GGPET 02) apresentou-se mais vulnerável aos danos de lançamento do RCD-R em relação a de maior massa por unidade de área (280 g/m² – GGPET 01).

Ao analisar as deformações na ruptura, foi possível verificar comportamentos semelhantes aos obtidos pela análise da resistência à tração de pico, ou seja, no geral: i) a $\overline{\varepsilon}_d$ é menor que $\overline{\varepsilon}_v$, porém dentro do intervalo de confiança da $\overline{\varepsilon}_v$ e ii) os CV das amostras danificadas é superior em relação as amostras virgens. As geogrelhas de poliéster (GGPET 01 e GGPET 02) sofreram maior redução da deformação com o aumento da altura de queda. Já a GGPVA não apresentou esse comportamento. Contudo, somente os cenários GGPET 01-A2-SC e GGPET 02-A2-SC mostraram redução na deformação de ruptura fora do intervalo de confiança das amostras virgens, resultando em FR_{DI}^e de 1,14 e 1,04, respectivamente. O cenário GGPET 02-A0-SC apresentou $\overline{\varepsilon}_d$ superior ao mesmo intervalo de confiança das amostras virgens, resultando em $FR_{DI}^e = 0,93$.

A adoção da camada de proteção foi realizada com intuito de verificar a sua eficácia para a redução dos danos decorrentes do lançamento do RCD-R. Os cenários com camada de proteção e sem compactação (A2*-SC) revelou a maior perda de resistência à tração da GGPVA (PSR = 9,69%) se comparada a ao cenário sem proteção (A2-SC com PSR = 2,24%). Esse comportamento pode ser justificado pelo fato da camada de proteção ter sido feita com o próprio RCD-R (mesma granulometria), o que pode potencializar danos em decorrência de partículas graúdas já estarem próximas aos elementos da geogrelha (Figura 4.40).

Figura 4.40 – Croqui da distribuição de cargas provocada pelo impacto do grão sobre a camada de proteção.



Para o cenário A2*-SC, a GGPET 01 exibiu 0,20% de acréscimo no valor de resistência à tração, porém o valor de \bar{T}_d encontra-se dentro do intervalo de resistência das amostras virgens. Por outro lado, para o mesmo cenário avaliado (A2*SC), a GGPET 02 mostrou acréscimo de 6,01%, com valor de \bar{T}_d acima do intervalo de \bar{T}_v .

A diferença no comportamento frente ao lançamento com camada de proteção pode estar associada a maior rigidez à flexão da geogrelha GGPVA, tendo em vista que ela (a rigidez) restringe a deformação vertical da geogrelha, fazendo com que seus elementos sofram o dano devido a força transmitida. No caso das geogrelhas de poliéster (GGPET 01 e GGPET 02), sua menor rigidez à flexão permite maior deformação vertical da geogrelha, fazendo com que a força transmitida pelo impacto seja parcialmente ou totalmente absorvida, diminuindo possivelmente os danos gerados.

A partir da análise dos danos visuais é possível confirmar a análise feita e ainda permite afirmar que o dano de abrasão causou a diminuição da resistência de pico da GGPVA, dano cujo o qual não foi observado nos elementos longitudinais das outras geogrelhas (GGPET 01 e GGPET 02) submetidas a mesma configuração de ensaio (A2*-SC).

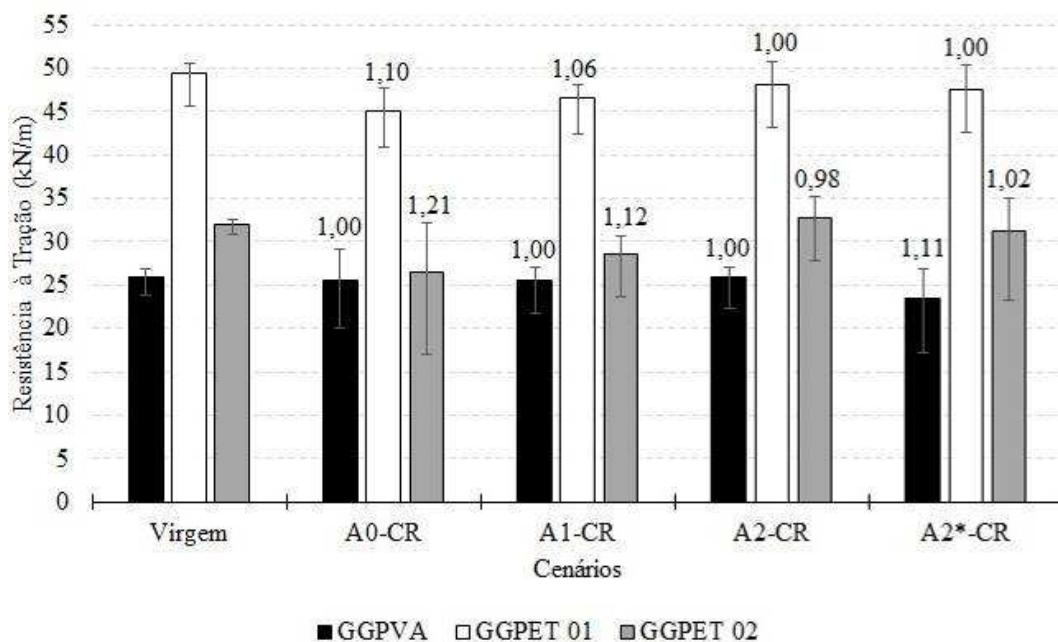
Por fim, observa-se que há variação dos resultados de redução de resistência à tração, deformação na ruptura e seus respectivos fatores de redução. Esse resultado está atrelado a complexidade dos mecanismos envolvidos na geração de dano, que decorrem do material de preenchimento – seja por sua variabilidade, seu lançamento, disposição e efeitos de

compactação – e do material de reforço – polímeros constituintes das fibras, massa por unidade de área, abertura de seus elementos e rigidez.

4.2.4.2 Análises dos cenários com compactação (CR e CS)

Os danos ocasionados pelos processos de compactação podem ser analisados a partir dos cenários A0-CR (altura 0,0 m e compactador rolo) e A0-CS (altura 0,0 m e compactador à percussão) das três geogrelhas em estudo. Os valores médios e limites (máximos e mínimos) de resistência à tração das amostras pertinentes aos cenários virgem e com compactação com rolo vibratório das três geogrelhas em estudo estão apresentados na Figura 4.41. Os resultados revelaram que os limites apresentaram comportamento semelhante aos danos causados pelo procedimento de lançamento de material: maior CV das amostras danificadas em relação as amostras virgens.

Figura 4.41 – Valores médios e limites (máximos e mínimos) de resistência à tração das amostras virgem e danificadas no cenário com compactação com rolo vibratório.



