

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

**RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DE
GEOGRELHA ENTERRADA EM AREIAS
RECICLADAS**

PRISCILA FERNANDA SILVA DE OLIVEIRA

D0235G20
GOIÂNIA – GO
2020

23070.052635/2020-16 1701561

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) 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 9.610/98](#), 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.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico Dissertação Tese**2. Nome completo do autor**

Priscila Fernanda Silva de Oliveira

3. Título do trabalho

Resistência ao arrancamento de geogrelha enterrada em areias recicladas

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

- a)** consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);
b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Eder Carlos Guedes Dos Santos, Professor do Magistério Superior**, em 24/11/2020, às 22:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **PRISCILA FERNANDA SILVA DE OLIVEIRA, Discente**, em 25/11/2020, às 08:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1701561** e o código CRC **2F0E8D64**.

PRISCILA FERNANDA SILVA DE OLIVEIRA

RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DE GEOGRELHA ENTERRADA EM AREIAS RECICLADAS

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 Carlos Guedes dos Santos, M.Sc., D.Sc.

Coorientador: Prof. Ennio Marques Palmeira, M.Sc., PhD.

D0235G20
GOIÂNIA – GO
2020

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

Oliveira, Priscila Fernanda Silva de
Resistência ao arrancamento de geogrelha enterrada em areias recicladas [manuscrito] / Priscila Fernanda Silva de Oliveira. - 2020.
153 f.

Orientador: Prof. Dr. Eder Carlos Guedes dos Santos; co orientador Ennio Marques Palmeira.

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

Bibliografia. Apêndice.

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

1. Resíduos de construção e demolição. 2. Geossintéticos. 3. Reciclagem. 4. Interação solo-reforço. 5. Sustentabilidade. I. Santos, Eder Carlos Guedes dos, orient. II. Título.

11/01/2021

SEI - Documento para Assinatura

Processo: 23070.052635/2020-16 Documento: 1702696



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 236 da sessão de Defesa de Dissertação de **Priscila Fernanda Silva de Oliveira** que confere o título de Mestre em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, na área de concentração em **Geotecnia**.

Aos **onze dias do mês de dezembro do ano de dois mil e vinte**, a partir das **14:00**, por meio de **videoconferência**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada **“Resistência ao arrancamento de geogrelha enterrada em areias recicladas”**. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor **Eder Carlos Guedes dos Santos (PPGGECON/UFG)**, com a participação do Coorientador, Professor Doutor **Ennio Marques Palmeira (UnB)**, e dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor **Renato Resende Angelim (PPGGECON/UFG)**, membro titular interno; Professor Doutor **Fernando Henrique Martins Portelinha (UFSear)**, membro titular externo. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação tendo sido a candidata **aprovada** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor **Eder Carlos Guedes dos Santos**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos **onze dias do mês de dezembro do ano de dois mil e vinte**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Eder Carlos Guedes Dos Santos, Professor do Magistério Superior**, em 11/12/2020, às 21:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **PRISCILA FERNANDA SILVA DE OLIVEIRA, Discente**, em 12/12/2020, às 12:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Renato Resende Angelim, Professor do Magistério Superior**, em 14/12/2020, às 11:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **FERNANDO HENRIQUE MARTINS PORTELINHA, Usuário Externo**, em 14/12/2020, às 12:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1702696** e o código CRC **BBB2DB10**.

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a Deus, meus pais,
Elza e Jorge, e a minha irmã, Patrícia.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, sempre, por me dar saúde, força e fé para continuar a caminhar mesmo em tantos momentos de dificuldade. Por me guiar todos os dias na realização dos meus sonhos. Abrigada, meu Deus!

Aos meus pais, meus primeiros professores, por me proporcionarem estudar em período integral, pelo amor, carinho, incentivos e entenderem tantos momentos de ausência devido à distância. Agradeço por me incentivarem a correr atrás dos meus sonhos, e por estarem ao meu lado em todos os momentos.

A minha irmã, por sempre me apoiar, incentivar, ajudar, ouvir minhas reclamações e por todo o carinho e atenção em tantos momentos. Obrigada por sempre me fazer sorrir.

Ao meu namorado, por todo amor, apoio, paciência, preocupação e por entender os momentos de ausência para a conclusão dessa dissertação. Agradeço, por sempre me incentivar e acreditar no meu potencial. Obrigada por trazer mais leveza aos meus dias.

Ao meu professor e orientador, Prof. Eder Santos, pelo profissionalismo, exemplo de seriedade, dedicação, paciência, e por todo o conhecimento transmitido. Obrigada, pelas conversas e informações principalmente nesse ano de pandemia. Obrigada, também, por tantos conselhos e incentivos para seguir na minha carreira profissional.

Ao meu coorientador, Prof. Ennio Palmeira, por me receber de forma tão receptiva em visita feita à UnB e pelos conselhos importantes dados para a realização desse trabalho.

Aos (às) professores (as) Carlos Vargas, Gilson Gitirana Jr., João Paulo Silva, Lilian Rezende, Márcia Mascarenha, Maurício Sales e Renato Angelim por todo o conhecimento passado, por ensinarem de forma ética, pelas palavras de incentivo e por todas as oportunidades oferecidas. Agradeço, de forma especial, ao professor Carlos Vargas, por todo apoio necessário na utilização do LabGEO e outras burocracias dentro da UFG, e pelos conselhos e oportunidades de pesquisa; ao professor Maurício Sales por auxiliar nas burocracias da UFG, por sua aula brilhante e por tantos conselhos e suas boas conversas; e as professoras Marcia Mascarenha e Lilian Rezende pela oportunidade de participar do projeto “Conversa entre meninas e engenheiras”, foi muito gratificante participar de algo que incentiva mulheres na ciência.

Aos amigos da minha turma de mestrado, Alexandre Britto, Carlos Amaecing Junior, Eduardo Ferreira, Jaqueline Souza, João Victor Guabiroba, Luiz Galvani Junior, Marcus de Castro, Paulo Cotrim, Romulo Machado e Sabrina Cabral, por tantos momentos de estudo na “salinha” e por tantas vezes que me auxiliaram com meus ensaios, e principalmente com meu equipamento de arrancamento. Agradeço, em especial, Jaqueline Souza pela sua grande amizade, pelas palavras motivacionais, pelo exemplo de determinação e por tantos momentos divertidos que tivemos durante esse tempo de mestrado.

Aos amigos do grupo de pesquisa, Gabriel Silvestre, Mailson Queiroz e Marcela Domiciano, por tantos conhecimentos trocados. Aos amigos de outras turmas de mestrado, Rafael Goulart, Anna Monteiro, Dyene Silva, Isabela Machado, Lucas Silva, Luiz Varrone e Renan Nunes, por conhecimentos compartilhados, conversas e momentos de diversão. Aos amigos das rotinas de laboratório, Arielly e Gustavo Elias, que sempre alegravam meus dias com sua alegria contagiante.

Aos alunos de graduação, Johnson Ventura, Laryssa Rodrigues e Mariana Braga pelo auxílio em laboratório, que foi imprescindível para a realização da parte experimental desse trabalho.

A todos os técnicos da UFG, em especial ao João Junior e Clayton, técnicos do Laboratório de Geotecnia (LabGEO), que tanto me ensinaram, aconselharam e com quem desenvolvi uma boa amizade; Walter, Antônio e Vitor do Laboratório de Inovação Tecnológica em Construção Civil (LABITECC), por toda a ajuda técnica e pelas boas conversas; João, do Laboratório de Materiais e Processos de Fabricação (LAMAF), que sempre me recebeu de forma tão educada e sempre ajudou de forma rápida; e a Tatiane, Laboratório Multiusuário de Microscopia de Alta Resolução (LabMic), pela educação e proatividade.

Agradeço ao LabGEO e o LABITECC por todo o aporte necessário para a realização da parte experimental dessa pesquisa. Agradeço ao LAMAF pelas peças fabricadas e ajustes realizados no equipamento de execução dos ensaios de arrancamento. Agradeço ao LabMic por todo auxílio prestado na preparação de amostras para análise de imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva (EDS).

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

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

A Huesker pelo fornecimento de toda a geogrelha utilizada neste trabalho.

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

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

RESUMO

A indústria da construção civil é uma das atividades mais importantes para o desenvolvimento econômico e social de um país. Nesse contexto, as técnicas de utilização de geossintéticos vêm ganhando força e sendo cada vez mais difundidas. Porém, com o próprio crescimento da indústria da construção civil, observa-se um significativo aumento da geração de resíduos de construção e demolição (RCD), o que provoca diversos impactos ambientais. Atualmente, os resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) têm demonstrado propriedades geotécnicas que justificariam a sua utilização em estrutura de solo reforçado (ESR) com geossintéticos. Dessa forma, diante do potencial de uso do RCD-R e geogrelhas, faz-se necessário o entendimento da interação desses materiais, pois trata-se de um aspecto fundamental na concepção de projetos. Diante disso, este trabalho propôs estudar a interação entre uma geogrelha usualmente empregada em ESR e areias recicladas por meio de ensaios de arrancamento realizados em equipamento de pequeno porte. Para tanto, foram realizados ensaios de arrancamento com mesmo grau de compactação e com uma geogrelha enterrada em diferentes tipos de areias recicladas e natural (para fins comparação). As amostras foram coletadas a fim de efetuar a sua caracterização em laboratório e avaliar a variabilidade dos seus parâmetros geotécnicos. Também foram realizados ensaios de imagens (MEV) nas areias a fim de conhecer e comparar as superfícies dos grãos. Além dos materiais de preenchimento, buscou-se investigar outros fatores capazes de influenciar a resistência de arrancamento: i) variação da largura da geogrelha e ii) umidades dos materiais de preenchimento. A caracterização geotécnica das areias recicladas mostrou uma baixa variabilidade das suas propriedades, características geotécnicas que as assemelham a materiais naturais e comportamento não plástico. Os ensaios de imagens revelaram que as areias recicladas possuem cimentações nas superfícies das partículas. Os resultados dos ensaios de arrancamento demonstraram as influências dos diversos fatores investigados de maneiras específicas. As sobrecargas de confinamento delimitaram a zona de tensões em que realmente foi possível realizar o arrancamento da geogrelha, no sistema de ensaio montado. As areias recicladas apresentaram comportamentos satisfatórios durante os ensaios de arrancamento de geogrelha, e observou-se que a construção de uma areia reciclada, com granulometria semelhante à de uma areia natural, melhorou ainda mais as características desse material reciclado. Conclui-se que as areias recicladas possuem propriedades físicas e mecânicas que viabilizam o seu uso em estruturas de solo reforçado atendendo, além dos requisitos técnicos, as características ambientais desejadas para esse tipo de obra geotécnica.

Palavras-chave: Resíduos de construção e demolição. Geossintéticos. Reciclagem. Interação solo-reforço. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The construction industry is one of the most important activities for the economic and social development of a country. In this context, the techniques of using geosynthetics are gaining strength and being increasingly widespread. However, with the growth of the civil construction industry itself, a significant increase in the generation of construction and demolition waste (CDW) can be observed, which causes several environmental impacts. Currently, recycled construction and demolition waste (RCDW) has demonstrated geotechnical properties that would justify its use in reinforced soil structure (RSS) with geosynthetics. Thus, given the potential use of RCDW and geogrids, it is necessary to understand the interaction of these materials, as this is a fundamental aspect in project design. In light of this, this paper proposed to study the interaction between a geogrid usually used in RSS and recycled sands through pull-out tests performed on small equipment. For this purpose, yanking tests with the same degree of compaction and with a geogrid buried in different types of recycled and natural sands (for comparison purposes) were performed. The samples were collected in order to perform their characterization in the laboratory and to evaluate the variability of their geotechnical parameters. Image tests on recycled and natural sand were carried out to verify and compare their grain surfaces. In addition to filler materials, other factors influencing tear strength were investigated: i) variation in geogrid width and ii) moisture of filler materials. The geotechnical characterization of recycled sands showed a low variability of their properties, geotechnical characteristics that resemble natural materials and non-plastic behavior. The image tests, revealed that the recycled sands have cementation on the grain surfaces. The results of the pull tests demonstrated the influences of the various factors investigated in specific ways. Containment overloads have delimited the area of stress where the geogrid could actually be pulled out of the assembled test system. Recycled sands exhibited satisfactory results for the geogrid pull-out tests. The grain size distribution of the built recycled sand improved the characteristics of this material. Based on the results, it is possible to conclude that evaluated recycled sands are good materials to be used as backfill material in reinforced soil structure, meeting physical, mechanical and environmental requirements for this kind of work.

Keywords: Construction and demolition waste. Geosynthetics. Recycling. Soil-reinforcement interaction. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Relação entre RCD-R e RCD gerados por usinas brasileiras durante o ano (MIRANDA; ANGULO; CARELI, 2009) – modificado pela autora.....	38
Figura 2.2 – Quantidade de usinas instaladas por ano (MIRANDA; ANGULO; CARELI, 2009).....	38
Figura 2.3 – Percentuais dos volumes dos produtos fabricados (FLEURY; SIQUEIRA NETO; SANTOS, 2017) – modificado pela autora.....	39
Figura 2.4 – Exemplos de estruturas de solo reforçado (PALMEIRA, 1987) – modificado pela autora.....	40
Figura 2.5 – Construção e instrumentação da estrutura de solo reforçado com geogrelha e RCD-R (SANTOS; PALMEIRA; BATHURST, 2013) – modificado pela autora.....	42
Figura 2.6 - Mecanismos de interação solo-reforço numa estrutura de solo reforçado com geossintéticos (PALMEIRA, 2009) – modificado pela autora.....	43
Figura 2.7 – Equipamento de tração confinada desenvolvido por McGown, Andrews e Kabir (1982) – (BUENO; VILAR, 2004).....	44
Figura 2.8 – Influência nos resultados devido o tipo de sistema de aplicação da tensão confinante nos ensaios de arrancamento (PALMEIRA, 1987) – modificada pela autora.....	53
Figura 2.9 – Influência do comprimento da manga nos resultados de arrancamento (LOPES; LADEIRA, 1996) – modificada pela autora.....	54
Figura 2.10 – Influência da umidade nos ensaios realizados com diferentes sobrecargas: a) umidade ótima; b) inundação (PORTELINHA, PEREIRA; CORREIA, 2018) – modificada pela autora.....	55
Figura 2.11 – Influência da pressão lateral de terra na parede frontal (FARRAG; ACAR; JURAN, 1993).....	56
Figura 2.12 – Influência qualitativa da dimensão dos grãos de solo (JEWELL <i>et al.</i> , 1984).....	59

Figura 2.13 – Influência do tamanho dos grãos de solo nos resultados de arrancamento (LOPES E LOPES, 1999).....	60
Figura 2.14 – Efeito do espaçamento entre elementos transversais na resistência ao arrancamento τ_{95} . (TEIXEIRA, 2003).....	61
Figura 2.15 – Fator K_{50} para deslocamento interno (SIEIRA, 2003).....	62
Figura 2.16 – Efeito do Tipo de Geogrelha no Parâmetro K_{50} – para tensão confinante de 12,5 kPa (SIEIRA, 2003).....	63
Figura 2.17 – Efeito da tensão de confinamento no resultado do ensaio de arrancamento (PORTELINHA; PEREIRA; CORREIA, 2018).....	64
Figura 2.18 – Relação entre deslocamento e força de arrancamento para diferentes tensões confinantes (OCHIAI <i>et al.</i> , 1996).....	65
Figura 2.19 – Coeficiente de interação para os materiais analisados (SANTOS, 2007).....	66
Figura 2.20 – Resultados obtidos para ensaios de arrancamento por Vieira et al. (2018) em RCD-R fino: a) Variação das dimensões da amostra de geogrelha de poliéster sobre sobrecarga de 25 kPa; e b) Variação da sobrecarga com geogrelha de poliéster com dimensões de 250 mm x 750 mm.....	67
Figura 3.1 – Resíduos reciclados na usina de reciclagem em Aparecida de Goiânia – GO.....	69
Figura 3.2 – Locais de coleta da areia reciclada na pilha de estocagem: a) topo; b) meio e c) base.....	69
Figura 3.3 – Materiais utilizados: a) AN adquirida em armazém de construção; b) ARC coletada em usina de reciclagem e c) ARC-C (obtida por peneiramento da ARC).....	70
Figura 3.4 – Disposição da geogrelha em estudo.....	71
Figura 3.5 – Ensaio de Cisalhamento Direto: a) Vista superior da caixa porta-amostra e b) Conjunto montado.....	74
Figura 3.6 – Caixa de arrancamento: a) Vista Frontal; b) Vista superior; c) Vista da caixa fechada; e d) Bolsa de ar acoplada a tampa da caixa.....	75
Figura 3.7 – Esquema de montagem de todos os acessórios para a realização dos ensaios de arrancamento.....	76

Figura 3.8 – Experimento montado para realização do ensaio.....	76
Figura 3.9 – Detalhes da montagem do ensaio: a) Revestimento das paredes da caixa; b) Compactação das camadas; c) CTT introduzida na segunda camada; d) Inserção da geogrelha; e) Preenchimento das camadas superiores; e f) Película protetora da bolsa de ar na última camada.....	78
Figura 4.1 – Curvas granulométricas com e sem defloculante da amostra de ARC-06.....	81
Figura 4.2 – Curvas granulométricas das amostras de ARC (sem defloculante).....	82
Figura 4.3 – Curvas granulométricas com e sem defloculante da AN.....	83
Figura 4.4 – Curvas granulométricas de ARC-C e AN.....	83
Figura 4.5 – Coeficiente de variação do material passante versus diâmetro dos grãos – ARC (01 a 06) sem defloculante.....	84
Figura 4.6 – Variação entre a coloração das amostras da ARC (01 e 05) e ARC-06	85
Figura 4.7 – Faixa granulométrica das amostras de ARC (01 a 06).....	85
Figura 4.8 – Coeficiente de variação do material passante versus diâmetro dos grãos – AN e ARC-C.....	86
Figura 4.9 – Gradação das amostras de ARC para aplicação em ESR.....	87
Figura 4.10 – Gradação das amostras de AN e ARC-C para aplicação em ESR.....	88
Figura 4.11 – Ensaio de limite de plasticidade da ARC: a) parcela da amostra separada para obter a forma de um cilindro; b) parcela que apresentou quebra e não foi possível moldar o cilindro; c) parcela que adquiriu o tamanho de 10 cm porém, não atendeu ao diâmetro de 3 mm.....	89
Figura 4.12 – Curvas de compactação das amostras de ARC (01 a 06) e ARC-C.....	90
Figura 4.13 – Imagens de MEV das amostras de ARC e AN: a) grãos passante na peneira de 4,8 mm e retidos na de 2,0 mm (aumento de 30x); b) grãos passante na peneira de 2,0 mm e retidos na de 1,2 mm (aumento de 50x); e c) grãos passante na peneira de 0,075 mm (aumento de 200x).....	93
Figura 4.14 – Imagens de MEV nas amostras de ARC e AN: a) grãos passante na peneira de 4,8 mm e retidos na peneira de 2,0 mm (aumento de 550x); b) grãos passante na peneira de 2,0	

mm e retidos de 1,2 mm (aumento de 550x); e c) grãos passante na 0,075 mm (aumento de 1.000x).....	94
Figura 4.15 – Resultados de EDS para as partículas passantes na peneira de 4,80 mm e retidas na peneira 2,00 mm: a) ARC e b) AN.....	95
Figura 4.16 – Resultado de EDS para as partículas passantes na peneira de 2,00 mm e retidas na peneira 1,20 mm: a) ARC e b) AN.....	96
Figura 4.17 – Resultados de EDS para as partículas passantes na peneira de 0,075 mm: a) ARC e b) AN.....	96
Figura 4.18 – Resultado do ensaio de cisalhamento direto da ARC-06-S: a) curvas tensão versus deslocamento horizontal; e b) curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal.....	97
Figura 4.19 – Resultado do ensaio de cisalhamento direto da ARC-06-U: a) curvas tensão versus deslocamento horizontal; e b) curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal.....	98
Figura 4.20 – Resultado do ensaio de cisalhamento direto da ARC-C-06-S: a) curvas tensão versus deslocamento horizontal; e b) curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal.....	99
Figura 4.21 – Resultado do ensaio de cisalhamento direto da ARC-C-06-U: a) curvas tensão versus deslocamento horizontal; e b) curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal.....	100
Figura 4.22 – Resultado do ensaio de cisalhamento direto da AN-S: a) curvas tensão versus deslocamento horizontal; e b) curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal.....	101
Figura 4.23 – Envoltória de resistência dos materiais.....	102
Figura 4.24 – Leituras de tensão normal obtidas com a utilização da CTT para os ensaios com ARC-200-U.....	103
Figura 4.25 – Leituras de tensão normal obtidas com a utilização da célula de tensão total para os ensaios com variação de largura da geogrelha para a ARC-200-U.....	104

Figura 4.26 – Leituras de tensão normal obtidas com a utilização da célula de tensão total para diferentes tipos de areias na sobrecarga de 12,5 kPa.....	104
Figura 4.27 – Ensaio de arrancamento (sobrecarga de 12,5 kPa).....	106
Figura 4.28 – Exumação das geogrelhas empregadas no ensaio de arrancamento (sobrecarga de 12,5 kPa): a) AN e b) ARC-C-200-S.....	107
Figura 4.29 – Ensaio de arrancamento (sobrecarga de 25 kPa).....	108
Figura 4.30 – Exumação da geogrelha empregada no ensaio de arrancamento com ARC-C-200-S (sobrecarga de 25 kPa).....	109
Figura 4.31 – Exumação da geogrelha empregada no ensaio de arrancamento com a AN (sobrecarga de 25 kPa): a) geogrelha envolvida pelo material granular e b) geogrelha após término do ensaio.....	109
Figura 4.32 – Ensaio de arrancamento (sobrecarga de 37,5 kPa).....	110
Figura 4.33 – Exumação das geogrelhas empregadas no ensaio de arrancamento (sobrecarga de 37,5 kPa): a) AN e b) ARC-200-S.....	111
Figura 4.34 – Ensaio de arrancamento (sobrecarga de 50 kPa).....	112
Figura 4.35 – Exumação das geogrelhas empregadas no ensaio de arrancamento (sobrecarga de 50 kPa): a) AN, b) ARC-C-200-U e c) ARC-200-S.....	113
Figura 4.36 – Ensaio de arrancamento (sobrecarga de 75 kPa).....	114
Figura 4.37 – Exumação da geogrelha submetida ao ensaio de arrancamento com uma sobrecarga de 75 kPa para a: a) AN, e b) ARC-C-200-U.....	115
Figura 4.38 – Ensaio de arrancamento (sobrecarga de 100 kPa).....	115
Figura 4.39 – Envoltória de resistência de interface solo-geogrelha.....	116
Figura 4.40 – Mecanismos de sollicitação nos ensaios de arrancamento: a) RCD-R e b) AN.....	118
Figura 4.41 – Variação do coeficiente de interface em função da tensão normal aplicada.....	119
Figura 4.42 – Envoltória de resistência ao arrancamento.....	121

Figura 4.43 – Envoltória de resistência: a) Para os RCD-R (12, 5 kPa a 50 kPa) e AN e (12,5 kPa a 37,5 kPa); e b) Para os RCD-R (12, 5 kPa a 37,5 kPa) e AN e (12,5 kPa a 25 kPa).....	122
Figura 4.44 – Quantidade de elementos longitudinais versus a tensão máxima de arrancamento.....	124
Figura 4.45– Coeficiente de interação (f) versus diâmetro médio (D50).....	125
Figura 4.46 – Força máxima de arrancamento versus tensão confinante: a) ARC-200 (umidade ótima e umidade higroscópica); b) ARC-C- 200 (umidade ótima e umidade higroscópica); c) ARC-200 e ARC-C-200 (umidade higroscópica); e d) ARC-200 e ARC-C-200 (umidade ótima).....	127
Figura 4.47 – Diferença entre os valores nominais e obtidos pela CTT para a ARC-20-S: a) Tensão normal e b) Coeficiente de Interação.....	129
Figura 4.48 – Relação entre os valores de sobrecargas lidos com a CTT e com o manômetro para diversos estudos de arrancamento com caixa de pequeno porte (sobrecarga nominal de 25 kPa).....	129
Figura 4.49 – Relação entre os valores de sobrecargas lidos com a CTT e com o manômetro para diversos estudos de arrancamento com caixa de pequeno porte (sobrecarga nominal de 50 kPa).....	130
Figura 4.50 – Relação entre os valores de sobrecargas lidos com a CTT e com o manômetro para diversos estudos de arrancamento com caixa de pequeno porte (sobrecarga nominal de 100 kPa).....	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição gravimétrica de algumas amostras de RCD-R – adaptado de Fleury (2018).....	35
Tabela 2.2 – Quantidade de RCD coletada pelos municípios brasileiros (ABRELPE, 2019) – modificado pela autora.....	35
Tabela 2.3 – Geração de RCD em Goiânia-GO – a partir de dados levantados por Fleury (2018).....	36
Tabela 2.4 - Configurações dos ensaios de arrancamento realizados por diversos autores (PEREIRA, 2010) – modificado pela autora.....	50
Tabela 2.5 – Variação dos materiais usados em ensaios de arrancamento.....	51
Tabela 2.6 – Valores obtidos pela CTT em diversos esquemas de ensaio de arrancamento.....	58
Tabela 2.7 – Força de arrancamento para os materiais em diferentes tensões confinantes (SANTOS, 2007).....	66
Tabela 2.8 – Força de arrancamento para areia e RCD-R em diferentes tensões confinantes (ARAÚJO NETO, 2017).....	66
Tabela 3.1 – Plano de coleta realizado e massas coletadas.....	69
Tabela 3.2 – Propriedades da geogrelha polimérica utilizada na pesquisa (fornecidas pelo fabricante).....	71
Tabela 3.3 – Normas empregadas na realização dos ensaios.....	72
Tabela 4.1 – Peso específico dos grãos da ARC.....	80
Tabela 4.2 – Faixa granulométrica e classificação dos materiais.....	86
Tabela 4.3 – Peso específico seco máximo e umidade ótima dos RCD-R ensaiados.....	90
Tabela 4.4 – Resultado encontrados em ensaios de compactação em areias recicladas.....	91
Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de índices de vazios máximos da AN, ARC e ARC-C.....	92
Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios de índices de vazios mínimos da AN, ARC e ARC-C.....	92
Tabela 4.7 – Dados das envoltórias de resistência dos ensaios de cisalhamento direto.....	102

Tabela 4.8 – Resumo dos resultados dos ensaios de arrancamento.....	117
Tabela 4.9 – Coeficientes de resistência de interface.....	119
Tabela 4.10 – Variação dos parâmetros de resistência devido as sobrecargas aplicadas.....	121
Tabela 4.11 –Resultados dos ensaios de arrancamento para as sobrecargas aplicadas.....	124
Tabela 4.12 –Parâmetros de resistência ao cisalhamento das areais e resistência de interface solo-geogrelha.....	125
Tabela 4.13 –Valores máximos de deslocamento e tensão de arrancamento.....	125
Tabela 4.14 –Parâmetros de resistência para os ensaios com resíduos variando a umidade.....	126
Tabela 4.15 – Valores máximos de deslocamento e tensão de arrancamento das areias em diferentes condições de umidades (sobrecarga de 12,5 kPa).....	127

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AN	Areia Natural
NA-200-S	Areia Natural envolvendo amostra de geogrelha com 200 mm de largura e o material granular no estado seco
ARC	Areia Reciclada Cinza
ARC-200-S	Areia Reciclada Cinza envolvendo amostra de geogrelha com 200 mm de largura e o material granular no estado seco
ARC-200-U	Areia Reciclada Cinza envolvendo amostra de geogrelha com 200 mm de largura e o material granular no estado úmido
ARC-C-200-S	Areia Reciclada Cinza Construída envolvendo amostra de geogrelha com 200 mm de largura e o material granular no estado seco
ARC-C-200-U	Areia Reciclada Cinza Construída envolvendo amostra de geogrelha com 200 mm de largura e o material granular no estado úmido
ARC-C	Areia Reciclada Cinza Construída
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BS	<i>British Standard</i>
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CTT	Célula de tensão total
<i>Cc</i>	Coefficiente de curvatura

CV	Coeficiente de variação
Cu	Coeficiente de uniformidade
DRX	Difração de raio X
EDS	Espectroscopia de raios x por dispersão em energia
EECA	Escola de Engenharia Civil e Ambiental
EN	<i>European Standard</i>
ESR	Estrutura de Solo Reforçado
FHWA	Federal Highway Administration
GC	Grau de compactação ou compacidade
GGPET	Geogrelhas de poliéster
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICC	Indústria da Construção Civil
LABGeo	Laboratório de Geotecnia
LABMic	Laboratório Multiusuário de Microscopia de Alta Resolução
LABITECC	Laboratório de Inovação Tecnológica em Construção Civil
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
NBR	Norma Brasileira
NCMA	National Concrete Masonry Association
NM	Norma Mercosul
NP	Não plástico

PET	Poliéster
PVC	Polímero de adição policloreto de vinila
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
RCD-R	Resíduos de Construção e Demolição Reciclados
SECIMA	Secretaria de Meio Ambiente, Recursos Hídricos, Infraestrutura, Cidades e Assuntos Metropolitanos
S	Seco (umidade higroscópica)
SP	Areia Mal Graduada
SP-SC	Areia Mal Graduada com Argila
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
U	Úmido (umidade ótima)
UFG	Universidade Federal de Goiás

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>a</i>	Adesão
<i>A</i>	Área plana do geossintético em contato com o solo
Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Alumina
B	Dimensão dos membros transversais
<i>c</i>	Coesão
Ca	Cálcio
CaO	Óxido de Cálcio
D ₅₀	Diâmetro médio das partículas
D ₈₅	Diâmetro que na curva granulométrica, corresponde à porcentagem que passa igual a 85%
<i>e_{máx}</i>	Índice de vazios máximos
<i>e_{mín}</i>	Índice de vazios mínimos
<i>f</i>	Coeficiente de interação solo-esforço
<i>f</i>	Relação entre a tg (δ) e tg (
Fe	Ferro
Fe ₂ O ₃	Óxido ferroso
K	Potássio
K ₂ O	Óxido de potássio
K ₅₀	Parâmetro de rigidez
Mg	Magnésio
MgO	Magnésia
P ₅₀	Declividade da reta secante para 50% da força máxima de arrancamento
Si	Silício

SiO_2	Sílica
T	Força máxima ao arrancamento da inclusão obtida em ensaio de arrancamento
δ	Ângulo de atrito de interface solo-geogrelha
ρ	Massa específica dos grãos
σ	Tensão normal atuante no esforço
γ	Peso específico dos grãos
$\gamma_d \text{ máx}$	Peso específico seco máximo
w	Umidade higroscópica
$w_{ot} / W_{ótima}$	Umidade ótima
ϕ	Ângulo de atrito do solo
θ	Ângulo qualquer
λ	Relação entre a adesão e coesão
$\tau_{\text{máx. arran}}$	Tensão máxima de arrancamento

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	29
1.1. JUSTIFICATIVA.....	30
1.2. OBJETIVOS.....	31
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	31
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO RECICLADOS (RCD-R).....	33
2.1.1. Geração dos resíduos de construção e demolição (RCD).....	34
2.1.2. Reciclagem dos resíduos de construção e demolição (RCD).....	36
2.2. ESTRUTURAS DE SOLO REFORÇADO COM GEOGRELHAS.....	39
2.3. INTERAÇÃO SOLO-REFORÇO	42
2.3.1. Ensaio de arrancamento.....	45
2.3.2. Condições de contorno que influenciam o ensaio de arrancamento	52
2.3.2.1. Sistema de aplicação da tensão de confinamento.....	52
2.3.2.2. Condição da parede frontal da caixa	53
2.3.2.3. Variação da umidade	54
2.3.2.4. Rigidez das paredes da caixa.....	56
2.3.2.5. Proximidade da Célula de Tensão Total com a parede frontal	57
2.3.2.6. Tamanho dos grãos, abertura da geogrelha e espessura das barras transversais	59
2.3.2.7. Efeito do tipo de solo	61

2.3.2.8.	Rigidez solo-reforço	62
2.3.2.9.	Tensão de confinamento.....	63
2.3.3.	Ensaio de Arrancamento com RCD-R	65
CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS.....		68
3.1.	MATERIAIS.....	68
3.1.1.	Resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) e areia natural	68
3.1.2.	Geogrelha.....	70
3.2.	MÉTODOS	71
3.2.1.	Caracterização geotécnica das areias recicladas e AN	72
3.2.2.	Ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e de Espectroscopia de raios x por dispersão em energia (EDS)	73
3.2.3.	Ensaio de cisalhamento direto	73
3.2.4.	Ensaio de arrancamento.....	74
CAPÍTULO 4 RESULTADOS		80
4.1.	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	80
4.1.1.	Peso específico dos grãos	80
4.1.2.	Análise Granulométrica	81
4.1.2.1.	Areia Reciclada Cinza	81
4.1.2.2.	Areia Natural e Areia Reciclada Cinza Construída.....	83
4.1.2.3.	Variabilidade da distribuição granulométrica	84
4.1.2.4.	Classificação geotécnica dos materiais	86

4.1.2.5.	Aplicação das areias recicladas em obras geotécnicas.....	87
4.1.3.	Índices de consistência.....	88
4.1.4.	Compactação da ARC e ARC-C	89
4.1.5.	Índice de vazios da AN, ARC e ARC-C	91
4.1.6.	Resultados de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e de Espectroscopia de raios x por dispersão em energia (EDS).....	92
4.1.7.	Cisalhamento Direto	97
4.2.	ENSAIOS DE ARRANCAMENTO	103
4.2.1.	Valores das tensões normais obtidas através da célula de tensão total	103
4.2.2.	Análise das Curvas Força versus Deslocamento para diversos valores de tensões normais	105
4.2.2.1.	Ensaio com tensão normal de 12,5 kPa	105
4.2.2.2.	Ensaio com tensão normal de 25 kPa	107
4.2.2.3.	Ensaio com tensão normal de 37,5 kPa	110
4.2.2.4.	Ensaio com tensão normal de 50 kPa	111
4.2.2.5.	Ensaio com tensões normais de 75 kPa e 100 kPa	114
4.2.3.	Efeito da sobrecarga na resistência ao arrancamento.....	116
4.2.4.	Análise dos Coeficientes de Resistência de Interface.....	118
4.2.5.	Efeito da sobrecarga nos parâmetros de resistência obtidos	120
4.2.6.	Efeito da largura das amostras de geogrelha	123
4.2.7.	Efeito do tipo de areia utilizada nos ensaios de arrancamento.....	124
4.2.8.	Efeito da variação da umidade na resistência das areias recicladas.....	126

4.2.9. Efeito dos valores obtidos através da célula de tensão total na resistência ao arrancamento	128
CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	131
5.1. CONCLUSÕES	131
5.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	132
REFERÊNCIAS	134
APÊNDICE A - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS AMOSTRAS DE ARC (COM DEFLOCULANTE)	146
APÊNDICE B - COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DO MATERIAL PASSANTE VERSUS DIÂMETRO DOS GRÃOS – ARC (01 A 06) COM DEFLOCULANTE.	147
APÊNDICE C – LEITURAS DE TENSÃO NORMAL OBTIDAS COM A UTILIZAÇÃO DA CÉLULA DE TENSÃO TOTAL	148
APÊNDICE D – DIFERENÇA ENTRE OS VALORES APLICADOS NA BOLSA DE AR E OS OBTIDOS PELA CTT.....	150

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A Indústria da Construção Civil (ICC) é um setor importante para o desenvolvimento dos países, uma vez que gera muitos empregos direta e indiretamente. Para atender às demandas dessa indústria, que se torna cada vez mais complexa, é necessário a utilização de novas técnicas e produtos. Os geossintéticos são um exemplo de um produto cuja utilização vem ganhando mercado em vários setores da ICC, dentre eles, na construção de estruturas de solo reforçado. Observa-se o empenho dos fabricantes no desenvolvimento desses produtos de forma a atender às diferentes situações de obras. Sabe-se que, para que esses produtos ganhassem espaço, foram necessários a realização de diversos estudos e experimentos, de modo que eles pudessem apresentar as características exigidas para cada situação. Dessa forma, os geossintéticos têm se apresentado como materiais com propriedades bem definidas, devido ao rigoroso controle na produção.

As geogrelhas são um dos tipos de geossintético que vem sendo empregado em diversos tipos de obras geotécnicas, como na pavimentação e em estrutura de solo reforçado. Nessas últimas, as geogrelhas são utilizadas como elementos de contenção em taludes artificiais, vias férreas batidas, muros, contenção lateral de pontes e outros; assim como em reparos ou reconstrução. Fatores que proporcionaram o aumento da sua utilização são a redução de custos, facilidade nas técnicas construtivas e bom comportamento quando comparado a estruturas não reforçadas.

Nas últimas décadas, houve uma demanda crescente de bens produzidos pela ICC e, com isso, as áreas urbanas têm produzido uma quantidade cada vez maior de resíduos oriundos de diferentes atividades de construção, os chamados “resíduos de construção e demolição” (RCD). Porém, por falta de políticas para a gestão correta desses resíduos, observa-se ainda que os RCD, na maioria das vezes, encontram-se depositados de forma inadequada em terrenos próximos às obras, principalmente àquelas de pequeno porte.

Neste contexto, é necessário que a sociedade desenvolva formas sustentáveis para dar destinação aos resíduos e atender às demandas por matérias-primas. Uma das formas de alcançar isso é através do desenvolvimento de novas técnicas e processos que contemplem a utilização de materiais reciclados. A gestão dos RCD é relativamente nova em comparação a

outros resíduos – como gestão de resíduos sólidos urbanos – e, nesse sentido, reduzir a geração de RCD ainda é algo desafiador. Assim, gerenciar os RCD de maneira adequada para a sua reciclagem apresenta-se como um modo de diminuir a utilização de matérias-primas e mitigar impactos adversos ao meio ambiente. Diante disso, de forma a reduzir os impactos devido à urbanização, deve-se incentivar sempre que possível o uso de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R).

Diante desse cenário, uma das alternativas sustentáveis de utilização de grandes volumes de RCD-R têm sido seu emprego em obras geotécnicas, como: i) material de aterro em obras de pavimentação; ii) agregados para concreto e argamassa; iii) em sistema de cobertura de aterros sanitário; iv) em melhoramento de solos colapsíveis; v) em sistemas de drenagem; e vi) em estruturas de solo reforçado (ESR). Dessa forma, alguns estudos recentes têm sido realizados com o intuito de investigar a viabilidade da utilização do RCD-R em obras geotécnicas que utilizam geossintéticos em suas instalações, como é o caso das ESR. Contudo, para a consolidação desse material reciclado em ESR, é necessário compreender melhor não só as suas características físicas e mecânicas, mas também os mecanismos envolvidos na utilização desses materiais em conjunto aos geossintéticos, como, por exemplo, a interação entre os grãos do RCD-R e os elementos dos geossintéticos quando submetidos a uma solicitação.

1.1. JUSTIFICATIVA

Com a finalidade de promover a utilização de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado (ESR) com geogrelha, faz-se necessário examinar as características e a interação entre esses dois materiais. A partir dessa investigação, será possível determinar comportamentos específicos e, assim, analisar as suas aplicações.

O ensaio de arrancamento é uma forma utilizada para investigar a interação solo-geossintético, simulando condições de campo, em que a solicitação da ESR provoque o arrancamento dos elementos de reforço. De posse dos parâmetros de resistência de interface, será possível dar melhor embasamento para o desenvolvimento de projetos e análises adequadas de estruturas construída com RCD-R + geossintético. Assim, com o intuito de realizar um estudo inicial do comportamento dos RCD-R em ensaios de arrancamento, foi adotado um equipamento de pequeno porte.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a resistência e o comportamento de arrancamento de uma geogrelha enterrada em resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) por meio de um equipamento de pequenas dimensões. Com isso, serão obtidos parâmetros que poderão ser utilizados em projetos que contemplem esse material de preenchimento alternativo. Tem-se, portanto, os seguintes objetivos específicos:

- i) Caracterizar as propriedades geotécnicas dos RCD-R e de uma areia natural;
- ii) Verificar a variabilidade dos parâmetros geotécnicos dos RCD-R;
- iii) Obter a resistência de arrancamento de uma geogrelha enterrada em RCD-R e numa areia natural;
- iv) Avaliar a influência dos materiais componentes do RCD-R nos seus parâmetros de resistência;
- v) Comparar os resultados dos ensaios do RCD-R com os da areia natural e os disponíveis na literatura;
- vii) Determinar os parâmetros de resistência de interface entre os RCD-R e a geogrelha.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este documento está dividido em cinco capítulos que buscam apresentar ao leitor os conhecimentos básicos necessários para o entendimento do estudo, os materiais e métodos necessários para a realização dos experimentos, os resultados e as conclusões encontradas.

O Capítulo 1 apresenta uma contextualização do tema do trabalho, mostrando a importância de utilizar o RCD e os aspectos relacionados para o seu emprego em ESR. Assim, esse é composto por uma introdução, a justificativa do estudo e os objetivos a serem atingidos.

No Capítulo 2, é apresentada a revisão bibliográfica a respeito dos assuntos abordados no estudo proposto. Observa-se que essa pode ser dividida em duas partes: a primeira sobre o estudo dos RCD-R, abordando a geração, os processos de reciclagem e a reciclagem realizada na região metropolitana de Goiânia-GO; a segunda parte refere-se às características de resistência em estruturas de solo reforçado, com o enfoque na resistência ao arrancamento.

O Capítulo 3 descreve os materiais (RCD-R, areia natural e geogrelha), os métodos empregados para a coleta e preparação dos materiais e para os ensaios de caracterização geotécnica, assim como os detalhes referentes à montagem e realização do ensaio de arrancamento.

O Capítulo 4 apresenta os resultados da caracterização geotécnica dos RCD-R e da areia natural. Nesse capítulo também são apresentados os resultados obtidos do ensaio de arrancamento de geogrelha, as envoltórias e os parâmetros obtidos e as comparações entre os cenários analisados.

E, no Capítulo 5, estão as conclusões obtidas no estudo e as sugestões para pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta o tema “resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R)” por meio dos aspectos relacionados com a geração dos resíduos de construção e demolição (RCD) e os métodos de reciclagem. O capítulo também aborda a utilização de geossintéticos – em especial, as geogrelhas – como elementos de reforço de solos e a utilização de ensaios de arrancamento para a determinação da resistência de interface.

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

O Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), por meio da Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002 – documento precursor sobre o tema no país – define, de uma forma simples, os resíduos de construção e demolição (RCD) como materiais oriundos de obras da construção civil resultantes de construções, reformas, reparos, demolições e preparação e escavação de terrenos. No entanto, as composições dos RCD podem variar de uma região para outra devido às diferentes economias, condições ambientais e práticas de construção (WU *et al.*, 2019). Diante disso, atualmente os RCD não possuem um consenso quanto a sua definição, variando assim de país para país (DOMICIANO *et al.*, 2020). Contudo, de uma forma geral os RCD são compostos por: i) tijolos, ii) telhas, iii) blocos de concreto, iv) argamassa, v) metal, vi) plástico, vii) madeira e outros.

O desenvolvimento global e o conseqüente aumento do consumo de bens e serviços da indústria da construção civil têm provocado um aumento no volume gerado de RCD. Estima-se que anualmente são geradas 10 bilhões de toneladas de RCD, com grande parte tendo potencial de reciclagem. Nesse contexto, pesquisas têm sido feitas com enfoques na estratégia de gestão desses resíduos, no controle de volume e na forma como são descartados (WANG; YUAN; KANG; LU, 2010; ALFAIA; COSTA; CAMPOS, 2017; ESA; HALOG; RIGAMONTI, 2017; DI MARIA; EYCKMANAS; VAN ACKER, 2018; OLIVEIRA NETO; CORREIA, 2019; XU; SHI; ZHAO, 2019).

De acordo com a Resolução n° 307 (CONAMA, 2002), os RCD podem ser reintroduzidos no canteiro de obra de duas formas: i) reutilização (quando não há transformação dos resíduos) e ii) reciclagem (quando há processos de transformação dos resíduos). Segundo Peng, Scorpio e Kitbert (1997), a reciclagem desses materiais gera uma nova possibilidade para o mercado de insumos além de ser uma alternativa ambientalmente correta em relação à disposição inadequada dos RCD.

2.1.1. Geração dos resíduos de construção e demolição (RCD)

Segundo Santos (2007), a indústria da construção civil é bastante antiga, porém guarda fortes traços artesanais, o que colabora para o aumento da quantidade de resíduos gerados. Assim, o RCD é gerado devido à diversos fatores, dentre eles: i) pedidos excessivos de suprimentos para as obras, ii) manuseio incorreto de materiais por trabalhadores não qualificados, iii) demolição de edifícios para a obtenção de espaço (o que é essencial ao desenvolvimento de grandes cidades) ou porque o edifício completou sua vida útil ou para a sua reforma, iv) armazenamento inadequado de materiais, v) limpeza de catástrofes naturais ou provocadas pelo homem, vi) projetos não conectados e vii) construtoras que trabalham com vários fornecedores (NUNES; MAHLER; VALLE, 2009; ASGARI *et al.*, 2017; MAJLESSI *et al.*, 2018).

Nesse contexto, o RCD é reconhecidamente heterogêneo, pois é constituído por diferentes tipos de materiais que fazem parte do edifício ou infraestrutura durante a construção, reconstrução, extensão, alteração, manutenção e demolição, ou seja, é resultado de diferentes atividades e técnicas do setor de construção (SOIBELMAN, 1993; SANTOS, 1995; BOGADO, 1998; JOHN; AGOPYAN, 2000; VIEIRA; PEREIRA, 2015; FLEURY, 2018; DI MARIA; EYCKMANAS; VAN ACKER, 2018; ROSADO *et al.* 2019). No entanto, apesar da heterogeneidade dos RCD, observa-se que eles são constituídos principalmente de concreto triturado, tijolos, telhas, pedaços de madeira, vidro, plástico, metal e papelão (BRITO, 1998; HUANG *et al.*, 2002; ANGULO *et al.*, 2005; LAI *et al.*, 2016; ASGARI *et al.*, 2017; DI MARIA; EYCKMANAS; VAN ACKER, 2018).

Observando a Tabela 2.1, verifica-se que, em relação a composição, os agregados reciclados são formados por derivados de cimento Portland, solo (partículas menores que 4,8 mm) e materiais cerâmicos – estes materiais constituem grande parte dos materiais analisados pelos autores.