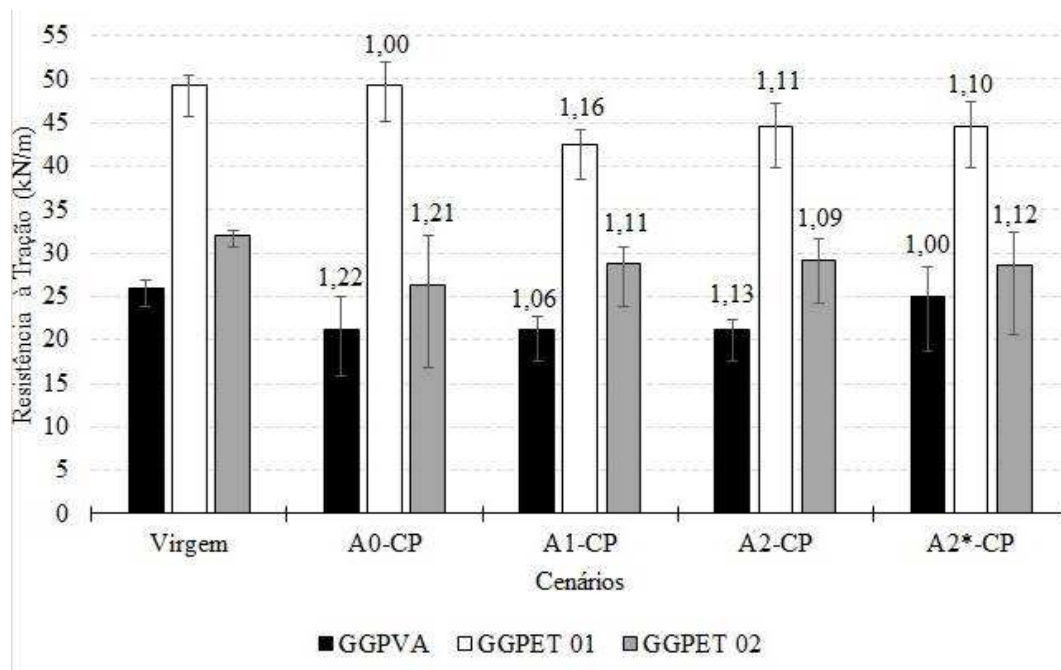
Para a GGPVA, GGPET 01 e GGPET 02, as reduções devido a compactação com rolo vibratório (cenário A0-CR) foram de 1,43%, 8,78%, e 17,18%, respectivamente. Portanto, o

dano ocasionado pela compactação com rolo mostrou ser mais agressivo quanto menor a rigidez do material.

A análise visual dos danos, revelou que: i) na GGPVA, 16,7% dos elementos longitudinais (EL) apresentaram dano por abrasão; ii) a GGPET 01, teve 11,1% dos EL com danos de contusão e abrasão; e iii) a GGPET 02 sofreu abrasão acima de 50% em todos seus elementos (EL, ET e NÓ) e 33,3% de contusão nos EL. Verificou-se que somente a GGR 01 apresentou valor de \overline{T}_d dentro do intervalo de confiança de \overline{T}_v , resultando em $FR_{DI}^T = 1,00$; para as geogrelhas GGPET 01 e GGPET 02, os valores de FR_{DI}^T foram 1,10 e 1,21, respectivamente.

Os resultados das amostras submetidas ao processo de compactação à percussão (Figura 4.42) revelaram diminuição de 18,11%, para GGPVA, e de 17,65%, para a GGPET 02. Não foi observada alteração da resistência à tração da GGPET 01. Os FR_{DI}^T calculados foram 1,22, para a GGPVA, 1,00, para a GGPET 01, e 1,21, para GGPET 02.

Figura 4.42 – Valores médios e limites (máximos e mínimos) de resistência à tração das amostras virgem e danificadas no cenário com compactação à percussão.



A análise visual mostrou danos semelhantes (33,3% de abrasão nos EL) para as GGPVA e GGPET 03, coincidindo com a semelhança nos FR_{DI}^T das duas geogrelhas. Por outro lado, verificou-se 33,3% de dano de contusão e 0% de abrasão nos EL da GGPET 01 o que pode

indicar que a GGPET 01 possui maior resistência aos danos em relação às outras geogrelhas sob mesma condição de ensaio. Este dado pode estar associado à maior massa por unidade de área da geogrelha em relação as demais, conforme observado por Huang e Chiao (2006) e Lim e McCartney (2013).

Quanto à deformação, de maneira geral, as geogrelhas constituídas de fibra de poliéster mostram ser mais sensíveis aos danos de compactação. Entretanto, somente nos cenários GGPET 01-A0-SC e GGPET 02-A0-CR obtiveram FR_{DI}^e maiores que 1,00 (1,13 e 1,10, respectivamente).

Comparando os danos oriundos dos dois processos de compactação, percebe-se que, no geral, o compactador à percussão gerou redução superior em relação a do rolo vibratório. Esse resultado pode ser associado à diferença de aplicação de carga dos dois equipamentos. Em virtude dos graus de compactação atingidos serem semelhantes – 89%, para o rolo, e 92, para o compactador à percussão, constata-se que a diferença no processo de aplicação de carga não influenciou em demasia nos danos de compactação. Santos, Bueno e Palmeira (2012) encontraram $FR_{DI}^T = 1,28$ para compactação à percussão, porém o grau de compactação atingido foi de 95%, o que pode ser um indicativo que os danos de compactação dependem mais do grau de compactação atingido do que em relação ao procedimento de compactação em si.

4.2.4.3 Sinergia entre os danos causados pelo lançamento e compactação do RCD-R

Com intuito de avaliar a sinergia entre os fatores estudados – altura de queda e método de compactação – que afetam os danos mecânicos no processo de instalação de geogrelhas, evidencia-se que o FR_{DI}^T pode ser obtido de duas formas diferentes:

- i) a realização de ensaios em que ambos os fatores foram simulados em conjunto (A1-CR, A2-CR, A1-CS, A2-CS etc.); e
- ii) a multiplicação dos FR_{DI}^T decorrentes somente da altura de queda (A1-SC, A2-SC e A2*-SC) pelos decorrentes somente da compactação (A0-CR ou A0-CS).

A Tabela 4.16 apresenta os FR_{DI}^T calculados conforme as duas formas descritas acima.

Tabela 4.16 – Comparação do FR_{DI}^T obtido por duas metodologias diferentes.