Segundo a ABRELPE (2019), cerca de 122012 toneladas/dia de RCD foram coletadas em lugares públicos em 2018 – cerca de 1,14% menos que em 2017 – (TABELA 2.2), isso representa 44,5 milhões de toneladas em um ano. Contudo, isso não representa a quantidade total de RCD, pois, sabe-se que as coletas acontecem apenas quando os resíduos são descartados em locais públicos. Assim, acredita-se que uma expressiva quantidade de RCD é descartada de maneira inadequada em obras privadas. Em um levantamento realizado por Fleury (2018) sobre as informações relativas à geração de RCD em Goiânia-GO, o autor observou que há uma expressiva divergência entre os dados obtidos em diferentes órgãos (TABELA 2.3). Esse levantamento apresenta fortes evidências que os valores de RCD gerados devem ser superiores aos coletados, e assim, muitos encontram-se ainda descartados em locais impróprios.

Tabela 2.1 – Composição gravimétrica de algumas amostras de RCD-R – adaptado de Fleury (2018).

Referência	Solo passante na 4,8 mm (%)	Derivados de cimento Portland (%)	Cerâmica (%)	Cerâmica polida (%)	Rocha alterada ou pedras (%)	Outros (%)
Angulo (2000)	72,00	-	4,00	-	23,00	-
Motta (2005)	26,31	41,87	4,34	3,42	23,75	0,31
Santos (2011)*	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
Fleury (2018)**	52,71	40,61	3,60	0,59	1,63	0,85
Silvestre (2019)**	47,17	50,05	1,14	0,20	0,39	1,08
Domiciano <i>et al.</i> (2020)**	38,84	48,45		8,75	0,97	2,99

Nota: (*) Média de três amostras; (**) Foi escolhida uma amostra.

Tabela 2.2 – Quantidade de RCD coletada pelos municípios brasileiros (ABRELPE, 2019) – modificado pela autora.

Região	2017		2018	
	RCD Coletado (t/dia)	Índice (kg/hab/dia)	RCD Coletado (t/dia)	Índice (kg/hab/dia)
Norte	4727	0,264	4709	0,259
Nordeste	24585	0,429	24123	0,425
Centro-Oeste	13574	0,855	13255	0,824
Sudeste	64063	0,737	63679	0,726
Sul	16472	0,556	16246	0,546
Brasil	123421	0,594	122012	0,585

Tabela 2.3 – Geração de RCD em Goiânia-GO – a partir de dados levantados por Fleury (2018).

Quantidade (tonelada/ano)	Ano	Fonte
1,11 milhões	2015	Secretaria de Meio Ambiente, Recursos Hídricos, Infraestrutura, Cidades e Assuntos Metropolitanos (SECIMA, 2015)
320 mil	2016	Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (GOIÂNIA, 2016)
455 mil	2016	Média região centro-oeste de 0,882 kg/habitante/dia (ABRELPE, 2016) e população goiana de 1.412.364 (SNSA, 2016)**

Nota: (*) Os autores não demonstraram a metodologia utilizada; (**) O valor pode ser outro, pois utilizou-se uma taxa de geração regional.

2.1.2. Reciclagem dos resíduos de construção e demolição (RCD)

Uma avaliação do uso dos resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) no mundo revela que há diferentes taxas de utilização entre os diversos países. Segundo Zheng *et al.* (2017), a taxa de reciclagem de RCD em alguns países europeus são bem elevadas, como é o caso Reino Unido (86%) e da Itália (75%). De acordo com Freitas (2018), alguns fatos demonstram a preocupação em outros países em diminuir os impactos ambientais, sociais e econômicos gerados pelos RCD, como, por exemplo, o estado da Flórida, EUA, que, em 2008, fixou a meta de 75% de reciclagem de RCD para ser atingida até 2020. Segundo Santos (2007), a indústria da construção civil tem um grande potencial em relação à reciclagem devido à sua versatilidade, pois além de permitir a incorporação dos seus resíduos novamente à cadeia produtiva, promovem também a inserção de resíduos de outros setores, como os gerados por fábricas de cerâmica, mármore e granitos.

Existem várias formas de dispor os RCD, desde a reciclagem, a incineração e em aterro. No entanto, antes de considerar as várias opções que podem ser utilizadas, uma hierarquia precisa ser estabelecida (PENG; SCORPIO; KITBERT, 1997). Análises quanto à disposição e à reciclagem do RCD estão exigindo métodos cada vez mais complexos, pois os problemas de poluição ambiental e consumo de recursos têm se tornado cada vez mais sérios. O trabalho de Xu *et al.* (2017) apresenta um estudo de caso na China, em que é utilizado um modelo dinâmico de programação baseado em rede de logística reversa, permitindo uma avaliação dos processos e volumes de descarte e controle de custos totais, o qual leva em consideração análises de cenários para as taxas de coleta e reciclagem e a influência do imposto ambiental do governo.

As autoridades brasileiras começaram a tomar medidas visando melhorar a política de resíduos, assim, a Política Nacional de Resíduos Sólidos, implantada por meio da Lei 12.305 (2010), previa que até 2014 somente resíduos sem viabilidade econômica poderiam ser alocados aos aterros sanitários (NORDI *et al.*, 2017). Contudo, observa-se que a prática de gestão de resíduos mais comumente utilizada consiste em depositar diretamente os resíduos em aterros ou aterros sanitários, e isso não é feita de forma controlada (OLIVEIRA NETO; CORREIA, 2019). No Brasil, a maior parte dos RCD ainda não é reciclada, e essa situação é esperada a mudar somente quando novos regulamentos federais obrigarem os municípios a criar e implementar planos sustentáveis de gestão dos RCD que atribuam um papel importante às atividades de reciclagem (NUNES; MAHLER; VALLE, 2009).

Alguns trabalhos destacam a importância de adotar práticas de reciclagem e reutilização de resíduos, pois assim i) reduz-se o uso de transporte para o descarte de RCD; ii) redução na procura de materiais produzidos a partir de matéria-prima virgem; iii) diminuição do material aterrado ou jogado a céu aberto, evitando-se a poluição do ar, da terra e da água; iv) minimização dos problemas com vetores e doenças associadas aos resíduos; v) geração de renda com comercialização dos recicláveis; vi) torna o custo da produção menor, se comparado com o da produção originada diretamente da matéria-prima virgem (LIMA; CHENNA, 2000; TAM; KOTRAYOTHAR; LOO, 2009; WANG; YUAN; KANG; LU, 2010; LAI *et al.*, 2016; PENTEADO; ROSADO, 2016; SAPUAY, 2016). Penteado e Rosado (2016) destacam que a reciclagem nas usinas de beneficiamento é realizada de forma mais fácil e eficaz quando os RCD são classificados de forma eficiente nos canteiros de obras, evitando assim que esses materiais cheguem às usinas contaminados por lixos.

Miranda, Angulo e Careli (2009) avaliaram o número de usinas existentes no Brasil (operando e em fase de instalação) até o ano de 2008. Os autores verificaram que, mesmo que a quantidade de usinas tenha aumentado após a Resolução 307 (CONAMA, 2002), o potencial de reciclagem está muito inferior ao de geração de RCD no país (FIGURA 2.2). Observa-se, na Figura 2.1, que, mesmo com todas as usinas de reciclagem abertas no país funcionando com sua capacidade nominal, o percentual de reciclagem da quantidade total de resíduos gerados seria de, no máximo, 4,5%. No mesmo estudo, os autores observaram também um aumento na quantidade de usinas privadas, o que os autores atribuem ao fato dessas se mostrarem como uma boa alternativa de investimento, com baixa aplicação de recurso e alta rentabilidade (FIGURA 2.2).

Figura 2.1 – Relação entre RCD-R e RCD gerados por usinas brasileiras durante o ano (MIRANDA; ANGULO; CARELI, 2009) – modificado pela autora.

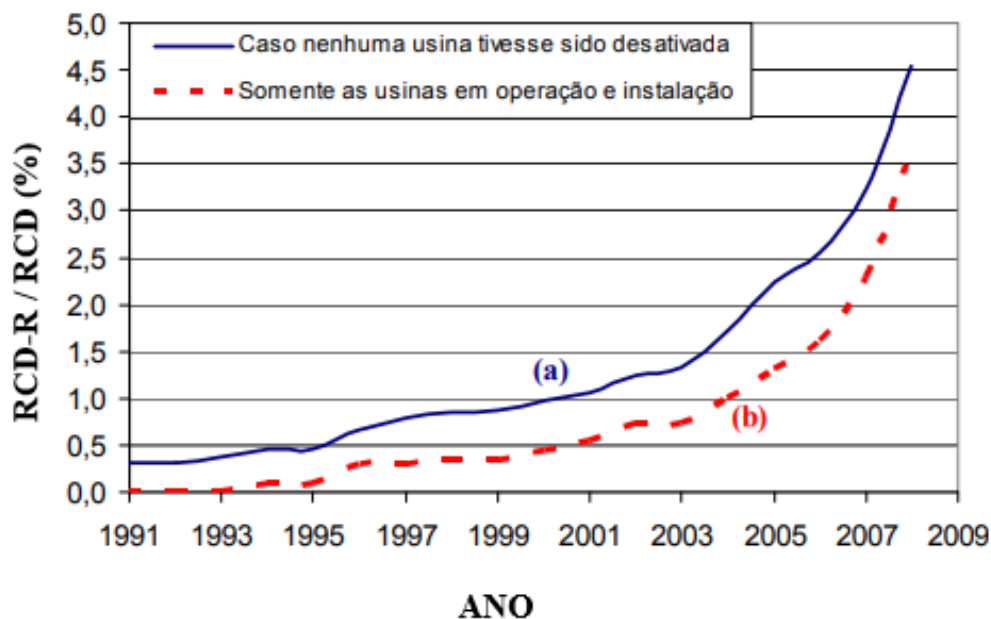
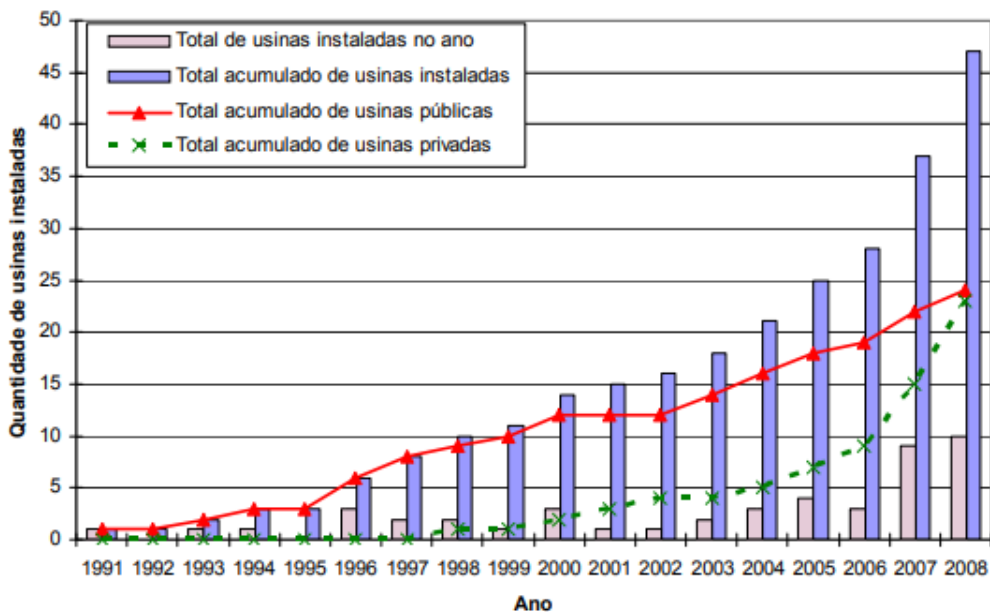


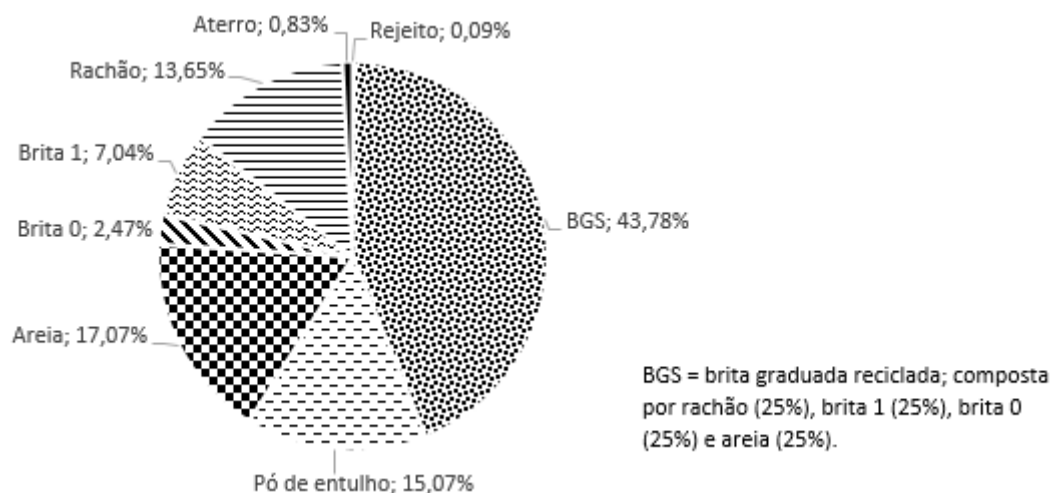
Figura 2.2 – Quantidade de usinas instaladas por ano (MIRANDA; ANGULO; CARELI, 2009).



No caso da região Metropolitana de Goiânia-GO, Fleury (2018) observou que um importante passo foi dado para a gestão dos RCD com a instalação de usina privada de reciclagem em Aparecida de Goiânia-GO. A usina possui uma área de aproximadamente 19.000 m² (FLEURY; SIQUEIRA NETO; SANTOS, 2017). Ainda segundo os autores: i) do total dos resíduos recebidos pela empresa, 99% são oriundos da região metropolitana de Goiânia-GO e 76% estão diretamente relacionados com a Indústria da Construção Civil (construtoras e indústrias de

artefatos) e ii) são as construtoras que compram a maior parte dos materiais beneficiados pela usina. A Figura 2.3 mostra os principais produtos gerados por tal usina.

Figura 2.3 – Percentuais dos volumes dos produtos fabricados (FLEURY; SIQUEIRA NETO; SANTOS, 2017) – modificado pela autora.



2.2. ESTRUTURAS DE SOLO REFORÇADO COM GEOGRELHAS

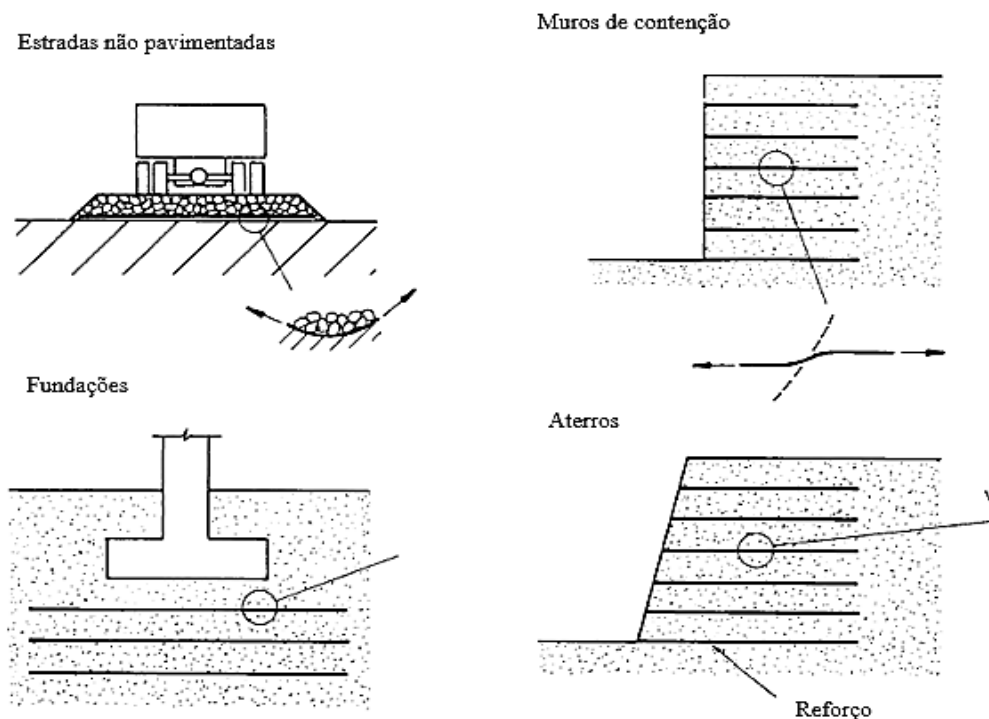
As geogrelhas são descritas na NBR ISO 10318-1 (ABNT, 2018) como “[...] estruturas em forma de grelha, em que as aberturas proporcionam a interação ao meio em que estão inseridas, com função principal de reforçar e são constituídas por elementos resistentes à tração”. As geogrelhas são utilizadas para reforçar o solo, sendo utilizadas em estruturas de contenção (face segmentada ou solo envelopado), reforço em base de aterro sobre solo mole, reforço de base de pavimentos rodoviário, ferroviário e aeroportuário, taludes íngremes compactados, entre outros (BONAPARTE; HOLTZ; GIROUD, 1987; KOERNER, 1990; FARRAG, ACAR; JURAN, 1993).

A interação solo-inclusão pode, na maioria dos casos, ser apontada como o principal fator para o adequado desempenho de estruturas em solos reforçados (ESR). Isso se dá devido aos materiais apresentarem comportamentos complementares. Embora o solo, quando devidamente compactado, possa apresentar elevadas resistências à compressão e ao cisalhamento, ele apresenta baixa resistência à tração. Dessa forma, quando são inseridos elementos resistentes à tração, em posições estratégicas, cria-se um composto que apresenta as melhores características do solo e do elemento de reforço (TEIXEIRA, 1999; KAKUDA, 2005).

De acordo com Palmeira (1987) e Koerner (1990), reforçar o solo com geossintéticos tem sido cada vez mais atrativo e permite realizar obras mais seguras, econômicas e ousadas. Uma outra característica marcante está relacionada com versatilidade dessa técnica, dado que o solo reforçado pode ser utilizado em: i) estradas não pavimentadas, ii) barragens, iii) muros de contenção, iv) aterros sobre solos moles e v) fundações em aterros reforçados. A Figura 2.4 mostra exemplos de aplicações de reforços em solos.

A função das inclusões no solo é redistribuir as tensões existentes e, assim, aumentar a estabilidade interna das ESR. Conforme as cargas de porções instáveis da massa de solo são transferidas para porções estáveis, as inclusões sofrem tensões de tração. As respostas de deformações das estruturas, assim como a redistribuição das tensões, dependem das propriedades de resistência ao cisalhamento do solo, propriedades de tração das inclusões e o mecanismo de transferência de tensão entre solo e inclusões (TEIXEIRA; BUENO; ZORNBERG, 2007).

Figura 2.4 – Exemplos de estruturas de solo reforçado (PALMEIRA, 1987) – modificado pela autora.



Apesar dos grandes avanços observados nas últimas décadas sobre o entendimento do comportamento de ESR, pesquisas continuam sendo realizadas para compreender os mecanismos que envolvem as geogrelhas em tais obras. Dessa forma, estudos sobre os diversos

aspectos relacionados com os tipos de solicitação, configuração de acabamento de face, condições de saturação e novos materiais de preenchimento tem sido cada vez mais realizados.

Liu, Yang e Ling (2014) analisaram, por meio do método de elementos finitos o comportamento de muros, construídos em multi-camadas e com blocos nas paredes, reforçados com geogrelhas quando submetidos a sismos. Os autores verificaram que para as cargas sísmicas analisadas, geogrelhas com maior rigidez seriam necessárias para aumentar a estabilidade da estrutura e conter os deslocamentos laterais. E foi observado que a zona com maior concentração de carga e deslocamentos ocorreu nas camadas inferiores (mais próximas aos terrenos).

Rowshanzamir e Aghayarzadeh (2015) utilizaram um software para verificar o efeito da inclinação em muros de contenção de solos reforçados com geogrelhas; vários modelos, com diferentes configurações, foram analisados numericamente sob condições de carga gravitacional. Verificou-se nesse estudo que, ao levar em consideração a redução nas deformações do muro e força de tração dos elementos de reforço, as paredes de blocos reforçados com face inclinada apresentaram o melhor desempenho.

Chen e Wu (2012) e Balakrishnan e Viswanadham (2016) analisaram a perda de resistência em ESR com geogrelhas em aterros devido ao umedecimento. Para isso, os últimos autores utilizaram-se de um modelo envolvendo o uso de uma instalação de centrífuga para simular uma condição real de campo. O estudo revelou que camadas reforçadas com geogrelhas de baixa rigidez apresentaram deformações excessivas, porém para geogrelhas com maior rigidez as deformações externas ficaram limitadas.

Mais recentemente, estudos foram realizados com o intuito de investigar a utilização de RCD-R como material de preenchimento em estrutura de solos reforçados. Santos, Palmeira e Bathurst (2013, 2014) descrevem a construção, a instrumentação e o desempenho de uma estrutura de RCD-R reforçado com geogrelha de face envelopada, de 3,6 m de altura, a qual foi construída sobre um solo de fundação colapsível, em Brasília-DF. Os autores ressaltaram que o desempenho e as deformações do muro, a durabilidade do reforço e as tensões no reforço apresentaram-se satisfatoriamente e semelhante ao desempenho de estruturas similares construídas com aterros granulares convencionais. A Figura 2.5 apresenta imagens da estrutura de RCD-R reforçado com geogrelha.