Cenário	GG	FR_{DI}^T ⁽¹⁾	FR_{DI}^T ⁽²⁾	A1-SC	A2-SC	A2*-SC	A0-CR	A0-CS
A1-CR	PVA	1,00	1,00	1,00	-	-	1,00	-
	PET 01	1,06	1,10	1,00	-	-	1,10	-
	PET 02	1,12	1,21	1,00	-	-	1,21	-
A2-CR	GGPVA	1,00	1,00	-	1,00	-	1,00	-
	GGPET 01	1,00	1,10	-	1,00	-	1,10	-
	GGPET 02	0,98	1,34	-	1,11	-	1,21	-
A1-CS	GGPVA	1,06	1,22	1,00	-	-	-	1,22
	GGPET 01	1,16	1,00	1,00	-	-	-	1,00
	GGPET 02	1,11	1,21	1,00	-	-	-	1,21
A2-CS	GGPVA	1,13	1,22	-	1,00	-	-	1,22
	GGPET 01	1,11	1,00	-	1,00	-	-	1,00
	GGPET 02	1,09	1,34	-	1,11	-	-	1,21
A2*-CR	GGPVA	1,11	1,11	-	-	1,11	1,00	-
	GGPET 01	1,00	1,10	-	-	1,00	1,10	-
	GGPET 02	0,94	1,14	-	-	0,94	1,21	-
A2*-CS	GGPVA	1,00	1,35	-	-	1,11	-	1,22
	GGPET 01	1,10	1,00	-	-	1,00	-	1,00
	GGPET 02	1,12	1,14	-	-	0,94	-	1,21

⁽¹⁾ Simulação do cenário em campo

⁽²⁾ Multiplicação de fatores de redução isolados

A análise dos diferentes fatores de redução revelou que, na maioria dos cenários, a multiplicação de fatores de redução isolados levou a valores de FR_{DI}^T superiores em relação aos fatores obtidos por meio de simulações sucessiva de danos em campo. Desse modo, o processo de multiplicar os fatores isolados de cada dano mostra-se a favor da segurança em

projetos de engenharia que envolva a utilização de geossintéticos. No entanto, os resultados obtidos revelam que a sinergia envolvida no processo de dano mecânico em geogrelhas trata-se de algo mais complexo, sendo necessário analisar a sua ocorrência para casos específicos. Rosete *et al.* (2013) verificaram que a multiplicação de fatores isolados referentes a danos de abrasão e carga cíclica também atuam a favor da segurança.

4.2.4.4 Análises da rigidez danificada com 2% e 5% de deformação

As análises realizadas investigando a influência dos danos mecânicos na rigidez das geogrelhas – com 2% e 5% de deformação – revelou que, com exceção de alguns cenários da geogrelha de álcool polivinílico (GGPVA), todos os fatores de redução encontrados pertinente à rigidez ($FR_{DI}^{2\%}$ e $FR_{DI}^{5\%}$) obtiveram valor unitário (1,00), portanto, com valores de $\overline{J_{sec_d}^{2\%}}$ e $\overline{J_{sec_d}^{5\%}}$ dentro do intervalo de variabilidade de rigidez das amostras virgens. O alto CV encontrado nestes parâmetros, elevou o intervalo de confiança das amostras virgens, justificando assim os resultados encontrados. Dentro do intervalo, não foi possível observar uma relação entre os fatores investigados (altura de queda e método de compactação) nos valores de rigidezes obtidos.

Entretanto os valores de $\overline{J_{sec_d}^{2\%}}$ e $\overline{J_{sec_d}^{5\%}}$, se associados aos de $\overline{T_d}$ e $\overline{\varepsilon_d}$, fornecem uma relação tensão-deformação que descreve o comportamento geral das cinco amostras ensaiadas de cada cenário. Tomando como base estes valores, é possível esboçar num plano cartesiano quatro pontos, sendo estes:

- i) origem (0; 0),
- ii) ponto médio, referente a rigidez danificada com 2% de deformação ($2\%; \overline{J_{sec_d}^{2\%}}/2\%$);
- iii) ponto médio referente a rigidez danificada com 5% de deformação ($5\%; \overline{J_{sec_d}^{5\%}}/5\%$); e
- iv) ponto de pico ($\overline{\varepsilon_d}; \overline{T_d}$).

No mesmo plano cartesiano, esboça-se a relação tensão-deformação geral das amostras virgens a partir dos mesmos pontos, porém retratando as amostras virgens com os seguintes pontos:

- i) origem (0; 0),
- ii) ponto médio, referente a rigidez virgem com 2% de deformação ($2\% ; \overline{J_{\text{sec}_V}^{2\%}} / 2\%$);
- iii) ponto médio referente a rigidez virgem com 5% de deformação ($5\% ; \overline{J_{\text{sec}_V}^{5\%}} / 5\%$); e
- iv) ponto de pico ($\overline{\varepsilon_V} ; \overline{T_V}$).

Essa representação, realizada no mesmo plano cartesiano, possibilita verificar o comportamento da curva tensão-deformação das amostras danificadas em relação às amostras virgens de cada cenário avaliado. Nesta análise, quatro situações distintas foram observadas (Figura 4.43) e os cenários se enquadram conforme a Tabela 4.17:

- I. Valor menor de resistência à tração de pico e maior valor de rigidez;
- II. Valor menor de resistência à tração de pico com rigidezes danificadas semelhante às virgens;
- III. Valor menor de resistência à tração de pico e menor valor de rigidezes; e
- IV. Valor maior de resistência à tração de pico com maior ou menor valor de rigidez.

Figura 4.43 – Comportamentos curvas tensão-deformação virgem *versus* danificada.

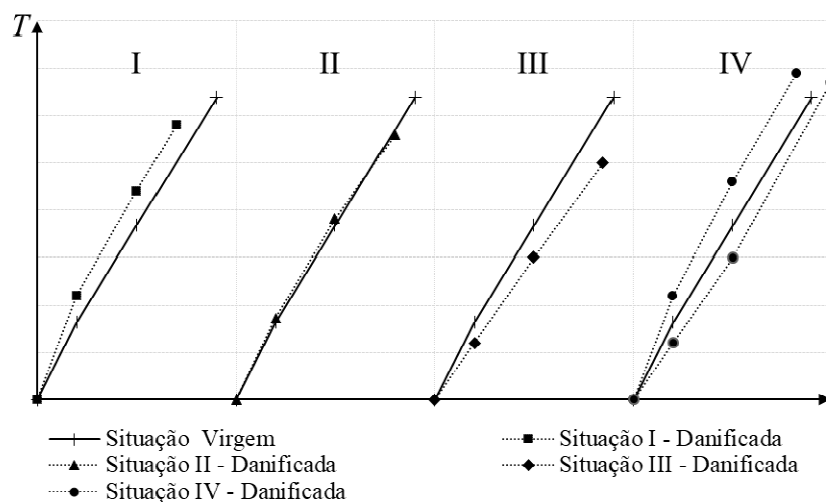


Tabela 4.17 – Comportamento tensão-deformação identificado para cada cenário.

Geogrelha	Situação observada				
	I	II	III	IV	
GGPVA	A0-SC	A1-SC	A0-CR	-	
	A1-CR	A2-SC	A2-CR		
			A0-CS		
			A1-CS		
			A2-CS		
			A2*-SC		
			A2*-CR		
			A2*-CS		
	GGPET 01	A0-SC	A2-CR	-	A1-SC
		A2-SC	A0-CS		A2*-SC
A0-CR					
A1-CR					
A1-CS					
A2-CS					
A2*-CR					
A2*-CS					
GGPET 02	-	A1-SC	A2-SC	A0-SC	
			A0-CR	A2-CR	
			A1-CR	A2*-SC	
			A0-CS		
			A1-CS		
			A2-CS		
			A2*-CR		
			A2*-CS		

Estudos realizados por Allen e Bathurst (1994) e Vieira e Pereira (2015a) observaram comportamento das curvas tensão-deformação de amostras virgem e danificadas seguindo as características referentes à situação III – redução das resistências de pico e de rigidez –, estas associadas a FR_{DI}^T superiores a 1,00.

Na investigação com os danos causados por RCD-R, verificou-se que as geogrelhas GGPVA e GGPET 02 obtiveram grande quantidade de cenários com comportamentos enquadrados na situação III; enquanto a GGPET 01 apresentou a maioria dos cenários enquadrados na situação I. Diante das diferentes situações observadas nas geogrelhas em relação ao comportamento tensão-deformação após o dano mecânico, revela-se que essa análise (danos em geogrelhas) deve levar em consideração não só as mudanças de resistência de pico, mas também as alterações de rigidez, uma vez que isso pode influenciar o comportamento da obra.

Vale ressaltar, como apresentado no item (4.2.1), que na maioria das curvas tensão-deformação das geogrelhas, virgens ou danificados, a rigidez com 2% de deformação mostrou-se superior que a rigidez com 5% de deformação. Este resultado é comprovado pelo abatimento da curva tensão-deformação entre as deformações de 1% a 3% (exemplos: Figuras 4.19, 4.25 e 4.33), ou seja, verifica-se mudança de inclinação da curva quando se analisa as duas deformações mencionadas. Mais uma vez, essa observação revela a importância da análise da rigidez no comportamento mecânico das geogrelhas.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Os impactos causados pelos resíduos de construção e demolição (RCD) levaram à adoção de técnicas de reciclagem que tornam o material beneficiado – resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) – atrativo como material de preenchimento em obras geotécnicas. Desse modo, este estudo propôs avaliar os danos mecânicos causados por RCD-R em elementos de reforço para aplicação em estruturas de solo reforçado com geossintéticos. Neste contexto, este capítulo apresenta as conclusões obtidas neste estudo e sugestões para pesquisas futuras.

5.1 CONCLUSÕES

Diante dos resultados encontrados, as seguintes conclusões podem ser tomadas quanto à caracterização geotécnica do RCD-R:

- ◆ As análises gravimétricas das sete amostras analisadas mostraram a predominância de solo – maior constituinte observado, concreto, argamassa e cerâmica vermelha, em sequência; o que permite classificar o RCD-R na classe A estabelecida pelo CONAMA (2012);
- ◆ O peso específico médio dos grãos passantes na peneira de abertura 4,78 mm foi de 26,97 kN/m³, o qual encontra-se dentro do intervalo dos valores de peso específico aferidos para o solo da região de Goiânia–GO;
- ◆ Os ensaios de granulometria revelaram que o defloculante causou uma pequena mudança nas curvas com e sem defloculante; e visualizou-se uma variabilidade considerável da distribuição granulométrica;
- ◆ Verificou-se que a composição gravimétrica do RCD-R influencia na distribuição granulométrica do material de forma que, quanto maior o teor de solo e menor os teores de concreto e de argamassa, menos abatidas foram as curvas no trecho entre os diâmetros de 0,02 e 9 mm;

- ◆ Segundo as classificações para solo da NBR 6502 (ABNT, 1995), TRB (BRASIL, 2006) e SUCS (ASTM, 2006), as amostras de RCD-R revelaram uma granulometria variando entre pedregulho e areia, sendo observado para a maioria uma distribuição mal graduada;
- ◆ Os resultados de limites de Atterberg revelaram comportamento não plástico em todas as amostras de RCD-R;
- ◆ Os resultados do ensaio de compactação – com reuso de material e energia Proctor normal – revelaram peso específico seco máximo médio de 18,11 kN/m³ e umidade ótima média de 14,6%. Devido às variabilidades encontradas nesses parâmetros, verificou-se que o teor de concreto é diretamente proporcional ao peso específico seco máximo, enquanto o teor de materiais cerâmicos apresenta mesma correlação com a umidade ótima;

Em relação às simulações de danos de instalação, os resultados permitem chegar as seguintes conclusões:

- ◆ A instalação experimental construída em campo permitiu simular os danos mecânicos de instalação em diferentes cenários, mostrando-se uma interessante estratégia para a realização de estudos com este enfoque, uma vez que busca criar condições observadas em obras;
- ◆ A adoção de análise estatística – no caso, a distribuição t de Student – mostrou-se importante para avaliar os danos mecânicos em geogrelhas, tendo em vista que a variabilidade encontrada a partir de amostras virgens em ensaios de tração mostrou-se considerável;
- ◆ As amostras danificadas apresentaram maior coeficiente de variabilidade (CV) em relação aos parâmetros analisados (resistência de pico, deformação na ruptura e rigidezes) a partir dos ensaios de tração em faixa larga, em relação as amostras virgens;
- ◆ Os fatores de redução pertinentes à resistência à tração de pico (FR_{DI}^T) mostraram-se superiores aos fatores de redução relativos a deformação na ruptura (FR_{DI}^e) e rigidezes com 2% e 5% de deformação ($FR_{DI}^{2\%}$ e $FR_{DI}^{5\%}$, respectivamente);

- ◆ O procedimento de lançamento do material de preenchimento mostrou diminuir a resistência à tração das geogrelhas, porém, os valores encontrados mostraram-se dentro do intervalo de resistência das amostras virgens, atribuindo, assim, valores de FR_{DI}^T iguais a 1,00. Contudo, a geogrelha de poliéster (PET) com menor rigidez mostrou-se bastante afetada pelos dados oriundos do lançamento, exibindo valores de FR_{DI}^T iguais a 1,02 e 1,12, para as alturas de queda de 1,0 metro e 2,0 metros, respectivamente;
- ◆ Os resultados das simulações sem processos de compactação mostraram que os danos ocorridos não exibiram relação direta com a altura de lançamento do material, uma vez que foram observados maiores percentuais de redução de resistência (PSR) para alturas de quedas inferiores ou mesmo sem altura de queda;
- ◆ Os danos decorrentes da variação da altura de queda do material mostraram afetar de forma mais marcante a geogrelha de PVA_L, o que faz acreditar que sua maior rigidez a flexão seja o ponto responsável por esse resultado;
- ◆ A adoção da camada de proteção – de aproximadamente 50 mm de RCD-R – mostrou-se ineficaz uma vez que, por se tratar de um material com a mesma granulometria, partículas de maiores dimensões ou angulosidade podem estar em contato com o elemento de reforço causando maior dano durante o processo de lançamento ou compactação;
- ◆ O processo de compactação com rolo vibratório causou menor dano em relação a compactação à percussão. Esse resultado pode estar relacionado a diferença no grau de compactação atingido por cada compactação, 89% para o rolo e 92% para o sapo. Contudo, o não umedecimento do material antes do processo de compactação certamente influenciou nos resultados encontrados;
- ◆ As reduções da resistência à tração de pico ocasionadas devido aos processos de compactação revelaram reduções superiores às decorrentes do processo de lançamento do material, fornecendo fatores de redução superiores a 1,00;
- ◆ Os resultados dos cenários em que ambos procedimentos de danos foram simulados – altura de queda e compactação –, revelaram que a multiplicação de fatores isolados de cada dano é favorável a segurança em projetos de engenharia que envolvam a utilização de geossintéticos;