Figura 2.5 – Construção e instrumentação da estrutura de solo reforçado com geogrelha e RCD-R (SANTOS; PALMEIRA; BATHURST, 2013) – modificado pela autora.



a) Construção



b) Instalação das camadas de geogrelha e instrumento de monitoramento

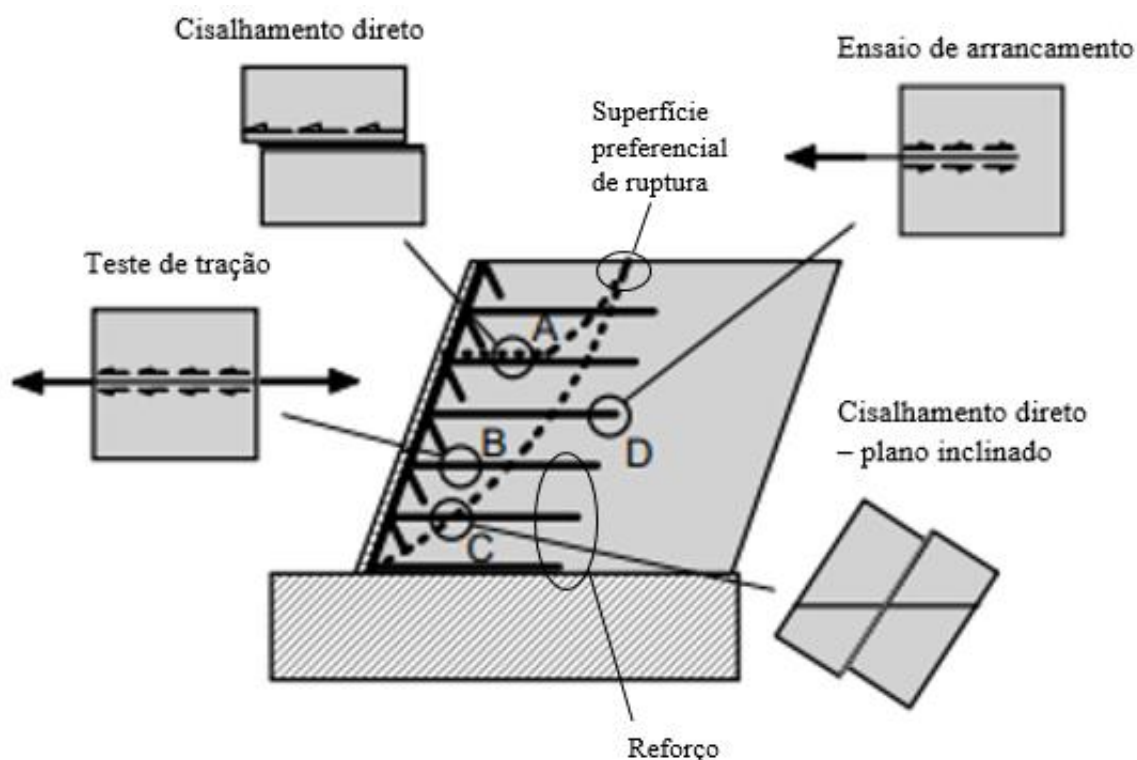


c) Face do muro após a construção

2.3. INTERAÇÃO SOLO-REFORÇO

Supondo uma superfície de ruptura interna de uma estrutura típica de solo reforçado (FIGURA 2.6), observa-se a existência de diferentes esforços atuando na ruptura, o que demonstra a complexidade do entendimento da interação solo-reforço. Verifica-se que, para compreender todos os esforços atuantes na ruptura de uma ESR, faz-se necessário realizar um conjunto de ensaios, entre os quais destacam-se: i) cisalhamento direto, ii) cisalhamento direto em plano inclinado, iii) ensaio de tração confinada e iv) arrancamento. Tais ensaios são realizados com o intuito de obter a resistência de interface solo-reforço.

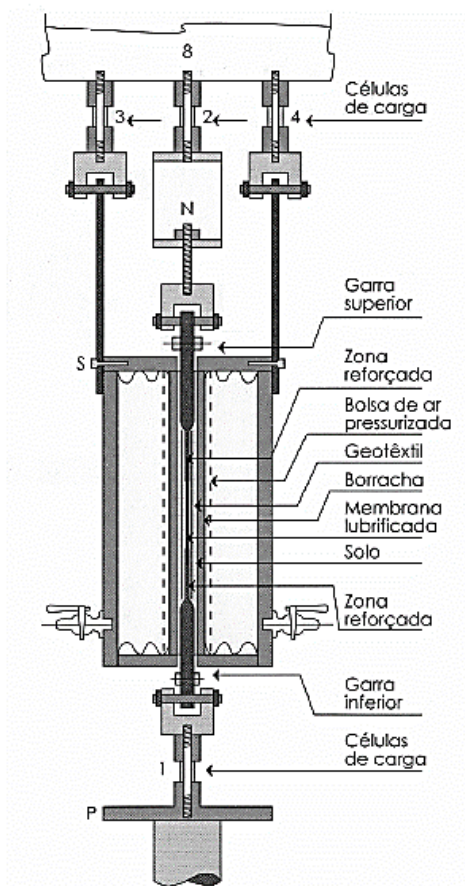
Figura 2.6 - Mecanismos de interação solo-reforço numa estrutura de solo reforçado com geossintéticos (PALMEIRA, 2009) – modificado pela autora.



Os ensaios de tração confinada em geotêxteis são realizados para diferentes tensões de confinamento que simulam adequadamente condições de uma ESR. Segundo McGown, Andrews e Kabir (1982), a ação de confinar o geotêxtil influencia de maneira significativa os mecanismos de interação solo-geotêxtil: i) comprimindo as fibras e assim aumentando o atrito entre os filamentos e diminuindo os espaços em quem poderiam movimentar quando solicitados; e ii) impregnando partículas de solo na manta de geotêxtil, criando obstáculos que dificultam a orientação das fibras quando solicitadas.

McGown, Andrews e Kabir (1982) desenvolveram e utilizaram um dos primeiros equipamentos de tração confinada (FIGURA 2.7). Nesse equipamento, um geotêxtil era confinado no solo e tensões normais eram aplicadas por uma bolsa de ar pressurizado. As extremidades do geotêxtil eram fixadas às garras que aplicam cargas de tração. Assim, os autores observaram um aumento significativo da rigidez devido ao confinamento. Depois outros pesquisadores desenvolveram outros equipamentos: i) Andrawes, McGown e Kabir (1984); ii) Siel, Tzong e Chou (1987); iii) Palmeira (1990); iv) Azambuja (1994) e v) Yuan *et al.* (1998).

Figura 2.7 – Equipamento de tração confinada desenvolvido por McGown, Andrews e Kabir (1982) – (BUENO; VILAR, 2004).



Os ensaios de cisalhamento direto são ensaios fáceis de serem executados e permitem a obtenção da adesão entre o solo e o geossintético (a) e do ângulo de atrito de interface solo-geossintético (δ). Uma das configurações normalmente adotadas para o ensaio de cisalhamento direto, é quando a caixa superior é submetida a uma tensão normal e uma tensão horizontal cisalhante que a faz deslizar sobre a caixa inferior. A parte superior possui solo, enquanto que a inferior é preenchida por solo e onde encontra-se o geossintético colocado na horizontal (JEWELL e WROTH, 1987). De acordo com Jewell e Wroth (1987) e Jewell (1990), o ensaio de cisalhamento direto pode ser realizado com o geossintético também colocado na vertical ou inclinada em um ângulo (θ) em relação a esta direção – isso configura o ensaio de cisalhamento direto no plano inclinado – e sendo que é recomendado que a amostra possua o mesmo tamanho na parte superior e inferior da caixa de corte.

Palmeira (1999) concluiu que o aumento da resistência em ensaios de cisalhamento direto em plano inclinado realizados com geogrelhas inclinadas inseridas em areia ocorreu para um

ângulo de aproximadamente 64° . Isso aconteceu devido a orientação de 60° em relação à horizontal coincidir com a direção dos incrementos de deformação de tração da amostra quando não há a presença de reforço. O autor ressalta que os ensaios com geossintético inclinado em relação ao plano de cisalhamento deve ser realizado em casos fundamentais de analisar essa interação, e em equipamentos em que seja possível medir os deslocamentos, pois o estado de tensões é bastante complexo.

Vieira e Pereira (2016) realizaram ensaios de cisalhamento direto utilizando RCD-R e geossintéticos (geogrelhas e geotêxtil). O RCD-R utilizado foi coletado em uma usina de reciclagem e veio da demolição de casas unifamiliares e de áreas de limpeza de depósitos ilegais. Os resultados do teste de cisalhamento, encontrados pelos autores, demonstraram que o RCD-R quando adequadamente selecionados e compactados podem apresentar resistência cisalhante semelhantes aos solos naturais. Verificaram que os coeficientes de interação para as interfaces geossintético-resíduo alcançaram bons resultados conforme os relatados na literatura para solos naturais em condições similares.

As diferenças entre os ensaios de cisalhamento direto e de arrancamento são: i) a forma em que os esforços são aplicados ao geossintético, ii) as condições de contorno e iii) a forma em que a ruptura é imposta. Enquanto o ensaio de cisalhamento possibilita representar bem a interação entre o solo e geossintéticos planares (por exemplo, geotêxteis), essa representação não se mostra tão fiel quando se trata de geossintéticos vazados (por exemplo, geogrelhas). Para realizar estudos da interação solo-geogrelha, recomenda-se o uso de ensaio de arrancamento, pois tal simula bem o comportamento de geogrelhas solicitadas quando são usadas como reforço em maciços de solo (TEIXEIRA, 2003).

2.3.1. Ensaio de arrancamento

No ensaio de arrancamento, o geossintético é incorporado entre duas camadas de solo, e, então, uma força horizontal é aplicada de forma a arrancá-lo. O arrancamento é realizado enquanto a camada superior de solo está submetida à uma tensão normal. Esse tipo de teste possibilita fornecer informações que podem ser usadas no projeto que utilizam geossintéticos (desde que essas simulem as condições de campo) como reforço: i) muros de contenção, ii) encostas, iii) aterros (ASTM D6706-01, 2003).

Os ensaios de arrancamento são interessantes devido a quantificação da interação por ancoragem entre o geossintético e o solo, principalmente os do tipo geogrelha. A resistência ao arrancamento, gerada entre a interação do solo e geotêxteis, ocorre devido ao atrito gerado pelo contato entre esses elementos. Em geogrelhas, a interação solo-geogrelha é a combinação da interação por atrito e por resistência passiva dos membros transversais, acontecendo de forma simultânea (PALMEIRA, 1987). Palmeira (1987) observou que pode ocorrer a predominância de um ou outro mecanismo de interação que é definido pela geometria da geogrelha.

A partir dos ensaios de arrancamento é possível entender os mecanismos de interação solo-geogrelha, assim como seus resultados podem ser usados em projetos e análises das ESR. Diante disso, há uma grande importância nas condições em que os ensaios são realizados para a determinação dos parâmetros de resistência. Duas vertentes de pesquisas têm sido realizadas para a obtenção desses parâmetros: ensaios de arrancamento em campo e em laboratório.

Os ensaios de arrancamento em campo pode ser realizado em ESR reais ou, o que é mais empregado, sua realização em aterros, e, por isso, precisam de grande quantidade de solo, grandes equipamentos para o transporte e compactação do solo, um sistema que suporte a reação ao equipamento de aplicação da força e envolve uma equipe de pessoas para a montagem de todo ensaio. Há ainda, para a realização desse, o controle da compactação e umidade, além da dificuldade de instalar os instrumentos que irão fazer as medidas de interesse (deslocamentos da face e recalques diferenciais da base do aterro). Todos esses fatores mostram a dificuldade para realizar esse tipo de ensaio.

Ochiai *et al.* (1996) realizaram alguns ensaios de arrancamento em campo, sendo que o teste foi realizado em um aterro construído com areia reforçada com geogrelhas. Os autores compararam os resultados encontrados com os obtidos em testes de laboratório e verificaram que a mobilização da resistência ao arrancamento é semelhante nas duas situações. E, assim, concluíram que os resultados encontrados em testes de laboratório podem ser utilizados para entender os mecanismos de interação solo-inclusão, como parâmetro para examinar quantitativamente a resistência ao arrancamento nas análises e projetos de ESR.

Porém, observa-se os ensaios de resistência ao arrancamento de campo são mais onerosos, há uma grande dificuldade na montagem do sistema e necessitam de muito tempo para sua execução. Isso faz com que os pesquisadores prefiram trabalhar com testes realizados em laboratório.

Palmeira (2018) ressalta que, em relação aos ensaios de campo, deve-se observar se as tensões usadas no ensaio representam as situações reais de obra; tensões normais resultantes do peso da massa de solo acima do nível do geossintético são normalmente adotadas, e, esse fato deve ser considerado na interpretação dos resultados; e outro fator complicador na análise dos resultados é o fato de não haver uma parede frontal nos ensaios de aterro.

Os ensaios em laboratório são realizados normalmente em caixa metálica rígida construídas com seção transversal retangular. No elemento de reforço é aplicada uma força de tração por meio de uma força motriz que possibilita controlar a velocidade do ensaio. Normalmente a tensão confinante é aplicada por meio de um colchão inflável. Em relação à instrumentação, tem-se basicamente: i) células de carga (usadas para medir a força de arrancamento), ii) células de tensão total (empregadas para medir a tensão normal no nível do geossintético) e iii) transdutores de deslocamento interno (que possibilitam obter as deformações ao longo do corpo de prova). De acordo com as dimensões internas, as caixas empregadas nos ensaios executados em laboratório são classificadas como “grande” ou “pequena” escala.

Devido características particulares de algumas geogrelhas como suas dimensões geométricas e rigidez dos elementos, deve-se realizar ensaios de grande escala, sendo possível encontrar trabalhos que utilizaram volumes de solo superiores a 1 m³. Como será apresentado, vários são os trabalhos em que foram empregados equipamentos de grande porte para realizarem seus estudos.

De acordo com Palmeira (2018), as condições de fronteira existentes nos ensaios de arrancamento realizados em caixas são um dos fatores que podem influenciar nos resultados, assim não é recomendada a utilização de caixas de pequeno porte ou sistemas em que o comprimento do trecho de ensaio é muito superior à altura da caixa de ensaios. Alguns estudos foram realizados a fim de analisar a influência das condições de fronteira nos ensaios: i) ensaios de laboratório (PALMEIRA, 1987, 2009) e ii) análise numéricas (DIAS, 2004); e devido isso, recomenda-se a utilização de caixas de grande porte na execução dos ensaios de arrancamento.

Como será visto, existem trabalhos realizados em caixas de pequeno porte. Os autores relataram bons resultados encontrados de acordo com as situações por eles analisadas. Assim, observa-se que os equipamentos de pequenas dimensões servem para investigações iniciais para tentar entender a interação solo-geossintético.

Os ensaios de grande escala são os que apresentam resultados mais confiáveis, pois apresentam uma boa reprodução do maciço reforçado, distribuição das tensões e deformações na superfície da inclusão, mas ainda assim esses ensaios exigem um elevado tempo de execução e custo (BAKEER *et al.*, 1998). Esses ensaios são os mais utilizados nos arrancamentos em laboratório.

Atualmente, há algumas normas para a execução do ensaio de arrancamento, como, por exemplo, a ASTM D6706-01 (2013) e a EN 00189016 (1998). A ASTM D6706-01 (2013) especifica um equipamento de grande porte com as seguintes dimensões: 610 mm de comprimento, 460 mm de largura mínima e 305 mm de altura. E ainda propõe: i) que as dimensões devem ser aumentadas de modo que largura mínima seja 20 (vinte) vezes maior que o D_{85} do solo ou 6 (seis) vezes o tamanho da maior partícula do solo; ii) o comprimento mínimo deve ser maior que 5 (cinco) vezes a abertura da grelha; iii) deve-se ter acima e abaixo da inclusão, pelo menos, 150 mm; iv) o solo deve ter espessura pelo menos 6 (seis) vezes maior que o D_{85} ; v) sugere-se que a aplicação da tensão confinante seja feita por bolsa de ar comprimido; e vi) a abertura da face frontal deve conter uma luva de transição. Porém, alguns pesquisadores sugerem algumas recomendações com base nas observações feitas durante os seus estudos; como Teixeira (2003), que recomenda a adoção de uma espessura de no mínimo 50 (cinquenta) vezes o D_{50} acima e abaixo da inclusão.

Em relação aos equipamentos de pequena escala, observa-se que as vantagens observadas para esses são: i) menores tempo e custo de execução, ii) facilidade de montagem e execução do sistema, iii) melhor controle do teor de umidade e iv) facilidade na compactação das camadas de solo.

Os ensaios de arrancamento de pequeno porte têm sido realizados há bastante tempo, podendo citar os trabalhos de Chang, Sun e Hung (1995) e Ochiai *et al.* (1995). Esses trabalhos apresentam características e parâmetros que foram adotados em seus ensaios e serviram de base para que novas tecnologias pudessem ser desenvolvidas, novos parâmetros fossem adotados e equipamentos fossem desenvolvidos.

Sugimoto *et al.* (2001) utilizaram um equipamento de pequeno porte de ensaio de arrancamento de uma geogrelha em uma areia sílica, analisando a rigidez da parede frontal (rígida ou flexível). Os autores também observaram a influência da rigidez do elemento de reforço no ângulo de atrito equivalente de interface.

Teixeira (2003) realizou comparações dos resultados de ensaios de pequeno porte em relação a ensaios de grande porte, obtendo resultados semelhantes. O autor ressaltou a viabilidade de se utilizar equipamento de pequenas dimensões principalmente pela diminuição da quantidade de solo e da mão-de-obra durante a execução do ensaio. Nakamura *et al.* (2003) também ressaltaram a facilidade no controle da umidade, compactação do solo e rapidez na realização dos ensaios em equipamento de pequeno porte.

Ferreira e Zornberg (2015) mostraram um estudo em uma caixa transparente de ensaios de arrancamento de pequeno porte preenchida por um material transparente. Esse material permitiu a visualização 3D da interação solo-geogrelha. Por meio dos dados e imagens obtidos nos ensaios, foi observado deflexões localizadas dos membros transversais e longitudinais a diferentes distâncias da parede frontal.

Observa-se que não existe um padrão unificado para a execução do ensaio de arrancamento, e ainda existem um número grande de parâmetros (categoria de geogrelha, tipo de solo, densidade do solo, nível de tensão vertical e outros) que podem afetar a resistência da interface geogrelha-solo, e, por isso, é muito difícil comparar resultados. Rodriguez (2018) resalta que no caso de solos arenosos, existem ainda alguns parâmetros em que, por conta da dificuldade de monitorá-los, os estudos são bastantes escassos, e que influenciam no comportamento da resistência: i) dilatância; ii) condições de elevada umidade e iii) sucção do solo. As Tabelas 2.4 e 2.5 apresentam as principais configurações (dimensões das caixas, sistema de sobrecarga e medidas efetuadas) e as características (material de preenchimento e escala) de ensaios de arrancamento realizados por diversos autores.

Tabela 2.4 - Configurações dos ensaios de arrancamento realizados por diversos autores (PEREIRA, 2010) – modificado pela autora.

Autor	Dimensões da caixa de arrancamento			Sistema de Sobrecarga	Medidas Efetuadas
	Altura (mm)	Largura (mm)	Comp. (mm)		
Ingold (1983)	300	285	500	Colchão de água	Força de arrancamento, deslocamento e volume
Palmeira (1987)	1000	1000	1000	Colchão de água	Força de arrancamento e deslocamentos
Christopher e Berg (1990)	310	600	1220	Bolsa de ar	Força de arrancamento e deslocamentos
Farrag <i>et al.</i> (1993)	760	900	1520	Bolsa de ar	Força de arrancamento, deslocamento e velocidade
Bergado e Chai (1994)	510	750	1250	Bolsa de ar	Força de arrancamento, deslocamento e deformação
Chang <i>et al.</i> (1995)	150	500	400	Bolsa de ar	Força de arrancamento, deslocamento e deformação
Miyata (1996)	220	325	660	Bolsa de ar	Força de arrancamento, deslocamento e dilatância
Ochiai <i>et al.</i> (1996)	200	400	600	Bolsa de ar	Força de arrancamento e deslocamentos
Bakeer <i>et al.</i> (1998)	152	610	610	Pistão pneumático	Força de arrancamento e deslocamento frontal
Teixeira e Bueno (1999)	500	700	1500	Bolsa de ar	Força de arrancamento, deslocamentos e tensões no solo
Castro (1999)	1000	1000	1000	Cilindros hidráulicos	Força de arrancamento, deslocamento e deformação
Sugimoto <i>et al.</i> (2001)	625	300	680	Bolsa de ar	Força de arrancamento, deslocamento e força na face frontal
Teixeira (2003)	150	300	250	Bolsa de ar	Força de arrancamento, deslocamentos e tensões no solo
Nakamura <i>et al.</i> (2003)	200	220	500	Bolsa de ar	Força de arrancamento e deslocamento nos nós
Kakuda (2005)	150	300	250	Bolsa de ar	Força de arrancamento, deslocamentos e tensões no solo
Chen e Wu (2010)	610	760	1520	Bolsa de ar	Monitoramento de pressão normal, força de arrancamento e deslocamento
Chen e Wu (2012)	610	760	1520	Bolsa de ar	Força de arrancamento e deslocamentos
Prashanth, Krishna e Dash (2016)	230	400	400	Braço de alavanca mecânica	Força de arrancamento e coeficiente de fricção
Sadat Taghavi e Mosallanezhad (2017)	500	600	1200	Bolsa de ar	Força de arrancamento e deslocamentos
Portelinha, Pereira e Correia (2018)	150	300	250	Bolsa de ar	Força de arrancamento, deslocamentos e sucção

Observa-se que estudos foram realizados com diversos materiais para preenchimento da caixa dos ensaios de arrancamento e que a areia foi o material mais utilizado nos estudos (Tabela 2.5).

Tabela 2.5 – Variação dos materiais usados em ensaios de arrancamento.

Autor(es)	Material de preenchimento	Tipo de Ensaio
BERGADO; BUKKANASUTA.; BALASUBRAMANIAM, 1987	Areia argilosa e argila	Grande Escala
FARRAG; ACAR; JURAN, 1993	Areia	Grande Escala
YOGARAJAH; YEO, 1994	Areia	Grande Escala
WILSON-FAHMY; KOERNER; HARPUR, 1995	Areia	Grande Escala
OCHIAI <i>et al.</i> , 1996	Areia	Grande Escala
NAKAMURA; MITACHI; IKEURA, 2003	Areia	Pequena Escala
PALMEIRA, 2004	Areia	Grande Escala
TEIXEIRA; BUENO; ZORNBERG, 2007	Areia	Grande Escala
TANG; CHEHAB; PALOMINO, 2008	Areia Siltosa	Grande Escala
AGGARWAL; GUPT; SHARMA, 2008	Areia	Pequena Escala
CHEN; MCDOWELL; THOM, 2013	Lastro	Grande Escala
ABDI; ZANDIEH, 2014	Areia e Argila	Grande Escala
LAJEVARDI; BRIANÇON; DIAS, 2014	Areia e solo granular	Grande Escala
BALUNAINI <i>et al.</i> , 2014	Areia	Grande Escala
HATAF; SADR, 2014	Areia	Pequena Escala
MOSALLANEZHAD <i>et al.</i> , 2016	Areia	Grande Escala
LI <i>et al.</i> , 2017	Areia	Grande Escala
SADAT TAGHAVI; MOSALLANEZHAD, 2017	Areia	Grande Escala
MOSALLANEZHAD; SADAT TAGHAVI; KHADIV SARVESTANI, 2017	Areia	Grande Escala
KAYADELEN; ÖNAL; ALTAY, 2018	Areia	Pequena Escala
XU; WILLIAMS; SERATI, 2018	Pedregulho e Areia	Grande Escala

No dimensionamento de ESR, utiliza-se de coeficientes que buscam demonstrar a interação solo-geossintético. O coeficiente de interação solo-geossintético “ f ” é o mais utilizado no meio técnico para a elaboração de projetos, isso se dá devido à sua simplicidade. Porém, esse coeficiente não assinala as diferenças entre as parcelas de resistência devido ao atrito e à resistência passiva. Ou seja, ele não permite uma verificação separada desses fatores, fazendo uma análise mais abrangente (TEIXEIRA, 2003). A Equação 2.1 apresenta o cálculo de “ f ”:

$$f = \frac{T}{2.A.\sigma.tg\phi} \quad (1)$$

Onde:

f - coeficiente de interação solo-geossintético;

T - força máxima de arrancamento da inclusão obtida em ensaio de arrancamento;

A - área plana do geossintético em contato com o solo;

σ - tensão normal atuante no geossintético;

ϕ - ângulo de atrito interno do solo.

Muitos estudos tem sido realizados empregando abordagens numéricas com o intuito de avaliar os efeitos das várias configurações de ensaio na resistência ao arrancamento. Tais estudos normalmente fazem a confirmação dos métodos numéricos confrontando os seus resultados com aquele obtidos experimentalmente (YOGARAJAH; YEO, 1994; AGGARWAL; GUPT; SHARMA, 2008; CHEN; MCDOWELL; THOM, 2013; HATAF; SADR, 2014; ABDI; ZANDIEH, 2014; MOSALLANEZHAD *et al.*, 2016) e poucos são os que apresentam resultados baseados apenas em abordagens numéricas (MCDOWELL *et al.*, 2006; FERELLEC; MCDOWELL, 2010; STAHL *et al.*, 2013; CARDILE *et al.*, 2017; MIAO *et al.*, 2017).