- ◆ As análises visuais mostraram que o dano que mais afeta a resistência de geogrelhas devido aos danos mecânicos de instalação é a abrasão, seguida dos danos de contusão. Não foram verificados danos de corte e separação que pudessem influenciar na resistência de geogrelhas após as simulações dos danos; contudo, vale ressaltar que a adoção de um único corpo de prova de geogrelha para tal análise pode não representar os danos visuais sofridos por toda uma camada sujeita ao processo de instalação;
- ◆ Os fatores de redução relativos a rigidez não apresentaram reduções abaixo do intervalo de rigidez das amostras virgens, conferindo a grande maioria dos cenários avaliados valores de $FR_{DI}^{2\%}$ e $FR_{DI}^{5\%}$ iguais a 1,00. Esse resultado pode ter sido bastante influenciado pelos elevados coeficientes de variação encontrados nas amostras virgens para o cálculo da rigidez com 2% e 5% de deformação. Nesse contexto, fica ressaltada a importância do esforço dos fabricantes de geogrelhas em adotar procedimentos padronizados a fim de garantir a produção de materiais com baixa variabilidade de seus parâmetros;
- ◆ A análise das curvas tensão-deformação antes e após a simulação dos danos mostraram quatro situações distintas, o que revela a importância em avaliar as alterações da rigidez do geossintético quando submetido à danos mecânicos de instalação.

Diante das conclusões apresentadas, confirma-se a importância de obtenção de fatores de redução para situações específicas quando se trata do uso de resíduos de construção reciclados (RCD-R) junto aos elementos de reforço poliméricos. Espera-se que os resultados obtidos neste trabalho possam contribuir para um maior entendimento dos processos envolvidos com os danos mecânicos, de forma a obter projetos não só atentos às questões ambientais e econômicas, mas também atendendo a os critérios de segurança esperados para esse tipo de obra.

5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

De posse dos resultados e conclusões obtidos neste trabalho sugere-se para pesquisas futuras:

- ◆ Analisar a variabilidade de agregados reciclados durante maior intervalo de tempo com intuito de avaliar os efeitos dos processos de produção adotados pela empresa nas características mecânicas desses novos materiais de construção;
- ◆ Verificar as características que influenciam a quebra dos agregados reciclados e o efeito desta na angularidade das partículas dos materiais resultantes dos processos de fabricação ou compactação;
- ◆ Avaliar a eventual influência da distribuição granulométrica de agregados reciclados nos danos mecânicos de instalação em geossintéticos;
- ◆ Investigar a influência do polímero constituinte, das características geométricas (abertura da malha) e processo de fabricação na ocorrência de danos mecânicos em geogrelhas;
- ◆ Verificar a influência dos danos mecânicos em outras características das geogrelhas, como a resistência ao arranchamento e à fluência à tração, com intuito de avaliar o comportamento a longo prazo de estruturas de solo reforçado com geossintéticos;
- ◆ Investigar a influência dos danos mecânicos em outros danos (ambientais ou químicos) aos quais elementos de reforço possam estar submetidos em condições reais de obra.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, P. R.; VERTEMATTI, J. C.. Introdução. In: VERTEMATTI, J. C. (Coord.). **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015. Cap. 1. p. 17-30
- ALLEN, T. M.; BATHURST, R. J.. Characterization of geosynthetic load-strain behavior after installation damage. **Geosynthetic International**, v. 1, n. 2, p.181-199, 5 abr. 1994.
- ALLEN, T. M.; BATHURST, R. J.; BERG, R. R..Global Level of Safety and Performance of Geosynthetic Walls: An Historical Perspective. **Geosynthetics International**, Vol. 9, Nos. 5-6, pp. 395-450. 2002.
- ALMEIDA, N.. Análise de viabilidade técnica para a utilização de resíduos de construção e demolição no subleito e na base de um pavimento em concreto permeável. 2017. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2141-00**: Standard specification for materials for soil-aggregate subbase, base, and surface courses. Overland Park (KS): ASTM International, 2000. 3 p.
- _____. **D2487-06**: Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). Overland Park (KS): ASTM International, 2006. 12 p.
- _____. **D6637-01**: Standard test method for determining tensile properties of geogrids by the single or multi-rib tensile method. Overland Park (KS): ASTM International, 2001. 6 p.
- 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.; JOHN, V. M.. Normalização dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados para concretos e a variabilidade. Em: Anais do **Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído**, 9 , 2002, Foz do Iguaçu. Anais. Paraná: ANTAC, 2002. P. 1613 – 1624.
- ANGULO, S. C.; TEIXEIRA, C. E.; CASTRO, A. L. Resíduos de construção e demolição: avaliação de métodos de quantificação. **Eng Sanit Ambient**, v. 16, n. 3, p.299-306, jul. a set., 2011.
- ANTE, J. R. O.. **Geossintéticos como reforço de revestimentos em pavimentação**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. 2012.
- ANTUNES, L. G. S.. **Reforço de pavimentos rodoviários com geossintéticos**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. 2008.
- ARAÚJO NETO, O. G.. **Ensaio de arrancamento de geogrelha com equipamento de pequenas dimensões aplicado a compostos de resíduos de construção**. 2017. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2014**. Grappa Editora e Comunicações: São Paulo. ISSN 2179-8303. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10007**: Amostragem de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – utilização em pavimentação e reparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 6459**: Solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016c.

_____. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 6508**: Grãos de solso que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2016a.

_____. **NBR 7180**: Solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016d.

_____. **NBR 7181**: Solo: análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 2016b.

_____. **NBR 7182**: Solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016e.

_____. **NBR 7185**: Solo – Determinação da massa específica aparente, “in situ”, com emprego do frasco de areia. Rio de Janeiro, 2016g.

_____. **NBR 9895**: Solo índice de suporte Califórnia - Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2016f.

_____. **NBR NM 26**: Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro, 2009.

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

Disponível em: <https://issuu.com/sanchocom/docs/relatorio-pesq2015-abrecon?embed_cta=read_more&embed_context=embed&embed_domain=abrecon.org.br&embed_id=6666802%2F37960095>. Acesso em: 19 dez. 2017.

AUSTIN, R. A.. Effects of installation Activities and Fire Exposure on Geogrid Performance. **Geotextiles and Geomembranes**, 15, p.367-376, 1997.

BARBOSA, F. A. S.; SILVA, E. M.; SANTOS, E. C. G.. Redução de Resistência de Geossintéticos de Polipropileno (PP) Devido a Danos de Instalação Causados por Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R). Em: Anais do **XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, 2016, Belo Horizonte. COBRAMSEG 2016, 2016. v. XVIII. 6 p.

BARBOSA, K. R. M.. **Degradação de geogrelhas em estradas não pavimentadas executadas com resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R)**. 2017. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2017.

BENSON, C. H.; KUCUKKIRCA, I. E.; SCALIA, J.. Properties of geosynthetics exhumed from a final cover at a solid waste landfill. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 28, n. 6, p.536-546, dez. 2010.

BRASIL. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes (DNIT). Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de Pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006. 274 p.

BRASIL. Lei nº 12.305/2010, de 02 de agosto de 2010. **Política nacional de resíduos sólidos**. Brasília, DF, ago 2010.

BRITO, J.; PEREIRA, A. S.; CORREIA, J. R.. Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 4, p.429-433, abr. 2005.

BS 8006. Code of Practice for Strengthened/Reinforced Soils and Other Fills. British Standard Institution, 2010. 260p.

BUENO, B. S.; LOTTI, C. L.. Matérias-Primas. In: VERTEMATTI, J. C. (Coord.). **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015. Cap. 2. p. 31-46.

BUTERA, S.; CHRISTENSEN, T. H.; ASTRUP, T. F.. Composition and leaching of construction and demolition waste: Inorganic elements and organic compounds. **Journal of Hazardous Materials**. 2014.

_____. Life cycle assessment of construction and demolition waste management. **Waste Management**. 2015.

CABRAL, A. E. B.. Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD. 2007. 251 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências da Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2007.

CARDOSO, R.; SILVA, R. V.; BRITO, J.; DHIR, R.. Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review. **Waste Management**. Lisboa, p. 131-145. 2016.

CHO, S. D.; LEE, K. W.; CAZZUFFI, D. A.; JEON, H. Y.. Evaluation of combination effects of installation damage and creep behavior on long-term design strength of geogrids. **Polymer Testing**, v. 25, n. 6, p. 819-828, set. 2006.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 307**. Brasília, 2002.

_____. **Resolução nº 448**. Brasília, 2012.

COWELL, T.; PYO, S.; GABR, M. A.; BORDEN, R. H.; KIN, K.J.. Performance Assessment of Geosynthetics and Cement as Subgrade Stabilization Measures. **Geotechnical Testing Journal**. 15 p. maio 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTES. **DNIT 141**: Pavimentação - Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010. 9 p.

DIAS, M. C. C.. **Viabilidade do uso de solo tropical e resíduo de construção civil em sistemas de cobertura de aterro sanitário**. 2014. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia, 2014.

DUVALL, D. E.. Impact of product structure on the stability and durability of coated poly(ethylene terephthalate) geogrids. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 13, n. 3, p.133-145, jan. 1994.

ESIN, T.; COSGUN, N.. A study conducted to reduce construction waste generation in Turkey. **Build and Environment**, v. 42, 1667-1674, 2007.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). **Corrosion/Degradation of soil reinforcements for mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes**. In: ELIAS, V.; FISHMAN, K. L.; CHRISTOPHER, B. R.; BERG, R. R.. FHWA-NHI-09-087. FHWA, Washington, DC, 2009.155 p.

_____. **Design and construction of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes – Volume I**. In: BERG, R. R.; CHRISTOPHER, B. R.; SAMTANI, N. C.. FHWA-NHI-10-024. FHWA, Washington, DC, 2010. 332 p.

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: GEOCENTRO - IV Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica na Região Centro Oeste**, Goiânia-GO. 2017.

GOIÂNIA. Plano Municipal De Gestão Integrada De Resíduos Sólidos Do Município De Goiânia (PMGIRS). 3 fev. 2016

GONZALEZ-TORRE, I.; CALZADA-PEREZ, M. A.; VEJA-ZAMANILLO, A.; CASTRO-FRESNO, D.. Damage evaluation during installation of geosynthetics used in asphalt pavements. **Geosynthetics International**, v. 21, n. 6, p.377-386, dez. 2014.

GREENWOOD, J. H.; SCHROEDER, H. F.; VOSKAMP, W. (Org.). **Durability of Geosynthetics**. CUR Building and Infrastructure Committee C 187, 295 P. 2012.

GUPTA, R.. **A Study of Geosynthetic Reinforced Flexible Pavement System**. 2009. 281 f. Tese (Doutorado) - Filosofia, University of Texas, Austin, 2009.

HERRADOR, R.; PEREZ, P.; GARACH, L.; ORDONEZ, J.. Use of Recycled Construction and Demolition Waste Aggregate for Road Course Surfacing. **Journal of Transportation Engineering**, p. 182-190. fev. 2012.

HSIEH, C. W.; WU, J. H.. Installation Survivability of Flexible Geogrids in Various Pavement Subgrade Materials. **Transportation Research Record**, v. 218, n. 01, p.190-196, 2001.

HSIEH, C. W.; WU, J. H.; LIN, C. K.; HSIEH, M. W. The study of installation damage of flexible geogrids. Proceedings of the **2th European Conference on Geosynthetics – EUROGEO II**, Bologna. Italy, IGS – Workshop, 10p. 2007.

HUANG, C. C.; LIAO, C. C.. Abrasion damage of geogrids induced by turbid flow. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 25, n. 2, p.128-138, 2007.

HUANG, C. C.; WANG, Z. H.. Installation damage of geogrids: influence of load intensity. **Geosynthetics International**, v. 14, n. 2, p.65-75, 2007.

HUANG, C.-C.. Laboratory simulation of installation damage of a geogrid. **Geosynthetics International**, 13, No. 3, 120–132. 2006.

HUANG, C.-C.; CHIOU, S.-L.. Investigation of installation damage of some geogrids using laboratory tests. **Geosynthetics International**, v. 13, n. 1, p.23-35,2006.

HUFENUS, R.; RUEGGER, R.; FLUM, D.; STERBA, I. J.. Strength reduction factors due to installation damage of reinforcing Geosynthetics. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 23, n. 5, p.401-424, 2005.

HUFENUS, R.; RUEGGET, R.; FLUM, D.. Geosynthetics for reinforcement – resistance to damage during installation. Proceedings of the **Seventh International Conference on Geosynthetics**, Nice, pp. 1387–1390, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL (IBAM). **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. Ed. 15, 2001. 200 p.

IONESCU, A.; KISS, S.; DRAGAN-BULARDA, M.; RADULESCU, D.; KOLOZSKI, E.; PINTEA, H.; CRISAN, R.. Methods Used for Testing the Bio-Colmatation and-Degradation of Geotextiles Manufactured in Romania. Proceeding of the **2nd International Conference on Geotextiles**, Las Vegas, NV, August 1 - 6, 1982, Vol. 2, IFAI Publ., St Paul, MN, pp. 547-52. 1982.

ISO 10722. Geotextiles and geotextile-related products – procedure for simulating damage during installation – Part 1: Installation in granular materials. 8 p. 2007.

JEON, H. Y.; BOUAZZA, A.. Experimental investigation of installation damage for geogrids. Proceedings Of The **Institution Of Civil Engineers - Ground Improvement**, v. 163, n. 4, p.197-205, nov. 2010.