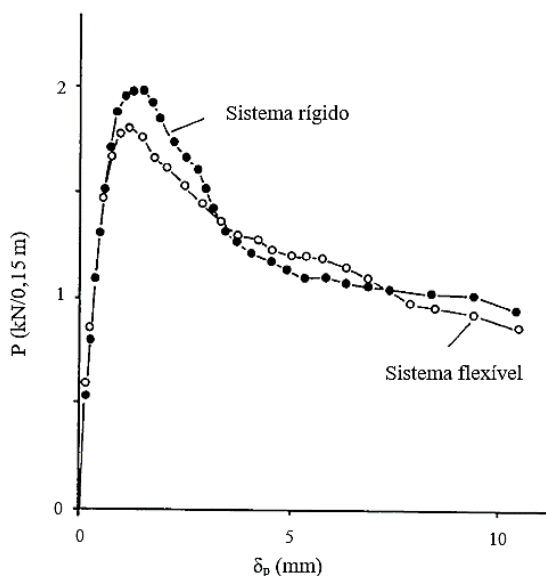
2.3.2. Condições de contorno que influenciam o ensaio de arrancamento

As pesquisas têm demonstrado que alguns fatores influenciam na obtenção dos parâmetros de resistência dos ensaios de arrancamento em geogrelhas, principalmente dos ensaios realizados em laboratório, pois esses tentam representar condições encontradas no campo. Conhecer a influência desses permite escolher as melhores configurações para a realização dos ensaios que utilizam caixas e, assim, ter uma melhor representação das condições reais.

2.3.2.1. Sistema de aplicação da tensão de confinamento

A fim de verificar a influência do tipo de sistema de aplicação de força (flexível e rígido), Palmeira e Milligan (1989) realizaram um experimento em que se utilizou uma mesma geogrelha metálica e com dois tipos de aplicação da força normal no topo da amostra: i) placa rugosa rígida e ii) bolsa flexível cheia de água. Observou-se uma redução na força de pico de arrancamento quando a tensão normal no topo da amostra foi aplicada com bolsa flexível, em relação à aplicação com placa rígida (FIGURA 2.8).

Figura 2.8 – Influência nos resultados devido o tipo de sistema de aplicação da tensão confinante nos ensaios de arrancamento (PALMEIRA, 1987) – modificada pela autora.



Sugimoto *et al.* (2001) realizaram ensaios de arrancamento em areia em que as tensões de confinamento são aplicadas por sistema rígido (placas fixas) e flexível (bolsa de ar). Os autores verificaram que no sistema flexível a mobilização é menor, e há uma maior distribuição dos estresses das ligações sobre uma maior área para resistir ao arrancamento.

De acordo com Santos (2007), isso ocorre devido a bolsa flexível proporcionar uma distribuição homogênea e constante de tensões aplicadas, o que evita o surgimento de uma densificação localizada na camada de material e, com isso, o aumento da tensão cisalhante em algumas regiões da interface solo-reforço.

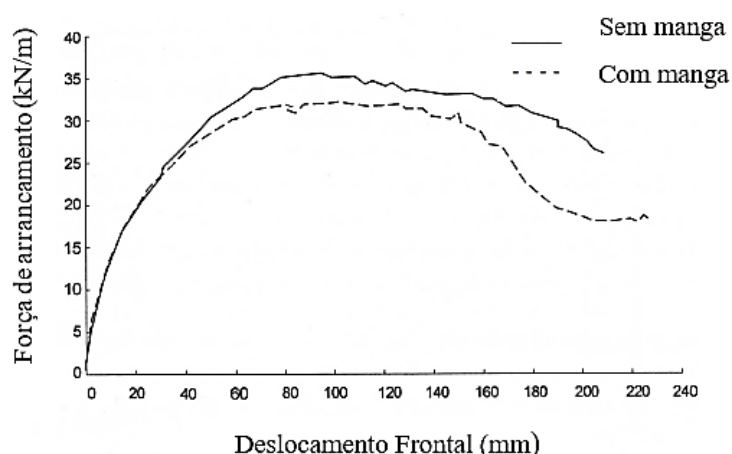
Teixeira (1999, 2003) nos ensaios de arrancamento de grande porte sugerem utilizar um espaçamento de 30 mm para que a bolsa de ar possa se expandir. Kakuda (2005) no ensaio de pequeno porte utilizou um espaçamento de 5 mm para expansão da bolsa de ar. Isso, mostra a importância de permitir que o sistema possa distribuir de forma uniforme a tensão de confinamento.

2.3.2.2. Condição da parede frontal da caixa

Alguns trabalhos mostraram que as condições da parede frontal da caixa de arrancamento afeta nos resultados dos ensaios (PALMEIRA, 1987; PALMEIRA e MILLIGAN, 1989; FARRAG, ACAR e JURAN, 1993; RAJU, 1995; LOPES e LADEIRA, 1996; SUGIMOTO *et al.*, 2001).

Segundo Palmeira (2009), normalmente nos ensaios o solo encontra-se em contato com a face frontal e é de suma importância que o atrito nessa parede seja diminuído. Assim, para diminuir esse fenômeno fazem-se algumas recomendações: i) utilizar membranas intercaladas com material lubrificante; e ii) utilização de manga no interior da caixa ao nível da inclusão – para transferir o ponto de aplicação da força de arrancamento para um ponto afastado da parede frontal. A Figura 2.9 apresenta os resultados em que é possível verificar a influência da utilização de manga durante a execução de ensaios de arrancamento.

Figura 2.9 – Influência do comprimento da manga nos resultados de arrancamento (LOPES; LADEIRA, 1996) – modificada pela autora.



Borges (2012) por meio de análise de elementos discretos também verificou que a presença do atrito na parede frontal deve ser evitada e constatou que a resistência passiva aumenta com o aumento do atrito.

2.3.2.3. Variação da umidade

O efeito da umidade foi verificado em ensaios de arrancamento de geotêxteis tecidos em solos argilosos realizados por Gilbert, Oldham e Coffing (1992). O efeito da inundação e variação da umidade (para os teores avaliados) diminuiu significativamente o valor da resistência ao arrancamento. E que em ensaios com as maiores tensões confinantes o efeito do teor de umidade é mais significativo. Isso foi atribuído à perda das tensões capilares no contato e devido a sucção do solo, e, ainda, ao desenvolvimento de tensões neutras positivas durante o arrancamento (sendo esse fenômeno atribuído ao aumento da tensão de confinamento). Pressões neutras positivas e redução de até 50% do valor da força de arrancamento foram verificadas em ensaios

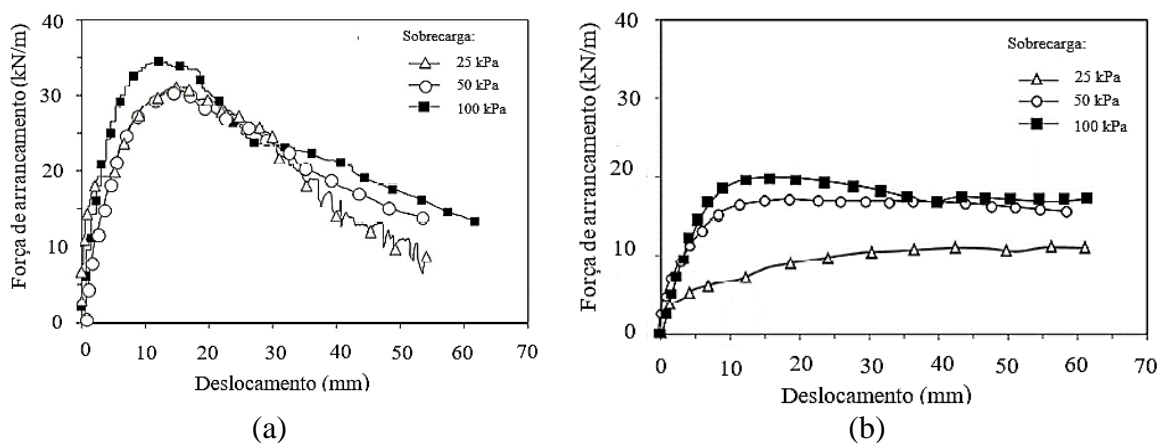
em geogrelha em que solos não drenados foram ensaiados a partir da umidade ótima e com valores elevados de umidade (FARRAG; MORVANT, 2004; CHEN; WU, 2012).

Pereira (2010) analisou a influência da presença de água em ensaios de arrancamento realizados em equipamento de pequeno porte. O material de preenchimento foi uma areia argilosa de baixa plasticidade, e o geossintético uma geogrelha uniaxial com resistência longitudinal à tração de 110 kN/m. As umidades adotadas foram 12,6%, 14,6% ($w_{ótima}$) e 16,6%; e foram aplicados três níveis de sobrecarga (25 kPa, 50 kPa e 100 kPa). Medindo-se a sucção, observou-se que para maiores níveis de sucção matricial resultaram em maiores forças de arrancamento.

Balakrishnan e Viswanadham (2016) realizaram ensaios de arrancamento com geogrelhas para complementar e compreender a influência da umidade em aterros. Os autores observaram que uma mesma geogrelha envolvida por solo com maiores teores de umidade apresentam menores valores de resistência ao arrancamento.

Portelinha, Pereira e Correia (2018) realizaram ensaios com o mesmo tipo de solo, geogrelha, valores de sobrecarga e umidades utilizadas por Pereira (2010), porém os ensaios foram realizados em uma caixa de pequeno porte em que as dimensões eram menores (200 mm x 300 mm x 150 mm). Os autores verificaram que para os valores de umidade acima da ótima a resistência ao arrancamento apresentou valores bem menores em relação aos outros valores de umidade (FIGURA 2.10). Durante a execução dos ensaios as pressões de sucção (desenvolvidas) foram as que apresentaram maior magnitude, sendo que promoveram um acréscimo de resistência ao arrancamento da inclusão.

Figura 2.10 – Influência da umidade nos ensaios realizados com diferentes sobrecargas: a) umidade ótima; b) inundação (PORTELINHA, PEREIRA; CORREIA, 2018) – modificada pela autora.



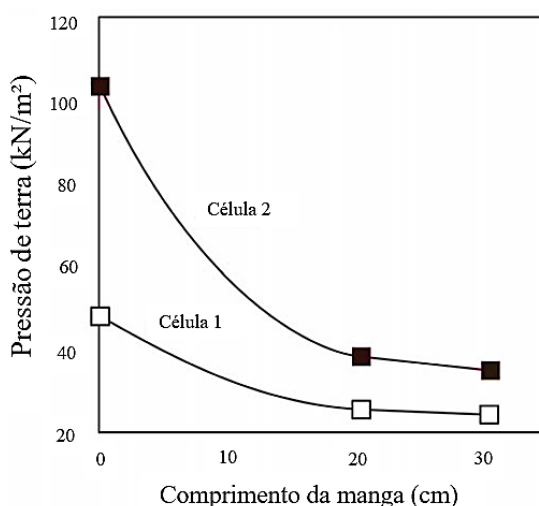
2.3.2.4. Rigidez das paredes da caixa

Farrag, Acar e Juran (1993) observaram que a rigidez da parede frontal influencia significativamente os resultados dos ensaios de arrancamento. Quando a parede frontal é rígida, a inclusão ao ser solicitada durante o ensaio gera uma pressão de terra contra a parede, isso resulta em um aumento não desejável de tensão próximo à parede frontal e que afeta na resistência ao arrancamento.

Como observado anteriormente, esse fato pode ser minimizado utilizando-se uma manga na abertura da parede frontal (lugar de passagem do geossintético), a qual transfere o ponto de aplicação da força de arrancamento para um ponto distante da parede frontal.

Alguns pesquisadores analisaram a influência da rigidez da parede frontal em ensaios de arrancamento: i) Farrag, Acar e Juran (1993) utilizaram diferentes comprimentos de manga e mediram as tensões desenvolvidas utilizando células de carga fixadas na parede frontal da caixa (FIGURA 2.11); ii) Sugimoto *et al.* (2001) usaram técnicas de raio X em caixas de paredes frontais fixas e flexíveis e observou que a parede frontal rígida interferiu no mecanismo de interação, pois houve intervenção nos deslocamentos ao longo do reforço.

Figura 2.11 – Influência da pressão lateral de terra na parede frontal (FARRAG; ACAR; JURAN, 1993).



De acordo com Kakuda (2005), parte da pressão de confinamento aplicada nos ensaios de arrancamento pode ser parcialmente suportada nas paredes laterais da caixa, isso devido ao atrito existente. Esse fenômeno pode ser minimizado ao selecionar uma distância suficiente

entre a amostra de geogrelha e as paredes laterais, assim a amostra será mantida sob pressão normal uniforme.

Araújo Neto (2017) e Portelinha, Pereira e Correia (2018) usaram 180 mm e 255 mm, respectivamente, como largura da amostra das amostras de geogrelha – nos ensaios com equipamentos de pequeno porte – que a abertura para a passagem da inclusão era de 300 mm. Esse procedimento, como observado, minimiza os efeitos devido as paredes laterais sobre a amostra ensaiada.

2.3.2.5. Proximidade da Célula de Tensão Total com a parede frontal

Normalmente, utiliza-se células de tensão total (CTT) nos ensaios de arrancamento de geogrelhas. Essas são inseridas na massa de solo e próximas aos elementos de reforço para determinar as sobrecargas quando os elementos poliméricos são arrancados por uma garra. A Tabela 2.6 apresenta de forma resumida algumas situações de ensaios de arrancamento realizados por alguns autores e o valor máximo positivo determinado pela CTT inseridas nos materiais granulares utilizados por esse. Teixeira (1999) ressalta que essa diferença normalmente ocorre devido ao fenômeno da dilatação do solo ao ser cortado pela grelha.

Verifica-se da Tabela 2.6 que, para os ensaios realizados com aplicação do mesmo valor de sobrecarga na bolsa de ar, o valor obtido pelas CTT mais próximas a abertura frontal da caixa foi superior aos determinados mais distantes a abertura; as maiores variações positivas ocorreram para os ensaios realizados com os menores valores de sobrecarga aplicados na bolsa de ar, e isso pode ser devido a melhor facilidade que os elementos poliméricos têm para movimentar-se dentro da massa de solo.

Tabela 2.6 – Valores obtidos pela CTT em diversos esquemas de ensaio de arrancamento.

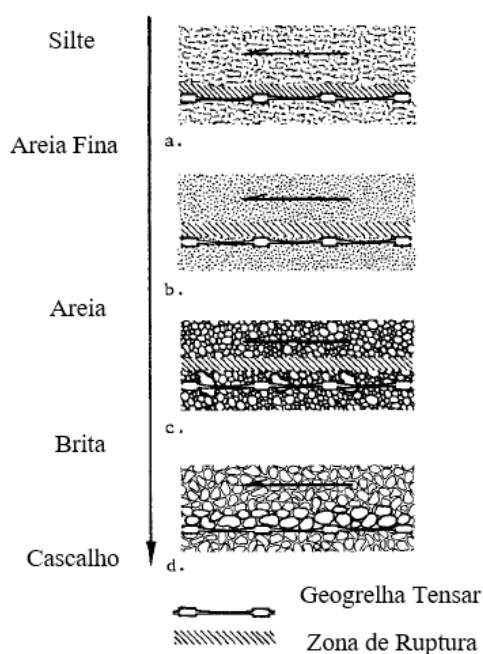
Referência	Detalhes do ensaio	Tipo de ensaio	Distância da CTT à parede frontal (mm)	Sobrecarga na bolsa de ar (kPa)	Sobrecarga CTT (kPa)
Teixeira (1999)	Geogrelha (200/35-30). Amostra com 500 mm de largura e 600 mm de comprimento. Material de preenchimento: argila argilosa.	Grande porte	99	25	40
			528	25	33
	Geogrelha (200/35-30). Amostra com 500 mm de largura e 600 mm de comprimento. Material de preenchimento: argila argilosa.	Grande porte	99	25	90
			528	50	120
	Geogrelha (200/35-30). Amostra com 500 mm de largura e 600 mm de comprimento. Material de preenchimento: argila argilosa.	Grande porte	99	50	80
			528	50	80
	Geogrelha (200/35-30). Amostra com 500 mm de largura e 600 mm de comprimento. Material de preenchimento: argila argilosa.	Grande porte	99	100	108
			528	100	105
	Geogrelha (200/35-30). Amostra com 500 mm de largura e 350 mm de comprimento. Material de preenchimento: argila argilosa.	Grande porte	99	25	100
			528	25	57
Geogrelha (200/30-20). Amostra com 500 mm de largura e 1200 mm de comprimento. Material de preenchimento: argila argilosa.	Grande porte	99	25	57	
		528	25	48	
Kakuda (2005)	Geogrelha (55/30-20) com 7 elementos longitudinais e 7 transversais. Material de preenchimento: argila de baixa plasticidade.	Pequena escala	125	40	55
			125	25	63
			125	50	90
	Geogrelha (110/30-20) com 8 elementos longitudinais e 7 transversais. Material de preenchimento: areia siltosa.	Pequena escala	125	100	138
			125	25	42
			125	50	75
Araújo Neto (2017)	Geogrelha (110/30-20) com 12 elementos longitudinais e 10 transversais. Material de preenchimento: areia siltosa.	Pequena escala	125	100	110
			125	25	57
			125	50	58
	Geogrelha (35/25-25) com 7 elementos longitudinais e 8 transversais. Material de preenchimento: RCD-R.	Pequena escala	125	100	105
			125	25	45
			125	50	57
Geogrelha (35/25-25) com 7 elementos longitudinais e 8 transversais. Material de preenchimento: areia.	Pequena escala	125	100	104	
		125	100	104	

2.3.2.6. Tamanho dos grãos, abertura da geogrelha e espessura das barras transversais

O tamanho dos grãos é um dos fatores que influenciam os resultados de interação solo-reforço nos testes de arrancamento (JEWELL *et al.* 1984; PALMEIRA e MILLIGAN, 1989; LOPES e LOPES, 1999). Jewell *et al.* (1984) avaliaram a influência da relação entre os grãos de solo (através do diâmetro médio das partículas – D_{50}) e a dimensão da abertura do reforço em ensaios que utilizaram uma geogrelha da marca Tensar e solos com diferentes granulometrias (FIGURA 2.12). Segundo os autores, os cenários possíveis são:

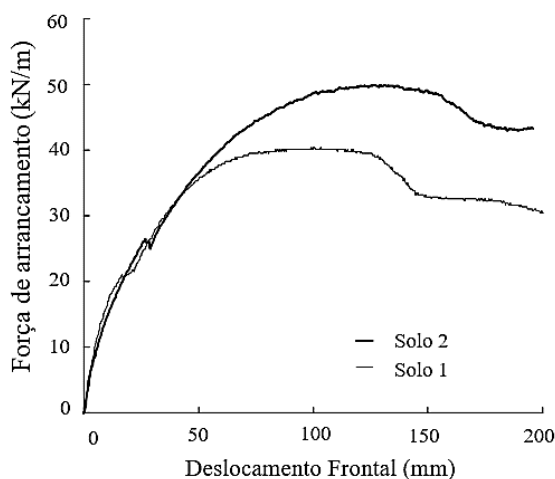
- os grãos do solo são muito menores (silte ou areia fina) em relação às aberturas das geogrelhas- a superfície de ruptura é ondulada e fica próxima à superfície lateral do reforço;
- as partículas são menores (areia) que a abertura da grelha- a superfície de ruptura torna-se plana e é tangente aos elementos transversais;
- a dimensão seja a mesma (brita) da abertura da geogrelha- os grãos encontram-se junto às barras transversais da inclusão e a ruptura é no interior do solo – nesse caso atinge-se o valor máximo do coeficiente de interação;
- as partículas são grandes (cascalho) que impedem a sua penetração das aberturas do reforço - a menor interação ocorre.

Figura 2.12 – Influência qualitativa da dimensão dos grãos de solo (JEWELL *et al.*, 1984).



A Figura 2.13 apresenta curvas de ensaios de arrancamento que utilizaram a mesma geogrelha e materiais com partículas de tamanhos diferentes, sendo que o solo 1 ($D_{50} = 0,43$ mm) apresenta grãos com dimensões menores que o solo 2 ($D_{50} = 1,50$ mm). Verifica-se que os solos com menor granulometria penetram mais facilmente as aberturas das geogrelhas, mas são menos eficazes na resistência passiva desenvolvida nos elementos transversais.

Figura 2.13 – Influência do tamanho dos grãos de solo nos resultados de arrancamento (LOPES; LOPES, 1999).



Baseando-se em resultados de ensaios realizados em solos que variam desde a granulometria de silte à brita, Jewell *et al.* (1984) sugerem a seguinte relação entre a dimensão dos membros transversais (B) e o diâmetro médio dos grãos (D_{50}) quando for aplicar um material em estruturas de solo reforçada com geogrelhas:

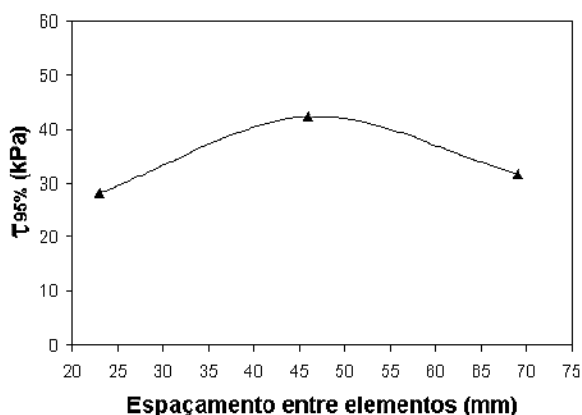
$$\frac{B}{D_{50}} \geq 3 \quad (2)$$

Palmeira e Milligan (1989), utilizando-se de ensaios com areias distintas e mesma grelha, determinaram que a relação (B/D_{50}) deve ser menor que 12. Os autores verificaram que esse fator é importante, entre outros, para aumentar a resistência mobilizada pelos elementos transversais da grelha.

Teixeira (2003) mostra que, para cada relação entre a geogrelha adotada e o tipo de solo, existe um espaçamento ótimo entre os membros transversais que potencializam a força de arrancamento. Foi verificado que, quando o valor do espaçamento entre os elementos transversais é menor que o ótimo, a movimentação de um elemento influencia de forma negativa a interação com o elemento subsequente devido ao alívio de tensões que é gerado logo

após o elemento transversal, assim a contribuição individual de cada elemento seguinte é pequena; quando o valor é maior que o ótimo, a interferência entre os elementos é menor e a contribuição individual é melhor, contudo a soma das parcelas da contribuição é afetada pela menor quantidade de elementos transversais. Portanto, o espaçamento ótimo é o que maximiza a contribuição individual dos elementos (FIGURA 2.14).

Figura 2.14 – Efeito do espaçamento entre elementos transversais na resistência ao arrancamento τ_{95} .
(TEIXEIRA, 2003).