JOÃO PEDRO CALEIRO (Brasil). EXAME. **As 20 cidades com as maiores economias do Brasil**. 2017. Disponível em: <<https://exame.abril.com.br/economia/as-20-cidades-com-as-maiores-economias-do-brasil/>>. Acesso em: 30 maio 2018.

KAKUDA, F. M.; PARREIRA, A. B.; FABBRI, G. T. P.. Análise de um pavimento reforçado com geossintético a partir de resultados de ensaio em equipamento de grandes dimensões. **Transportes**, v. 19, n. 3, p.28-34, maio 2011.

KARTAM, N.; AL-MUTAIRI, N.; AL-GHUSAIN, I.; AL-HUMOUD, J.. Environmental management of construction and demolition waste in Kuwait. **Waste Management**, 24, 1049 – 1059, 2004.

KOKESI, J.. Use of geosynthetics to improve seismic performance of earth structures. **Geotextiles and Geomembranes**. Tóquio, p. 51-68. abr. 2012.

KOMATSU, T.; KIKUTA, H.; TUJI, Y.; MURAMATSU, E.. Durability assessment of geogrid-reinforced asphalt concrete. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 16, n. 5, p.257-271, out. 1998.

LEITE, F. C.; MOTTA, R. S.; CASCONSELOS, K. L.; BERNUCCI, L.. Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. **Construction And Building Materials**. São Paulo, p. 2972-2979. jan. 2011.

LIM, S. Y.; McCARTNEY, J. S.. Evaluation of effect of backfill particle size on installation damage reduction factors for geogrids. **Geosynthetics International**, 20, No. 2, 62–72. 2013

LUIZ, G.C.. **Influência da relação solo-atmosfera no comportamento hidromecânico de solos tropicais não saturados**: Estudo de caso – Município de Goiânia. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-075/2012, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 246 p. 2012.

MACEDO, M. C.. **Investigação sobre o comportamento geomecânico de misturas de solo com resíduos de pneus e resíduos de construção e demolição**. 2016. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2016.

MÁLIA, M.; BRITO, J.; PINHEIRO, M. D.; BRAVO, M.. Construction and demolition waste indicators. **Waste Management & Research**, v. 31, n. 3, p.241-255, 11 jan. 2013.

MELO, D. L. A.; SANTOS, E. C. G.. Influence of curing process on recycled construction and demolition waste (RCDW)/nonwoven geotextile interface shear strength. In Proceedings of the **3rd Pan – American Conference on Geosynthetics – GeoAmericas 2016**. Miami, USA, 6p, 10-13 april 2016.

_____. Shear strength of RCDW/nonwoven geotextile interface. In Proceedings of the **10th International Conference on Geosynthetics**, 2014, Berlin. Proceedings. Essen: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, 2014. v. 1. p. 1-7.

MOREIRA, S. P. C. N. M.. Efeitos da danificação mecânica de geossintéticos no comportamento como filtro em sistemas de cobertura de estruturas de confinamento de resíduos. 2009. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia do Ambiente, Universidade do Porto, Porto, 2009.

MOTTA, R. S.. Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego. 2005. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2005.

NAGATAKI, S.; GOKCE, A.; SAEKI, T.; HISADA, M.. Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 6, p.965-971, jun. 2004.

NASCIMENTO, M. T.. Avaliação de dano mecânico em geossintéticos em obras de disposição de resíduos. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. 2002.

NATIONAL CONCRETE MASONRY ASSOCIATION (NCMA). **Segmental Retaining Walls Best Practices Guide**: for the Specification, Design, Construction, and Inspection of SRW Systems. USA: Va, 2010. 64 p.

NIEKERK, A. A. V.; MOLENAAR, A. A. A.; HOUBEN, L. J. M.. Effect of material quality and compaction on the mechanical behavior of base course materials and pavement performance. In: **Proceedings of 6th international conference on the bearing capacity of roads and airfields**, Lisbon, Portugal, p. 1071- 1079. 24-26 June 2002.

NORAMBUENA-CONTRERAS, J.; GONZALEZ-TORRE, I.. Influence of geosynthetic type on retarding cracking in asphalt pavements. **Construction and Building Materials**, v. 78, p.421-429, mar. 2015.

NORAMBUENA-CONTRERAS, J.; GONZALEZ-TORRE, I.; FERNANDEZ-ARNAU, D.; LOPEZ-RIVEROS, C.. Mechanical damage evaluation of geosynthetics fibres used as anti-reflective cracking systems in asphalt pavements. **Construction and Building Materials**, v. 109, p.47-54, abr. 2016.

OLIVEIRA, M. E. D.; SALES, R. J. M.; OLIVEIRA, L. A. S.; CABRAL, A. E. B.. Diagnóstico da geração e da composição dos RCD de Fortaleza/CE. **Eng. Sanit. Ambient.** Fortaleza, p. 219-224. jul. 2011.

OSSA, A.; GARCÍA, J. L.; BOTERO, E.. Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates: A sustainable alternative for pavement construction industry. **Journal of Cleaner Production**. México, p. 379-386. 18 jun. 2016.

PALMEIRA, E. M.. **The study of soil reinforcement interaction by means of large scale laboratory tests**. 1987. 238 f. Tese (Doutorado) – Curso de Filosofia, Magdalen College, Universidade de Oxford, Oxford, 1987.

PALMEIRA, E. M.; MILLIGAN, G. W. E.. Scale and other factors affecting the results of pull-out tests of grids buried in sand. **Geotechnique**, Vol. 39, nº 3, pp.511 – 524, 1989.

PAULA, A.M., PINHO-LOPES, M., LOPES, M. D. L.. Damage during installation laboratory test-influence of the type of granular material. In: **Proceedings of the Third European Geosynthetics Conference**, EurGeo 3, pp. 603–606. 2004.

_____. Effect of damage during installation on the mechanical behavior of biaxial woven polyester geogrid. Proceedings of the **5th European Conference on Geosynthetics – EUROGEO 5**, Valencia. Spain, IGS-Spanish Chapter, Madrid, Spain, 4, pp. 446–451. 2012.

PENG, C. L.; SCORPIO, D. E.; KITBERT, C. J.. Strategies for successful construction and demolition waste recycling operations. **Construction management and economics**, v. 1, n. 15, p.49-58, 1997.

PEQUENAS EMPRESAS & GRANDES NEGÓCIOS (PE & GN). **Construtora Inova na Gestão de Resíduos**: Projeto criado pela Pontal Engenharia reaproveita entulhos gerados nos canteiros de obras. 2012. Disponível em: <<http://revistapegn.globo.com/Revista/Common/0,,EMI289094-17180,00-CONSTRUTORA+INOVA+NA+GESTAO+DE+RESIDUOS.html>>. Acesso em: 21 jan. 2012.

PINHO-LOPES, M.; LOPES, M. L.. Tensile properties of geosynthetics after installation damage. **Environmental Geotechnics**, v. 1, n. 3, p.161-178, ago. 2014.

PINHO-LOPES, M.; PAULA, A. M.; LOPES, M. L.. Long-term response and design of two geosynthetics: effect of field installation damage. **Geosynthetics International**, v. 25, No. 1, 98–117, 2018.

POON, C. S.; CHAN, D.. Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base. **Construction and Building Materials**, v. 20, n. 8, p.578-585, out. 2006.

RAJA, J. M.. Reducing the Environmental Impact of Construction through Use of Geosynthetics. Tese de Doutorado. Loughborough University. 2015.

RICHARDSON, G. N.. Field Evaluation of Geosynthetic Survivability in aggregate road base. **Geotechnical Fabrics Report**, p.34-38, set. 1998.

ROSA, I. L.; SANTOS, E. C. G.. Fatores de Influência na Permeabilidade de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R). Anais do **XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, 2016, Belo Horizonte. COBRAMSEG 2016, 2016. v. XVIII. 6 p.

ROSETE, A.; LOPES, P. M.; PINHO-LOPES, M.; LOPES, M. L.. Tensile and hydraulic properties of geosynthetics after mechanical damage and abrasion laboratory tests. **Geosynthetics International**, v. 20, No. 5, 358–374, 2014.

SANTOS NETO, F. C.. **Uso de resíduos da construção civil para melhoramento de solos colapsíveis**. 2015. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2015.

SANTOS, A. G.; TEIXEIRA, R. W.; MELLO, E. A.; TEIXEIRA, J.. Avaliação do custo de construção de uma estrutura de pavimento empregando agregado reciclado de RCD. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil (REEC)**, v. 10, n. 1, p. 1–13, 2015.

SANTOS, E. C. G.. **Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado**. 2007. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Geotecnia, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2007.

_____. **Avaliação Experimental de Muros Reforçados Executados com Resíduos de Construção Demolição Reciclados (RCD-R) e Solo Fino**. 2011. 216 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

SANTOS, E. C. G.; BUENO, B. S.; PALMEIRA, E. M.. Strength reduction of geosynthetics used in RSW built with RCDW as backfill material. Proceedings of the **5th European Conference on Geosynthetics – EUROGEO 5**, Valencia, Spain, IGS-Spanish Chapter, Madrid, Spain, 4, pp. 481–485. 2012.

SANTOS, E. C. G.; PALMEIRA, E. M.; BATHURST, R. J.. Performance of two geosynthetic reinforced walls with recycled construction waste backfill and constructed on collapsible ground. **Geosynthetics International**, v. 21, n. 4, p.256-269, ago. 2014.

_____. 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.

_____. Construction of a full-scale wrapped face geogrid reinforced wall using recycled construction and demolition waste as backfill material. Proceedings of the **9th International Conference on Geosynthetics**, Guarujá, Brazil, IGS-Brazilian Chapter/ABMS, Sao Paulo, Brazil, vol. 4, pp. 1769–1772. 2010.

SANTOS, E. C. G.; VILAR, O. M.. Use of recycled construction and demolition wastes (RCDW) as backfill of reinforced soil structures. Proceedings of the **4th European Conference on Geosynthetics – EUROGEO 4**, Edinburgh, UK, IGS-UK Chapter, London, UK, paper 199. 2008.

SANTOS, E. C. G.; VILAR, O. M.; ASSIS, A. P.. Statistical Analysis of Geotechnical Parameters of Recycled Construction and Demolition Waste (RCDW). Proceedings of the **17th International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering**. Alexandria - Egito, 2009.

SANTOS, E. C. G.; VILAR, O. M.; PALMEIRA, E. M.. The use of recycled construction and demolition waste in geosynthetic reinforced structures: Influence of the recycling process. Proceedings of the **6th International Conference on Environmental Geotechnics**, New Delhi, India, Tata McGraw Hill, New Delhi, India, vol. 1, pp. 1105–1108. 2010.

SCHNEIDER, D. M.. **Deposições irregulares de resíduos da construção civil na cidade de São Paulo**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil. 2003, 130p.

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE, RECURSOS HÍDRICOS, CIDADES, INFRAESTRUTURA E ASSUNTOS METROPOLITANOS (SECIMA). **Plano de Resíduos Sólidos do Estado de Goiás: Produto 10**. Goiânia, Goiás, Brasil. 470 p. 2015.

SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL (SNSA). Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: **Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos – 2014**. Brasília, Brasil. MCIDADES.SNSA, 154 p. 2016.

_____. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: **Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos – 2015**. Brasília, Brasil. MCIDADES.SNSA, 173 p. 2017.

SHUKLA, S. K.; YIN, J. H.. **Fundamentals of Geosynthetic Engineering**. Londres: Taylor & Francis Group, 2006. 428 p.

SILVA FILHO, J. A. C. ; SANTOS, E.C.G . Panorama of research on recycled construction and demolition waste (RCDW) in Brazil. Proceeding of the **Second Symposium on Urban Mining**, Bergamo. 7 p. 2014.

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. Anais do **IV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**. Salvador, Bahia, nov. 2013.

SILVA, R. V.; BRITO, J.; DHIR, R. K.. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction and Building Materials**, v. 65, p.201-217, ago. 2014.

SILVA, W. M.; SOUZA, L. O.; SILVA, A. M.. **Utilização de resíduos da construção civil na cidade de Goiânia GO**. Enciclopédia Biosfera: Centro Científico do Saber. Goiânia, p. 1-12. 2010.

SOUZA, M. V. R.. **Comportamento mecânico de um agregado reciclado como base de pavimento flexível a partir de um modelo físico**. 2015. 125 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília (UNB), Brasília, 2015.

TAHERKHANI, H.. Evaluation of the Physical Properties of Unbound Base Layer Containing Recycled Aggregates. **International Journal of Environmental Science and Development**. p. 279-285. abr. 2015.

TAM, V. W. Y.. On the effectiveness in implementing a waste-management-plan method in construction. **Waste Management**, v. 28, 1072-1080, 2008.

TAM, V. W. Y.; TAM, C. M.. A review on the viable technology for construction waste recycling. **Resources, Conservations & Recycling**. Austrália, p. 209-221. jan. 2006.

VERTEMATTI, J. C.. Aplicação em Reforço de Solo. In: VERTEMATTI, J. C. (Coord.). **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015. Cap. 4. p. 86-93.

VIEIRA, C. S.; PEREIRA, P. M.. Damage induced by recycled Construction and Demolition Wastes on the short-term tensile behaviour of two geosynthetics. **Transportation Geotechnics**, v. 4, p.64-75, set. 2015a.

_____. Interface shear properties of geosynthetics and construction and demolition waste from large-scale direct shear tests. **Geosynthetics International**, v. 23, n. 1, p.62-70, fev. 2016.

_____. Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 103, p.192-204, out. 2015b.

YOO, H.; JEON, H.-Y.; CHANG, Y.-Y.. Evaluation of Engineering Properties of Geogrids for Soil Retaining Walls. **Textile Research Journal**, v. 80, n. 2, p.184-192, jan. 2010.

YUAN, H.; SHEN, L.. Trend of the research on construction and demolition waste management. **Waste Management**. 2011.