2.3.2.7. Efeito do tipo de solo

Kakuda (2005) ressalta em seu trabalho que os solos arenosos são os mais utilizados para os ensaios de arrancamento em que as condições drenadas são mantidas, devido a sua elevada permeabilidade, sendo que, na maior parte, as pressões neutras são desprezadas. Nos solos coesivos, as pressões neutras influenciam na resistência ao arrancamento, sendo necessário um rigor nos ensaios de laboratório para avaliar e controlar corretamente algumas situações de que representam condições de campo: i) situação em curto prazo sem drenagem e ii) a longo prazo drenados.

Bauer e Chang (1993) realizaram ensaios em diferentes tipos de solo (arenosos, argilosos, areias argilosas e agregados) para verificar efeito da variação do tipo de solo. A geogrelha utilizada foi a Tensar UX 1600, em que as aberturas internas eram de 137 mm x 17 mm e módulo de tração de 1732,8 kN/m – valor obtido por ensaio pelos autores, que foi menor que o fornecido pelo fabricante. Os autores verificaram que quanto maior o diâmetro dos grãos, maior é a resistência ao arrancamento. Esse fato é devido ao bom entrosamento entre a abertura da geogrelha e os grãos do solo.

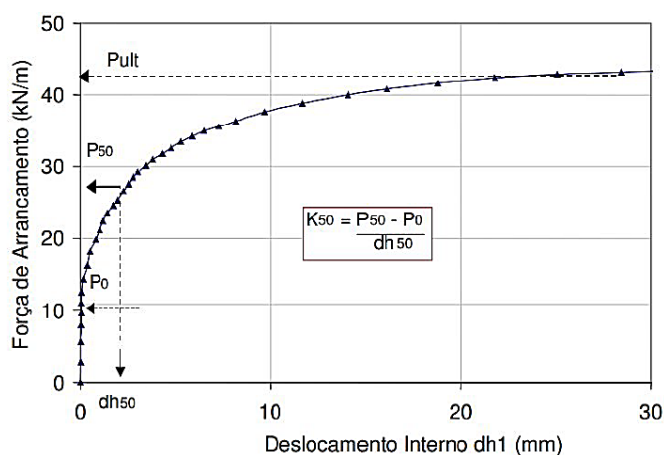
De acordo com Chang, Sun e Hung (1995), normalmente quando se compara resultados de resistência ao arrancamento entre solos arenosos e solos finos, os primeiros demonstram resultados de resistência ao arrancamento maiores que os segundos. Os autores verificaram que fatores como o ângulo de atrito de interface solo-grelha e ângulo de atrito interno do solo são responsáveis por esse aumento.

Christopher e Berg (1990) realizaram ensaios de arrancamento na condição drenada e não drenada para geogrelhas inseridas em solos coesivos e verificaram que a umidade influenciou na variação da resistência ao arrancamento. Teixeira (2003) também realizou ensaios de arrancamento de grande porte em solos coesivos e observou que: i) quando o solo está sob alta umidade, a aplicação de sobrecarga pode gerar pressões neutras que diminuem a resistência ao arrancamento; ii) a utilização de elementos de drenagem presos aos elementos da grelha promovem a dissipação de sobre-pressões; iii) os deslocamentos para mobilizar a resistência ao arrancamento quando esses solos estão na condição de inundação são bem superiores quando comparados aos realizados na umidade de compactação.

2.3.2.8. Rigidez solo-reforço

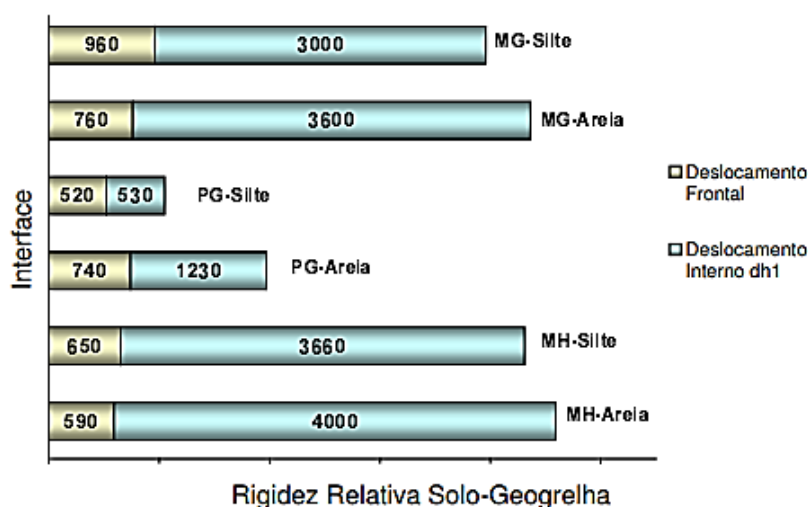
Sieira (2003) definiu o parâmetro de rigidez K_{50} (declividade da reta secante para 50% da força máxima de arrancamento T – obtido da curva de força de arrancamento *versus* deslocamento). Este parâmetro foi calculado a partir dos gráficos força de arrancamento versus deslocamento frontal (porção da geogrelha que não se encontra confinada) e força de arrancamento versus deslocamento interno (dh_1). A Figura 2.15 apresenta esse comportamento apresentado pela autora.

Figura 2.15 – Fator K_{50} para deslocamento interno (SIEIRA, 2003).



Observou-se que, caso as geogrelhas se comportavam como corpos rígido, a rigidez relativa da interface solo-grelha (baseada no K_{50}) seria a mesma, independente do lugar de medição dos deslocamentos (frontal ou interno dh_1), conforme Figura 2.16. Essa análise é importante, pois mostra que, mesmo que além da geogrelha apresente boa rigidez a tração, é imprescindível que possua boa interação com o solo (SIEIRA, 2003).

Figura 2.16 – Efeito do Tipo de Geogrelha no Parâmetro K_{50} – para tensão confinante de 12,5 kPa (SIEIRA, 2003).



Nota: Geogrelhas: PG (ParaGrid); MG (MacGrid) e MH (Malha Metálica). Sendo a PG com maior valor de rigidez à tração.

2.3.2.9. Tensão de confinamento

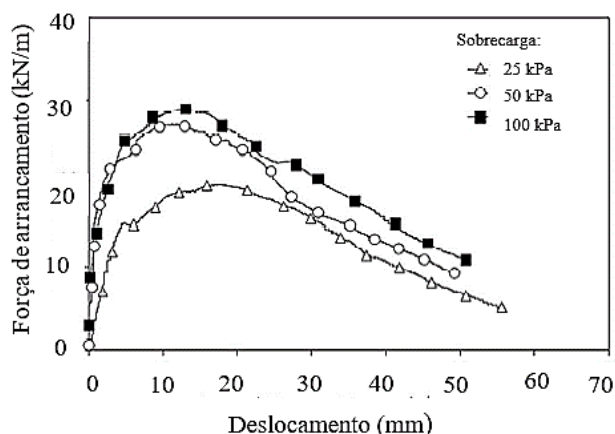
A resistência ao arrancamento de geogrelhas aumenta com o aumento da tensão confinante, mas a taxa de crescimento ocorre de forma diferente dependendo do tipo de solo, sendo que o efeito em solos finos é muito menor (tanto na parcela atritiva quanto na adesiva) quando comparados com solos granulares (CHANG; SUN; HUNG, 1995). No entanto, Bergado, Bukkanasuta.e Balasubramaniam (1987) observaram taxas semelhantes de aumento na resistência ao cisalhamento de interface tanto em solos areno-argilosos como argilosos, quanto submetidos ao aumento da tensão confinante; sendo que a parcela de adesão em solo areno-argiloso foi maior.

Alfaro *et al.* (1995) destacam que além de afetar a resistência ao arrancamento a tensão confinante interfere nos deslocamentos relativos entre os nós dos geossintéticos usados. Em

ensaios de arrancamento de geogrelha o aumento da tensão de confinamento impede o deslocamento da geogrelha na massa de solo e gera esforços tangenciais elevados nos locais próximos à aplicação da força de arrancamento (região próxima a abertura da caixa). Nos ensaios realizados por Sieira e Sayão (2002) em geogrelhas enterradas em solo arenoso e silto-argiloso, os pesquisadores verificaram uma diminuição dos deslocamentos internos da grelha conforme aumentava-se a tensão de confinamento.

O aumento na tensão de confinamento diminui a tendência do solo a dilatar e aumenta significativamente a resistência ao arrancamento de geogrelhas. E esse aumento dá-se ao aumento na resistência passiva do solo nos elementos transversais (FARRAG; ACAR; JURAN, 1993). A Figura 2.17 mostra a influência da tensão confinante na resistência ao arrancamento de geogrelhas.

Figura 2.17 – Efeito da tensão de confinamento no resultado do ensaio de arrancamento (PORTELINHA; PEREIRA; CORREIA, 2018).

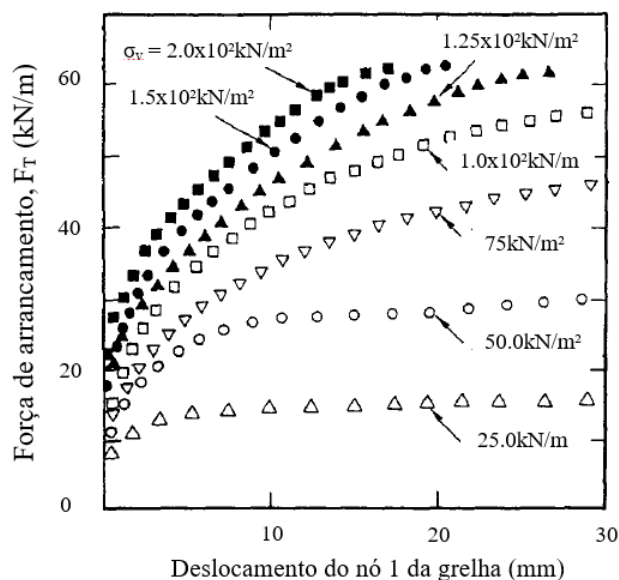


De acordo Alfaro *et al.* (1995) e Lopes e Ladeira (1996), o aumento da tensão confinante provocam no ensaio de arrancamento: i) aumento do ponto de ruptura de arrancamento; ii) diminuição do fator de aderência; iii) redução do deslocamento da geogrelha em relação a parede frontal e levando à mobilização de mais alta tensão tangencial próximo ao final da grelha.

Ochiai *et al.* (1996) verificaram que o aumento da tensão confinante gera um deslocamento para a esquerda da curva de força de arrancamento versus deslocamento da inclusão, ou seja, isso deve-se ao aumento da rigidez do sistema. E a inclinação das curvas aumentam conforme

o geossintético sofre menos deslocamento para atingir a resistência máxima de arrancamento – ver Figura 2.18.

Figura 2.18 – Relação entre deslocamento e força de arrancamento para diferentes tensões confinantes (OCHIAI *et al.*, 1996).



2.3.3. Ensaios de Arrancamento com RCD-R

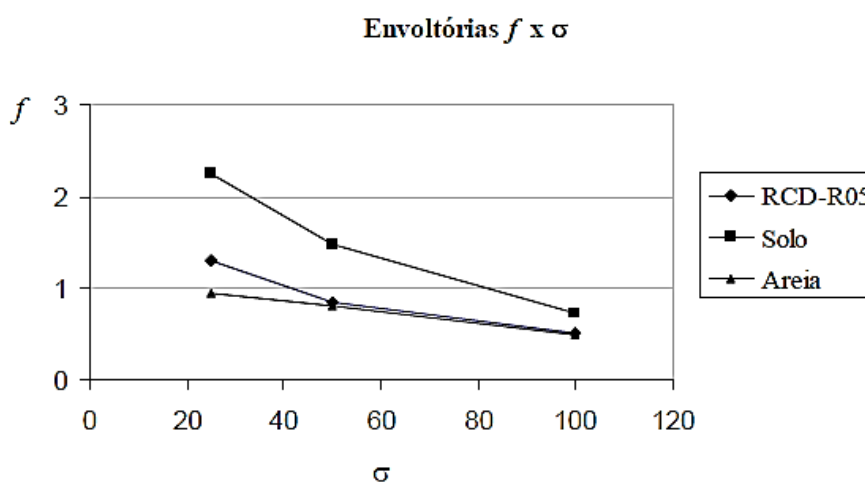
Embora seja possível encontrar na literatura estudos sobre a resistência de geogrelhas sob diferentes condições de ensaio, observa-se que são poucos os ensaios realizados com os RCD-R.

No estudo realizado por Santos (2007), o autor realizou ensaios de grande escala com geogrelha enterrada em RCD-R (classificado como um pedregulho arenoso), um material classificado como não plástico e composto em grande parte de material cimentício de forma e rugosidade variada. Os resultados revelaram que o ensaio de arrancamento com o RCD-R apresentou resultados superiores de coeficiente de interface aos encontrados para uma areia natural (material que atendia as recomendações feitas pela FHWA para execução de obras públicas). A Tabela 2.7 apresenta os valores dos resultados de arrancamento realizados pelo autor para os diferentes materiais em diferentes tensões de confinamento. A Figura 2.19 exhibe os resultados do coeficiente de interação para os materiais em diferentes tensões confinantes. O autor verificou um bom desempenho do RCD-R, pois apresentou valores superiores aos obtidos pela areia.

Tabela 2.7 – Força de arrancamento para os materiais em diferentes tensões confinantes (SANTOS, 2007).

Sobrecarga (kPa)	Material	Força de Arrancamento (kN/m)
25	Areia	17,60
	Solo	43,90
	RCD-R	31,46
50	Areia	30,36
	Solo	57,68
	RCD-R	40,97
100	Areia	37,23
	Solo	56,50
	RCD-R	49,92

Figura 2.19 – Coeficiente de interação para os materiais analisados (SANTOS, 2007).



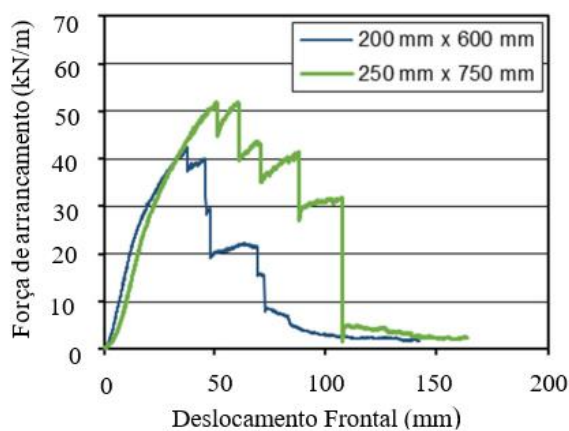
Em um outro estudo, Araújo Neto (2017) realizou ensaios de arrancamento de pequena escala utilizando geogrelha inseridas em RCD-R (classificado como uma areia pedregulhosa com pequena presença de finos). O autor observou que o RCD-R apresentou um coeficiente de atrito de interface bastante próximo (apenas 8% inferior) ao de uma areia natural; o material mostrou-se não plástico e revelou um elevado ângulo de atrito, evidenciando aspectos positivos para a sua aplicação em obras geotécnicas. A Tabela 2.8 apresenta os resultados encontrados nos ensaios de arrancamento em areia e RCD-R realizados pelo autor.

Tabela 2.8 – Força de arrancamento para areia e RCD-R em diferentes tensões confinantes (ARAÚJO NETO, 2017).

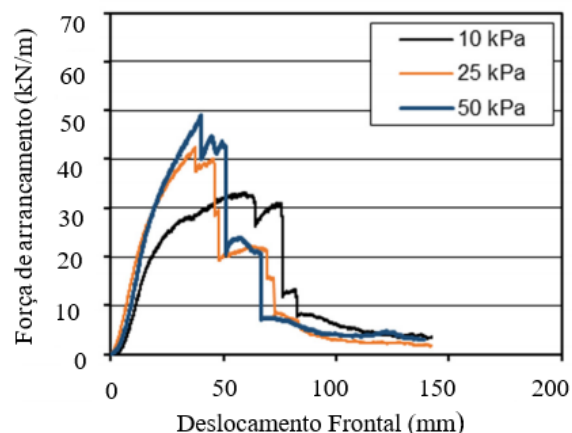
Sobrecarga (kPa)	Material	Força de Arrancamento (kN/m)
25	Areia	22,70
	RCD-R	18,30
50	Areia	26,60
	RCD-R	20,70
100	Areia	26,90
	RCD-R	25,50

Vieira *et al.* (2018) realizaram ensaios de arrancamento de grande escala em duas geogrelhas (uma de poliéster e outra de polietileno de alta densidade) enterradas em um RCD-R de grãos finos ($D_{50} = 0,70$ mm). Os autores buscaram avaliar os fatores normalmente avaliados (variação do tamanho da amostra, taxa de deslocamento e pressão vertical de confinamento) em ensaios de arrancamento (FIGURA 2.20), porém nesse caso verificando o comportamento desenvolvido devido a presença de RCD-R. Os resultados obtidos nos ensaios mostraram que a resistência máxima ao arrancamento variou devido ao aumento do tamanho das geogrelhas, aos deslocamentos impostos e a sobrecarga de confinamento – típicos de ensaios em solos. Porém, verificaram que os coeficientes de interface aumentaram com o aumento da sobrecarga e apresentaram valores superiores aos normalmente encontrados, conforme relatados em outros trabalhos.

Figura 2.20 – Resultados obtidos para ensaios de arrancamento por Vieira *et al.* (2018) em RCD-R fino: a) Variação das dimensões da amostra de geogrelha de poliéster sobre sobrecarga de 25 kPa; e b) Variação da sobrecarga com geogrelha de poliéster com dimensões de 250 mm x 750 mm.



(a)



(b)

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e os equipamentos empregados na parte experimental da pesquisa. São descritos os procedimentos utilizados para realizar a coleta e os ensaios de caracterização em laboratório. Posteriormente, são apresentados os processos de execução dos ensaios de arrancamento, descrevendo todos os detalhes utilizados na montagem do ensaio e na determinação da resistência entre a geogrelha e os materiais de preenchimento.

3.1. MATERIAIS

Para analisar a resistência ao arrancamento da geogrelha enterrada em RCD-R, além desse material, foi utilizada, para fins de comparação, uma areia natural.

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

Para a realização deste trabalho, adotou-se como material de preenchimento um tipo de RCD-R produzido por uma usina de reciclagem localizada em Aparecida de Goiânia-GO (FIGURA 3.1), o qual é nomeado pela empresa como “areia reciclada cinza” (ARC). Esse material é obtido a partir do processo de britagem e peneiramento de blocos de concreto. Optou-se por esse material, dentre os produzidos pela empresa de beneficente, por visualmente apresentar uma granulometria compatível com aquelas recomendadas para material de preenchimento em estrutura de solo reforçado (ESR).

Inicialmente, foram realizadas 5 (cinco) coletas da ARC durante os meses de outubro a dezembro de 2018, para fins de analisar a variabilidade do material; posteriormente, uma sexta coleta foi realizada, de modo que o material fosse caracterizado geotecnicamente e empregado nos ensaios de arrancamento. O plano de coleta realizado está apresentado na Tabela 3.1. O procedimento de coleta seguiu as recomendações da NBR 10007 (ABNT, 2004) e da NBR Norma Mercosul (NM) 26 (ABNT, 2009) para materiais que se encontram dispostos em pilha.

Dessa forma, para ter uma amostra representativa do material, foram coletados materiais do topo, meio e da base da pilha (FIGURA 3.2).

Figura 3.1 – Resíduos reciclados na usina de reciclagem em Aparecida de Goiânia - GO.



Tabela 3.1 – Plano de coleta realizado e massas coletadas.

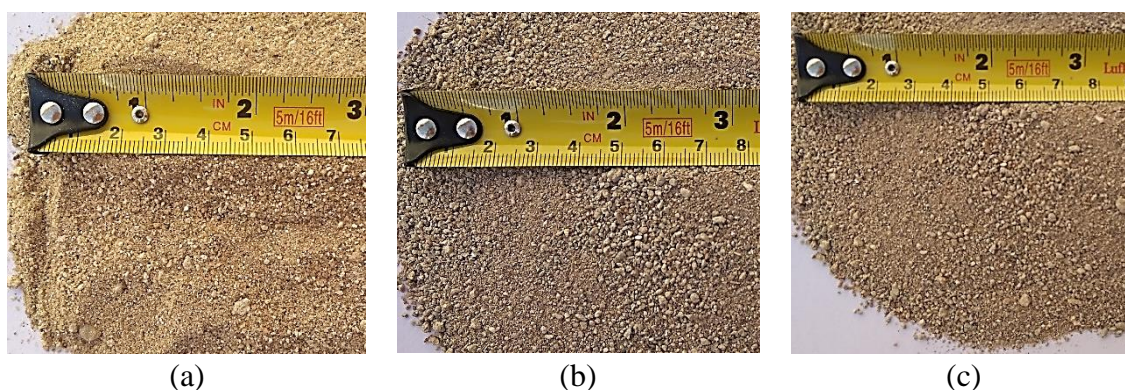
Amostra	Data coleta	Massa (kg)	Ocorrência de chuva no dia da coleta	Ocorrência de chuva do dia anterior à coleta
ARC-01	26/10/2018	65	Sim	Sim
ARC-02	09/11/2018	90	Sim	Sim
ARC-03	23/11/2018	90	Não	Não
ARC-04	30/11/2018	100	Não	Sim
ARC-05	07/12/2018	100	Sim	Não
ARC-06	08/07/2019	300	Não	Não

Figura 3.2 – Locais de coleta da areia reciclada na pilha de estocagem: a) topo; b) meio e c) base.



Para fins de comparação, foi utilizado um outro material de preenchimento nos ensaios de arrancamento, tratando-se de uma areia natural (AN), a qual foi adquirida em armazém de construção. A granulometria da AN foi escolhida após a caracterização da ARC, com a análise da participação de parcelas de areia grossa, fina ou média na ARC – baseando-se apenas no tamanho dos grãos, conforme NBR 6502 (ABNT, 1995). Para comparação, foi também utilizado um material construído em laboratório a partir do processo de peneiramento da amostra de ARC-06, de modo que a areia reciclada cinza construída (ARC-C) tivesse a sua granulometria o mais semelhante possível à da AN. A Figura 3.3 apresenta os materiais que foram utilizados nesta pesquisa.

Figura 3.3 – Materiais utilizados: a) AN adquirida em armazém de construção; b) ARC coletada em usina de reciclagem e c) ARC-C (obtida por peneiramento da ARC).



Os materiais (ARC e AN) foram secos à sombra, dispostos em recipientes apropriados, e, em seguida, foram passados na peneira 4,8 mm e guardados novamente em sacos plásticos, para posterior caracterização.

3.1.2. Geogrelha

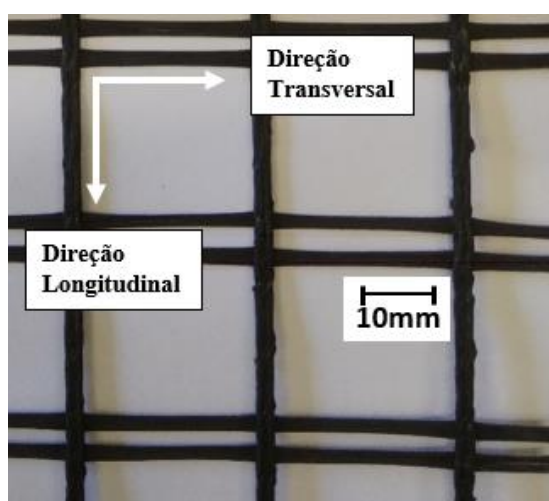
Para a realização dos ensaios de arrancamento, definiu-se utilizar uma geogrelha de poliéster (GGPET), de alta tenacidade e de baixa susceptibilidade à fluência, com revestimento protetor polimérico, usualmente empregada com a função principal de reforço dos solos (FIGURA 3.4). As propriedades físicas e mecânicas da geogrelha são semelhantes às utilizadas nos trabalhos de Teixeira (1999), Kakuda (2005) e Araújo Neto (2018), para que os resultados da pesquisa desta pesquisa pudessem ser comparados aos obtidos por tais trabalhos. A Tabela 3.2 apresenta as características da geogrelha fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3.2 – Propriedades da geogrelha polimérica utilizada na pesquisa (fornecidas pelo fabricante).

Parâmetro	GGPET
Polímero dos filamentos	PET
Revestimento protetor	Polimérico
Tamanho da abertura de malha	20 x 25 mm
Resistência à tração nominal – Longitudinal (NBR ISO 10319)	35 kN/m
Resistência à tração ensaiada*	31,54 kN/m
Resistência à tração nominal – Transversal (NBR ISO 10319)	20 kN/m
Módulo de rigidez a 5% deformação – Longitudinal (NBR ISO 10319)	≥ 350 kN/m
Deformação na resistência nominal – Longitudinal (NBR ISO 10319)	$\leq 10\%$
Resistência de referência (120 anos, $\leq 20^\circ$ C) – NBR 15226	≥ 21 kN/m
Resistência de referência (2 anos, $\leq 20^\circ$ C) – NBR 15226	≥ 24 kN/m
Deformação por fluência (após 2 anos, T_{max}) – NBR 15226	$\leq 1\%$
Coefficiente de Interação - Solos finos	$\geq 0,8$
Coefficiente de Interação – Solos arenosos	$\geq 0,9$
Espessura dos elementos transversais**	0,43 mm
Espessura dos elementos longitudinais**	1,00 mm

Nota: (*) Média de cinco amostras de geogrelhas ensaiadas; (**) valores medidos.

Figura 3.4 – Disposição da geogrelha em estudo.



3.2. MÉTODOS

Como este trabalho aborda uma proposta de aplicação de RCD-R em obras geotécnicas, as amostras foram submetidas aos ensaios usualmente empregados na caracterização física e

mecânica de solos. Todos os procedimentos de execução dos ensaios seguiram as recomendações presentes nas normas atuais.

3.2.1. Caracterização geotécnica das areias recicladas e AN

Os ensaios de caracterização geotécnica das areias recicladas e AN foram realizados no Laboratório de Geotecnia (LABGeo) da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás (EECA-UFG). Tendo em vista a proposta de uso dos materiais estudados em obras geotécnicas, foram realizados os ensaios de caracterização usualmente empregados para solos: i) análise granulométrica (peneiramento e sedimentação), ii) massa específica dos sólidos, iii) limites de Atterberg e iv) compactação. Para a AN, devido à impossibilidade de compactação, foi realizado o ensaio de determinação dos índices de vazios máximos e mínimos. As normas empregadas na realização dos ensaios são apresentadas na TABELA 3.3.

Tabela 3.3 – Normas empregadas na realização dos ensaios.

Relação de Normas Técnicas
NBR 6457 – Amostra de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização (ABNT, 2016a) ^a
NBR 7181 – Solo – Análise granulométrica (ABNT, 2016d) ^b
NBR 6508 – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica (ABNT, 2016b)
NBR 6459 – Solo – Determinação do limite de liquidez (ABNT, 2017)
NBR 7180 – Solo – Determinação do limite de plasticidade (ABNT, 2016c)
NBR 7182 – Solo – Ensaio de compactação (ABNT, 2016e)
D4253 – <i>Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table</i> (ASTM, 2016a)
D4254 – <i>Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density</i> (ASTM, 2016b)

^a Preparação da amostra com secagem prévia ao ar.

^b Sedimentação (com e sem defloculante), peneiramento fino e grosso.

O ensaio de compactação foi realizado com energia Proctor Normal, com reuso de material, dado que, segundo estudo de Santos (2007) e Barbosa (2017), o índice de quebra do RCD-R foi considerado muito baixo para essa energia de compactação.

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

Com o intuito de conhecer o formato dos grãos e os elementos constituintes realizou-se ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e de espectroscopia de raios x por dispersão em energia (EDS), os quais foram realizados no Laboratório Multiusuário de Microscopia de Alta Resolução (LabMic) da Universidade Federal de Goiás (UFG).

As amostras de AN e ARC foram peneiradas e os materiais nos seguintes intervalos granulométricos foram utilizados para realização dos ensaios: i) material passante na peneira de 4,8 mm e retido na de 2 mm; ii) material passante na peneira de 2 mm e retido na peneira de 1,2 mm (intervalo que possui grãos com classificação de areia); e o material passante na peneira 0,075 mm. Esses intervalos foram escolhidos com o intuito de abranger diferentes tamanhos de grãos das amostras e, assim, ter uma amostra representativa do material.

3.2.3. Ensaio de cisalhamento direto

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados seguindo os procedimentos determinados na ASTM D3080/D3080M-11 – *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*.

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados seguindo os seguintes procedimentos:

- a) Compactação e preparação do material

As amostras ensaiadas na umidade ótima (w_{ot}) e higroscópica (w) foram preparadas com um grau de compactação ou compacidade (GC) de 90%.

- b) Realização do ensaio

Os ensaios foram realizados para diferentes valores de tensões normais, sendo aplicadas: 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa e 200 kPa. Os ensaios foram realizados em uma caixa porta-amostra (FIGURA 3.5) com as seguintes dimensões: 60,00 mm x 60,10 mm x 19,68 mm (comprimento, largura e altura, respectivamente).

Figura 3.5 – Ensaio de Cisalhamento Direto: a) Vista superior da caixa porta-amostra e b) Conjunto montado.



3.2.4. Ensaio de arrancamento

O ensaio de arrancamento de geogrelhas foi realizado no Laboratório de Inovação Tecnológica em Construção Civil (LABITECC) da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás (EECA-UFG), baseado na ASTM D6706-01 – *Standard Test Method for Measuring Geosynthetic Pullout Resistance in Soil*.

O equipamento utilizado para a execução dos ensaios de arrancamento foi construído por Araújo Neto (2017), sendo que suas dimensões foram baseadas em equipamentos de pequeno porte anteriormente desenvolvido por Teixeira (2003).

O equipamento (de pequeno porte) consiste numa caixa de ensaio construída com chapas de aço de 3 mm de espessura; e possui comprimento de 250 mm, largura de 300 mm e altura de 150 mm, resultando em um volume de aproximadamente 0,01 m³ (FIGURA 3.6). A caixa possui em sua parede frontal uma abertura, com 10 mm de altura, ao longo de toda a sua extensão, por onde se faz a inserção do geossintético. Há uma barra de aço soldada na parte traseira da caixa, para a sua fixação, por meio de parafusos, ao equipamento universal de ensaio. Para a compactação das amostras na caixa foi utilizado um soquete com placa de aço quadrada (100 mm x 100 mm). A força de arrancamento foi aplicada por meio do equipamento universal de ensaio com capacidade de 30 toneladas. Os procedimentos de ensaio foram semelhantes aos realizados por Araújo Neto (2017). Os acessórios empregados na realização dos ensaios de arrancamento, conforme pode ser verificado nas Figuras 3.7 e 3.8, foram:

- garra do tipo rolete para fixação do geossintético;
- película de PVC (2 mm) para ser utilizada no topo da caixa;

- mangueiras pneumáticas para suprimento de ar para a bolsa inflável;
- compressor de ar;
- registro de entrada/saída de ar da bolsa e manômetro;
- microcomputador para determinação da força e deslocamento;
- aparelho para leitura da tensão na célula de tensão total;
- câmera de filmagem para acompanhar as leituras da CTT;
- equipamento universal de ensaio, para aplicação da força de arrancamento e determinação do deslocamento da geogrelha;
- célula de carga para monitoramento da força de arrancamento; e
- película tripla de polietileno de baixa densidade (0,5 mm de espessura) empregada para reduzir o atrito entre o material de preenchimento ensaiado e as paredes da caixa

Figura 3.6 – Caixa de arrancamento: a) Vista Frontal; b) Vista superior; c) Vista da caixa fechada; e d) Bolsa de ar acoplada a tampa da caixa.

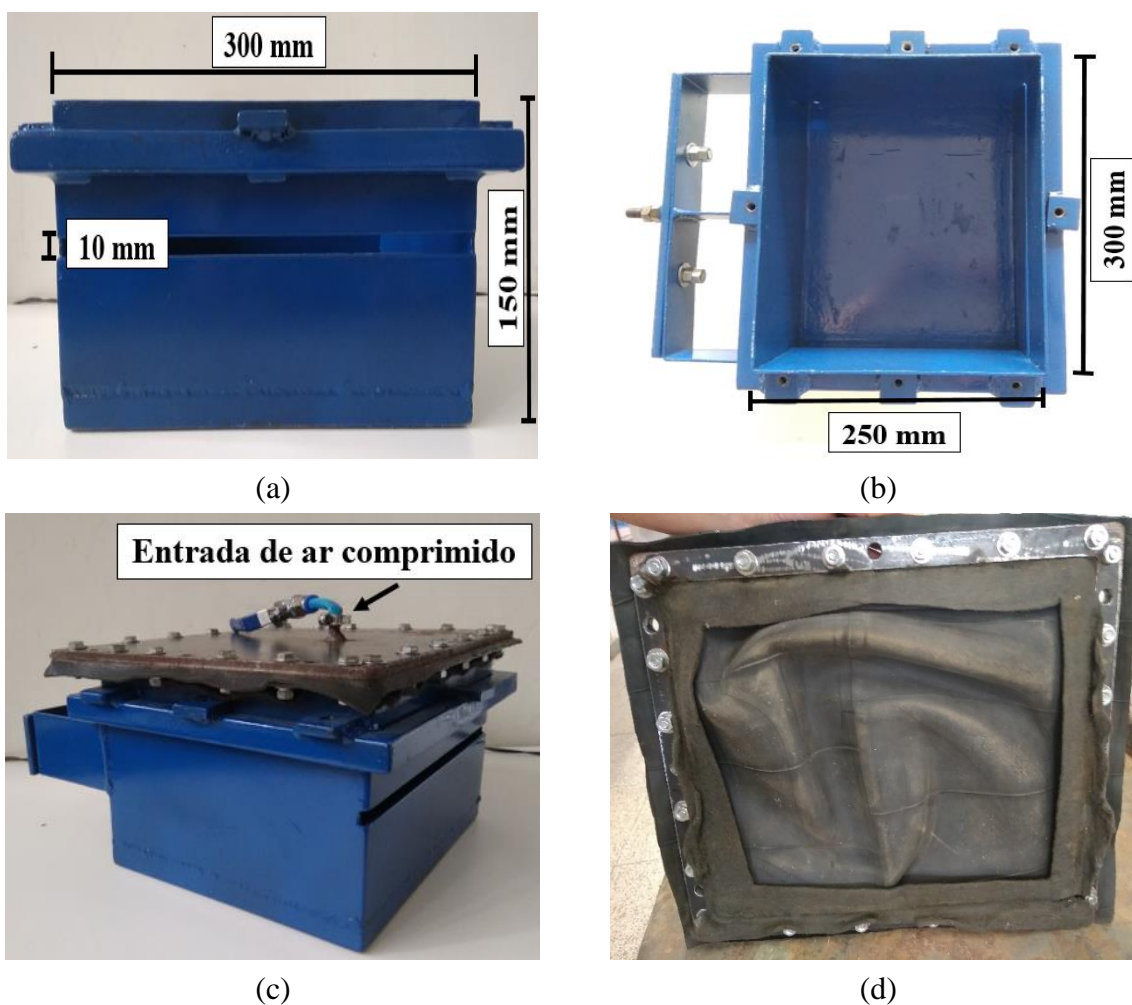


Figura 3.7 – Esquema de montagem de todos os acessórios para a realização dos ensaios de arrancamento.

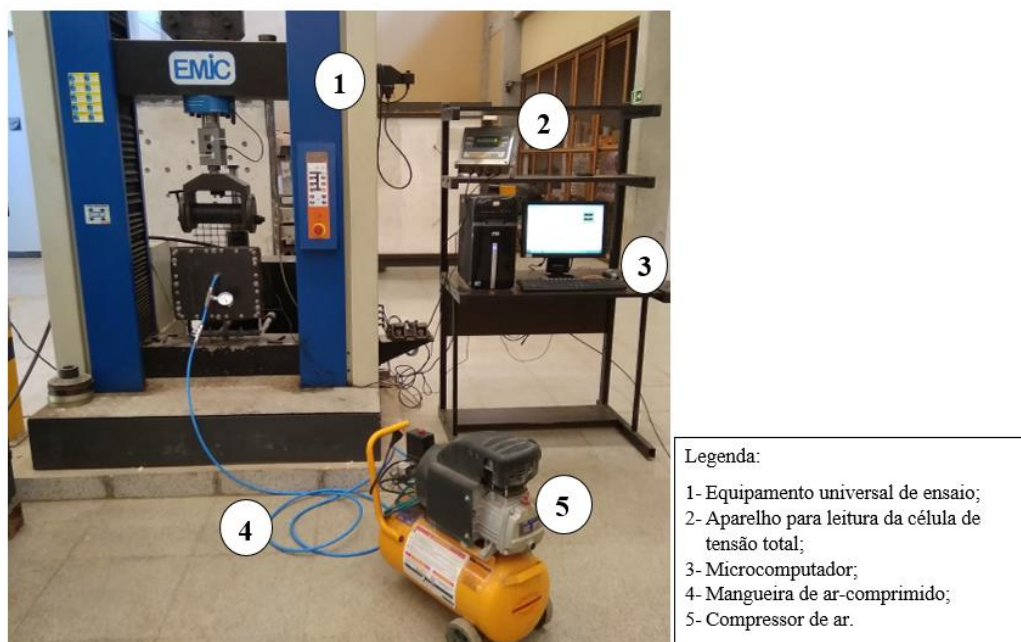
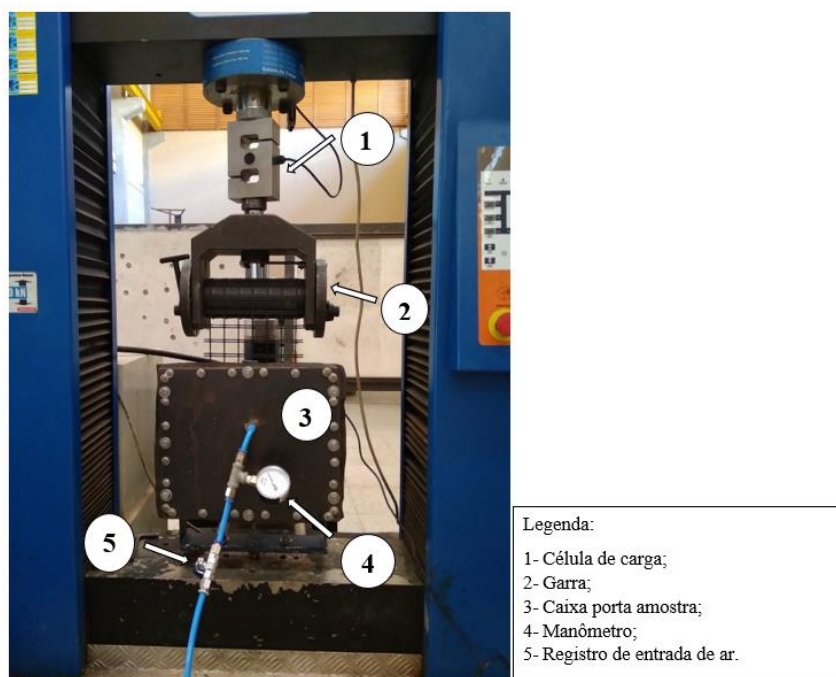


Figura 3.8 – Experimento montado para realização do ensaio.



Os ensaios de arrancamento foram realizados seguindo os seguintes passos:

- a) Preparação do material de preenchimento e correção do teor de umidade

Após secos à sombra, todos os materiais foram passados na peneira de 4,8 mm. A AN foi ensaiada após a secagem. As ARC e ARC-C foram ensaiadas em duas condições de umidade:

inicialmente, foram ensaiadas logo após a secagem, na umidade higroscópica; e, posteriormente, tiveram suas umidades corrigidas até as umidades ótimas de cada material. Esses dois valores de umidade foram adotados para verificar o comportamento do material caso fosse empregado em campo compactado na umidade ótima (apresentando um elevado valor de peso específico seco máximo) e o material seco (para comparar com a areia natural, pois essa não foi compactada).

b) Preparação da caixa

Para evitar o efeito do atrito de interface que ocorre entre o material de preenchimento e as paredes internas da caixa, foi aplicado um revestimento das paredes internas com membranas, intercaladas por material lubrificante, conforme recomendado por Palmeira e Milligan (1989); Ochiai *et al.* (1996). Neste trabalho foram utilizadas três camadas de membranas de polietileno de baixa densidade, intercaladas por camadas de vaselina.

c) Compactação dos materiais

A compactação foi realizada por meio da deposição dos materiais de modo a obter o grau de compactação de 90%, com o auxílio soquete com placa de aço (100 mm x 100 mm). Os materiais foram depositados e compactados em camadas de 37,5 mm (exceto a última, com 30,5 mm), de modo buscar uma compactação homogênea – o número de camada foi igual a 4 (quatro), conforme realizado por Araújo Neto (2017).

d) Montagem dos acessórios

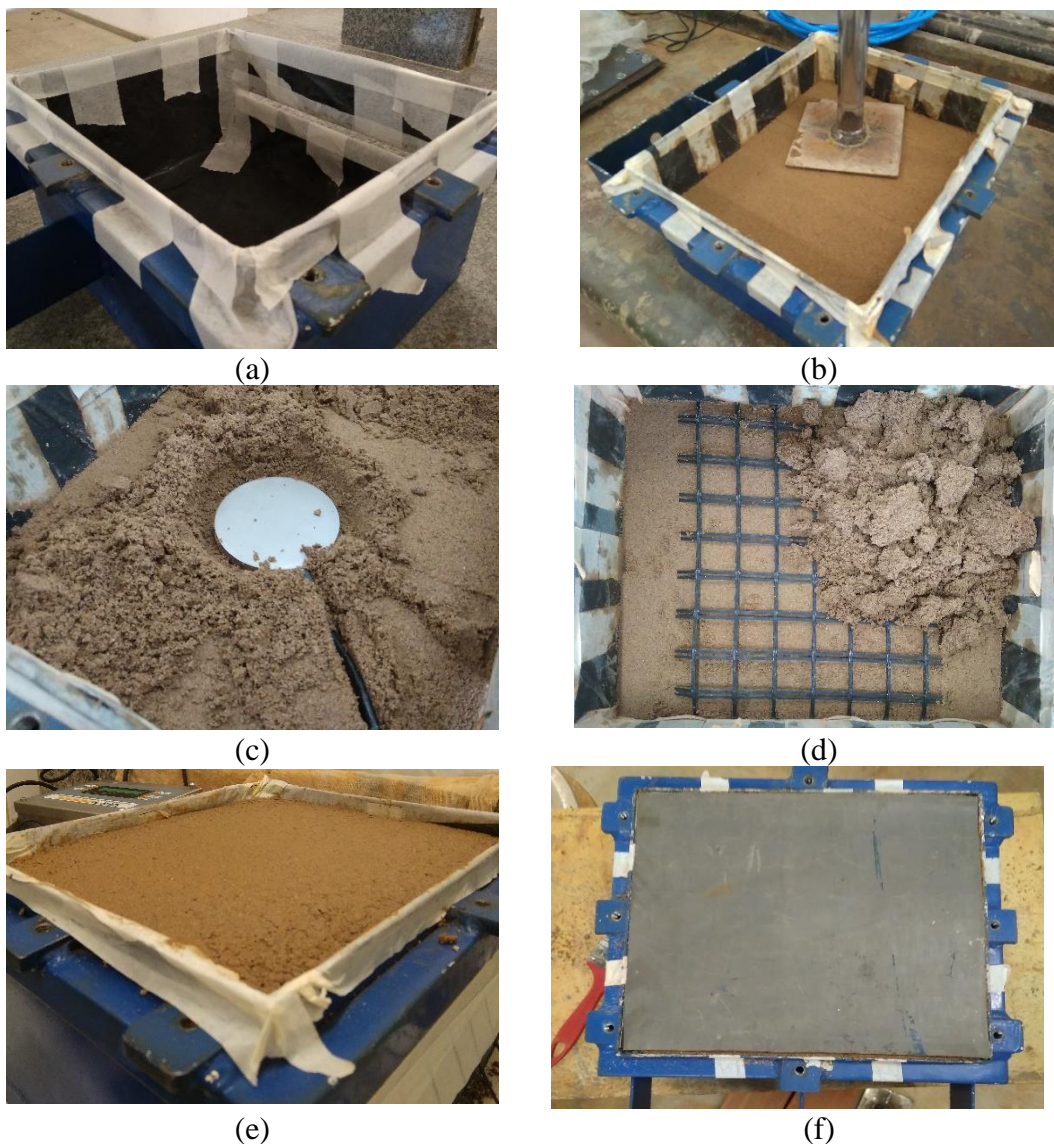
Inicialmente, compactou-se 2 (duas) camadas até a altura da abertura para a passagem da geogrelha – 75 mm de altura em relação ao fundo da caixa. Após isso, foi necessário escavar 10 mm para a instalação da célula de tensão total (CTT); depois de instalada a CTT (75 mm) e com capacidade de 3kgf/cm², a camada foi restituída com o material de preenchimento, e, em seguida, o corpo de prova de geogrelha foi disposto. Posteriormente, foi realizada a compactação das duas camadas superiores. Observa-se que 7 mm, em relação à altura total da caixa, foram deixados livres para que uma camada de membrana de PVC (2 mm) fosse instalada sobre o material, a fim de proteger a bolsa inflável (empregada para aplicação de tensão normal) de eventuais possíveis danos, e um espaço (5 mm) foi deixado livre para que a bolsa de ar pudesse ser inflada.

e) Realização do ensaio:

Após a fixação da tampa da caixa com a utilização de parafusos, a mesma foi instalada no equipamento universal de ensaio. Utilizou-se um equipamento para leitura dos dados na tensão na CTT, sendo que os dados observados foram filmados. Os valores de deslocamento e força de arrancamento foram obtidos por sistema de aquisição de dados.

A Figura 3.9 apresenta alguns dos procedimentos adotados para a montagem do ensaio de arrancamento de geogrelha.

Figura 3.9 – Detalhes da montagem do ensaio: a) Revestimento das paredes da caixa; b) Compactação das camadas; c) CTT introduzida na segunda camada; d) Inserção da geogrelha; e) Preenchimento das camadas superiores; e f) Película protetora da bolsa de ar na última camada.



Os parâmetros utilizados para as análises dos ensaios de arrancamento foram: i) variação do material (areias recicladas e areia natural); ii) variação da largura das amostras de geogrelha (90 mm – 3 elementos longitudinais; 150 mm – 5 elementos longitudinais; e 200 mm – 7 elementos longitudinais); e iii) variação da umidade (higroscópica e ótima).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos da i) caracterização geotécnica das amostras de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) e areia natural (AN) e ii) resistência ao arrancamento das geogrelhas.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Este subitem apresenta os resultados da caracterização geotécnica de todas as amostras de areia reciclada cinza (ARC 01 a 06), areia natural (AN) e areia reciclada cinza construída (ARC-C). Os resultados são comparados com as recomendações de materiais para a utilização em estrutura de solo reforçado com geossintético.

4.1.1. Peso específico dos grãos do solo

Os resultados revelaram que os valores do peso específico dos grãos do solo (γ_s) passantes na peneira de abertura 4,8 mm apresentaram uma baixa variabilidade, coeficiente de variação (CV) de 0,28% e com valor médio de 27,06 kN/m³. A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos do peso específico dos grãos das amostras de ARC.

Tabela 4.1 – Peso específico dos grãos da ARC.

Amostras	γ_s (kN/m ³)
ARC-01	27,03
ARC-02	26,92
ARC-03	27,12
ARC-04	27,11
ARC-05	27,10
ARC-06	27,11
Valor médio	27,06 (CV= 0,28%)

As amostras de AN e ARC-C passantes na peneira de abertura 4,8 mm apresentaram valores de γ praticamente idênticos e iguais a 27,13 kN/m³ e 27,10 kN/m³, respectivamente.

O valor médio do peso específico das amostras de ARC e da ARC-C ensaiadas mostraram-se próximos: i) aos encontrados para materiais reciclados em outras cidades (SANTOS, 2007; ARAÚJO NETO, 2017; e BARBOSA, 2017); ii) aos provenientes dos agregados reciclados oriundos da cidade de Goiânia-GO (FLEURY, 2018; SILVESTRE, 2019; DOMICIANO, SANTOS; SILVA, 2020; e BRITTO, 2020); e iii) valores semelhantes aos encontrados para solos da região (ARAUJO, 2010; ALMEIDA, 2014; DIAS, 2014; e MENEZES, 2016).

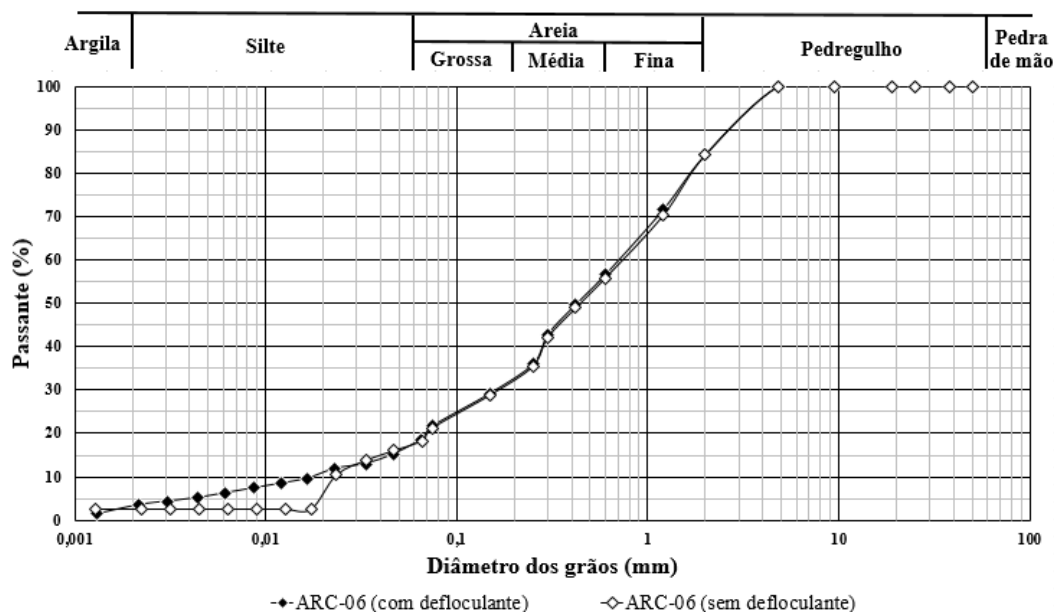
4.1.2. Análise Granulométrica

Neste item são apresentadas as curvas de distribuição granulométrica dos materiais utilizados neste trabalho. Observou-se também que todas as amostras passaram integralmente pela peneira de 4,80 mm.

4.1.2.1. Areia Reciclada Cinza

A análise da distribuição granulométrica das diferentes amostras de ARC demonstrou uma pequena influência do uso do defloculante (hexametáfosfato de sódio) nas curvas dos materiais. Esse comportamento também foi identificado nos estudos realizados por Dias (2014), Fleury (2018) e Britto (2020). A Figura 4.1 apresenta, como exemplo, as curvas granulométricas com e sem defloculante da amostra ARC-06. Todas as curvas de ARC com defloculante podem ser verificadas no Apêndice A.

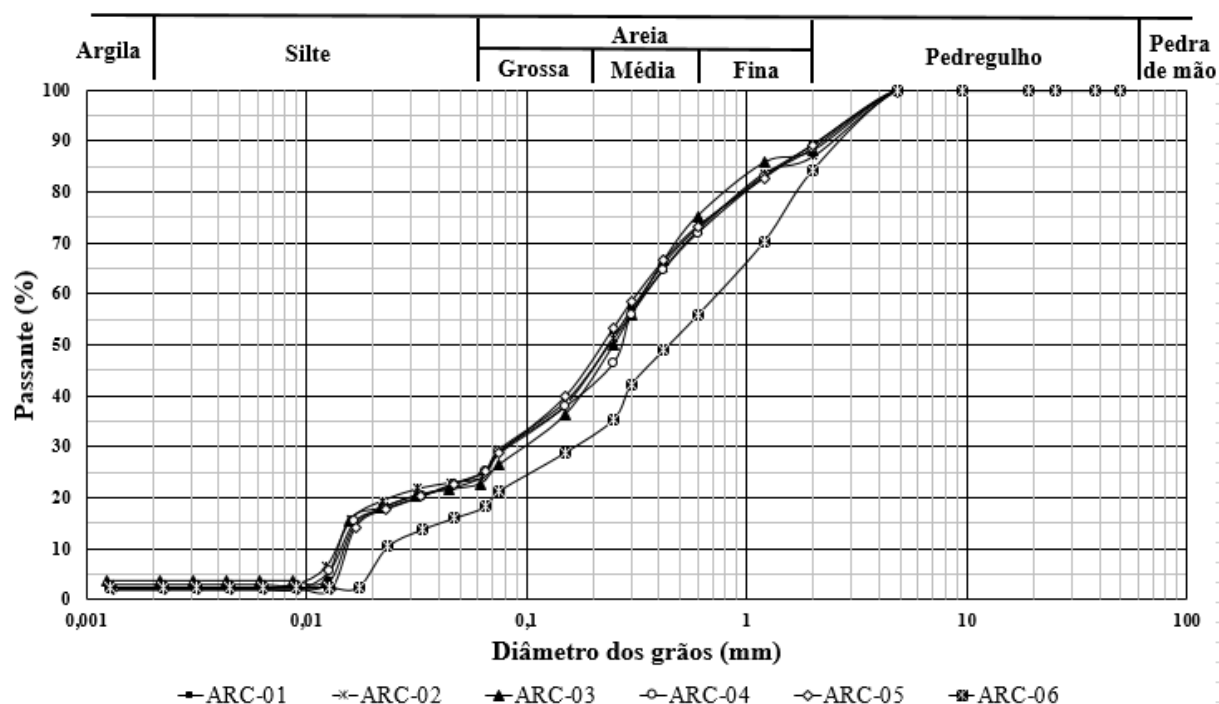
Figura 4.1 – Curvas granulométricas com e sem defloculante da amostra de ARC-06.



Durante o processamento do material, observou-se que o procedimento adotado pela usina não eliminou a existência de partículas de solos aderidas às placas de concreto e/ou argamassa. Assim, o solo local pode influenciar na granulometria do material, pois os RCD processados são obtidos principalmente de Goiânia-GO e sua região metropolitana (região de solo tipicamente tropical). Os solos tropicais encontrados nessa região normalmente possuem uma parcela argilosa que forma grumos, os quais são separados quando na presença de hexametáfosfato de sódio. Isso pode ser um dos motivos da diferença entre as curvas devido a ação do defloculante – mesmo que essa diferença entre as curvas seja pequena.

A análise da distribuição granulométrica das diferentes amostras de ARC demonstrou uma baixa variabilidade do material (FIGURA 4.2). No entanto, a amostra ARC-06 apresentou distribuição distinta das demais amostras. Esse fato pode ser justificado devido mudanças adotadas pela empresa no processo de beneficiamento – buscando diminuir a quantidade de material fino gerado – dessa amostra. Vale ressaltar que a baixa variabilidade observada pode ser uma indicação de um padrão de beneficiamento realizado pela usina de reciclagem. Outros estudos também observaram pequenas variabilidades nas curvas granulométricas de RCD-R (SANTOS, 2007, 2011; COUTO e SANTOS, 2016; BARBOSA, SILVA e SANTOS, 2016; SILVESTRE, 2019; e BRITTO, 2020).

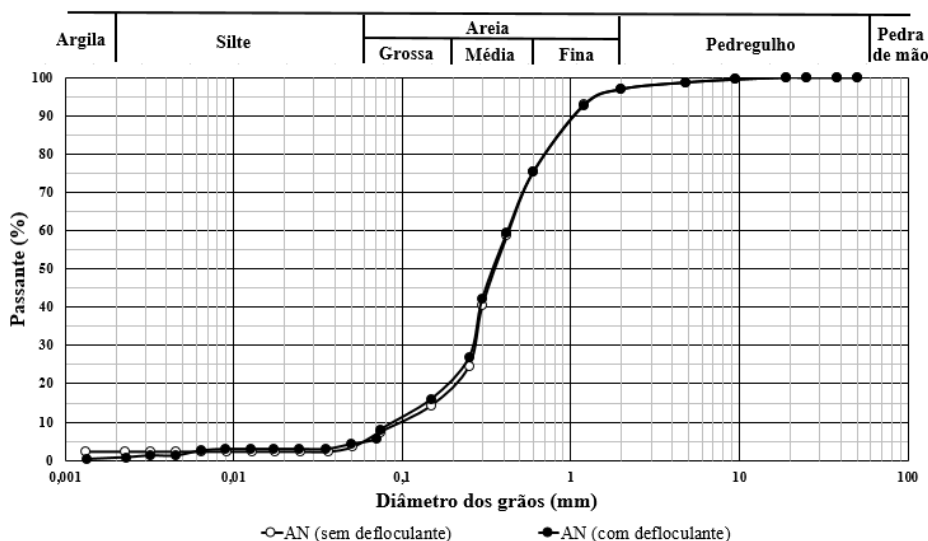
Figura 4.2 – Curvas granulométricas das amostras de ARC (sem defloculante).



4.1.2.2. Areia Natural e Areia Reciclada Cinza Construída

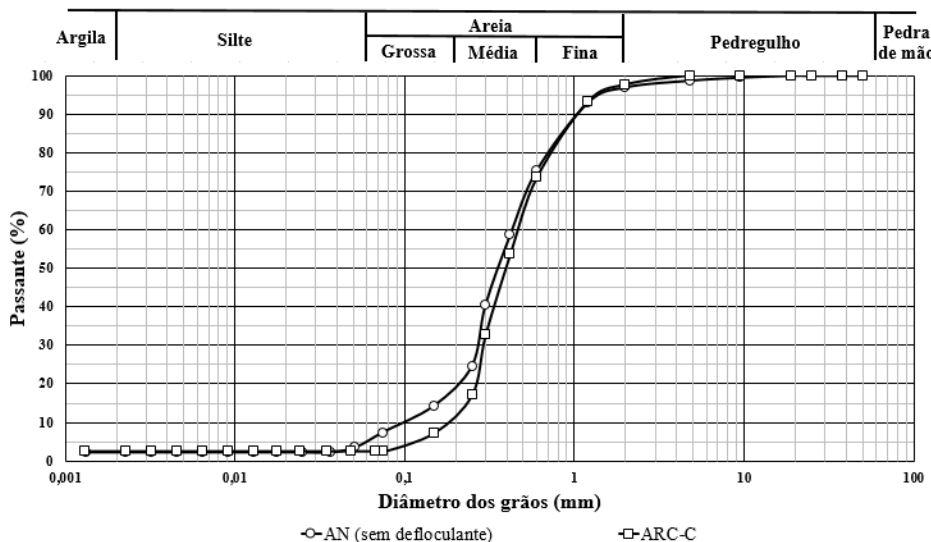
Verificou-se que a areia natural apresentou curvas bem uniformes e sem influência do defloculante (FIGURA 4.3). Isso ocorre devido ao fato da areia ter sido retirada em leito de rio e não conter agregações de partículas que poderiam ser rompidas com a ação do defloculante.

Figura 4.3 – Curvas granulométricas com e sem defloculante da AN.



A granulometria da areia cinza construída (ARC-C) foi determinada tomando como referência a curva da AN de forma que as distribuições granulométricas ficassem o mais semelhante possível. A Figura 4.4 apresenta as curvas de ARC-C e AN.

Figura 4.4 – Curvas granulométricas de ARC-C e AN.



4.1.2.3. Variabilidade da distribuição granulométrica

Ao verificar o CV do percentual de material passante das amostras de ARC (01 a 06) em relação ao diâmetro dos grãos (FIGURA 4.5), observou-se que, entre os diâmetros 0,03 mm e 0,6 mm, há uma tendência de estabilização (CV variando de 9% a 13%); entre os diâmetros 0,009 mm e 0,022 mm estão concentrados os maiores valores (valor no pico: CV= 40%); e, para valores inferiores a 0,01 mm, houve uma estabilização (aproximadamente CV = 24%). Os valores de CV para as curvas de ARC com uso de defloculante são apresentadas no Apêndice B – observou-se também uma tendência de aumento da variabilidade quando os diâmetros dos grãos diminuem.

No estudo realizado por Fleury (2018), o autor verificou que as amostras são influenciadas pelos teores de solo, concreto e argamassa em suas composições, e isso influenciou na variação do CV nos trechos analisados. Vale ressaltar que a ARC, pela sua definição, é um produto obtido por meio do beneficiamento de blocos de concreto e argamassa. No entanto, observou-se que algumas amostras coletadas de ARC (01 a 05) apresentam uma coloração cinza-amarronzada, o que indica a presença de parcelas de material cerâmico e/ou solo em sua composição (FIGURA 4.6).

Figura 4.5 – Coeficiente de variação do material passante versus diâmetro dos grãos – ARC (01 a 06) sem defloculante.

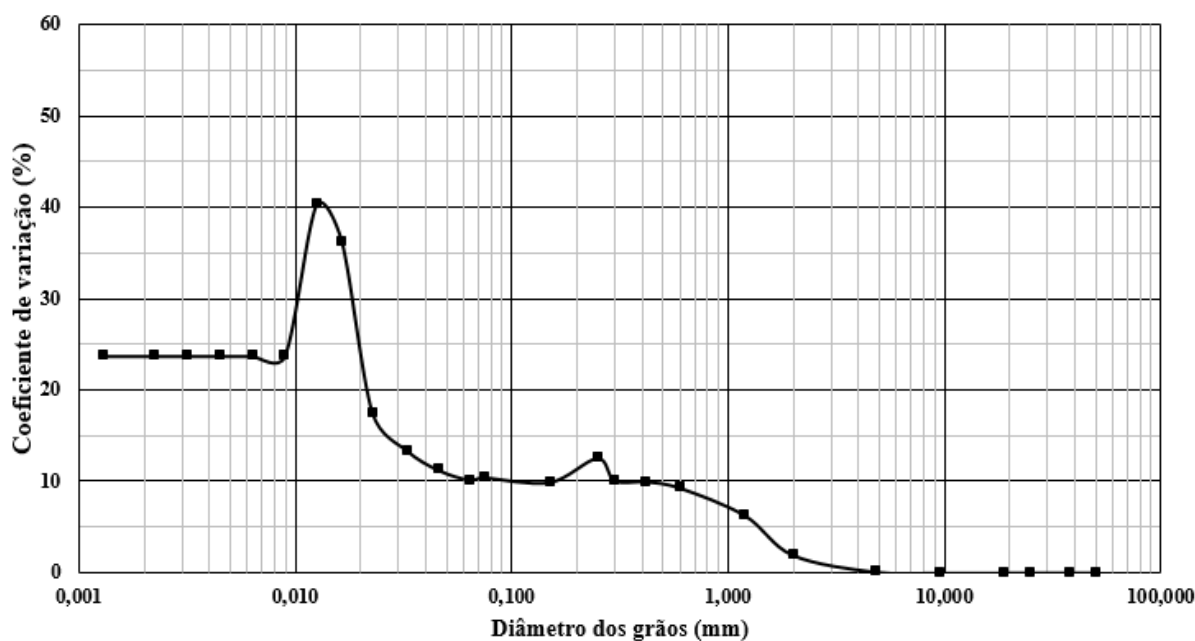
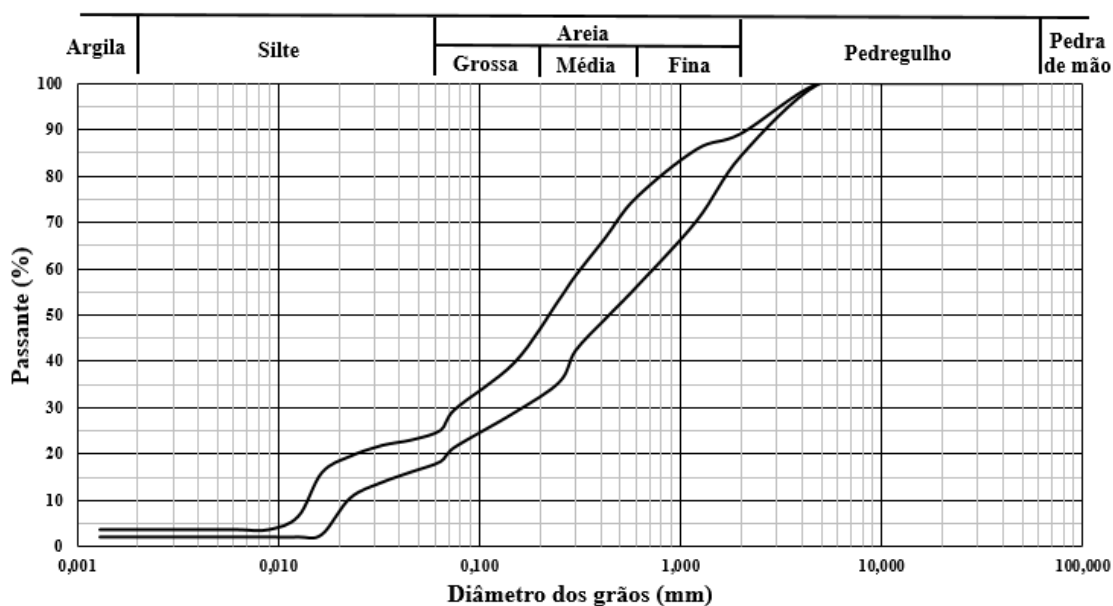


Figura 4.6 – Variação entre a coloração das amostras de ARC (01 a 05) e ARC-06.



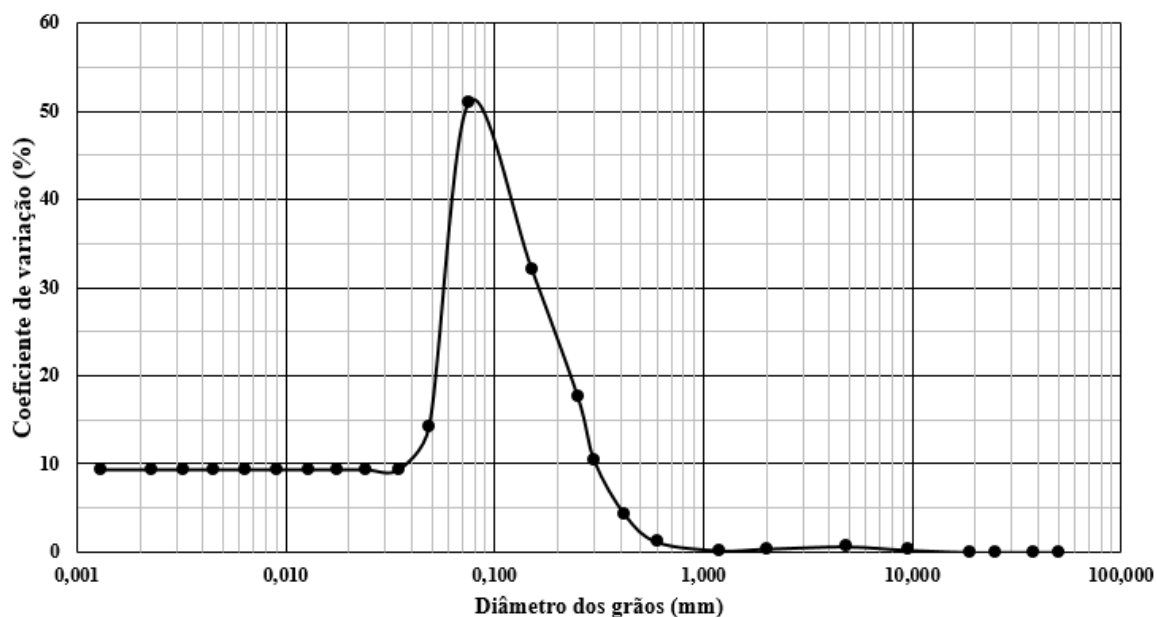
Como os RCD-R são materiais que apresentam variabilidade, a melhor apresentação da granulometria é por meio de uma faixa granulométrica, conforme Figura 4.7. A faixa granulométrica apresentada é referente às amostras de ARC (01 a 06).

Figura 4.7 – Faixa granulométrica das amostras de ARC (01 a 06).



Em relação a AN e ARC-C, observou-se que, em quase todos os diâmetros, os valores de CV ficaram menores que 10% (com valores superiores apenas entre os diâmetros 0,025 mm e 0,3 mm). Apesar do pico ($CV = 51\%$) observado, considera-se que a construção da curva de ARC-C – baseada na granulometria da AN – mostrou-se bem sucedida. A Figura 4.8 apresenta os valores de CV entre as AN e ARC-C.

Figura 4.8 – Coeficiente de variação do material passante versus diâmetro dos grãos – AN e ARC-C.



4.1.2.4. Classificação geotécnica dos materiais

Diante do enfoque geotécnico, faz-se necessário classificar as areias recicladas de acordo com as seguintes normas: i) ABNT, utilizando-se da NBR 6502 (ABNT, 1995); e 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). As faixas granulométricas e classificações de cada uma das amostras são apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Faixa granulométrica e classificação dos materiais.

Amostras								
Frações (%)	ARC-01	ARC-02	ARC-03	ARC-04	ARC-05	ARC-06	AN	ARC-C
Pedregulho	10,88	12,97	11,88	11,45	10,81	15,75	3,04	2,27
Areia	65,26	63,06	65,56	64,15	64,76	66,63	93,57	87,73
Silte	21,84	21,01	18,98	22,41	22,43	15,09	1,28	2,54
Argila	2,01	2,96	3,58	1,99	1,99	2,52	2,11	0,00
<i>C_c</i>	1,42	1,22	1,90	1,22	1,25	1,52	1,61	1,02
<i>C_u</i>	22,67	23,33	23,33	23,33	20,00	31,73	4,20	2,56
Classificação								
ABNT	Areia Siltosa			Areia Pedregulhosa			Areia Média	Areia Média
SUCS	-	-	-	-	-	-	SP-SC	SP

SP-SC – Areia mal graduada com argila

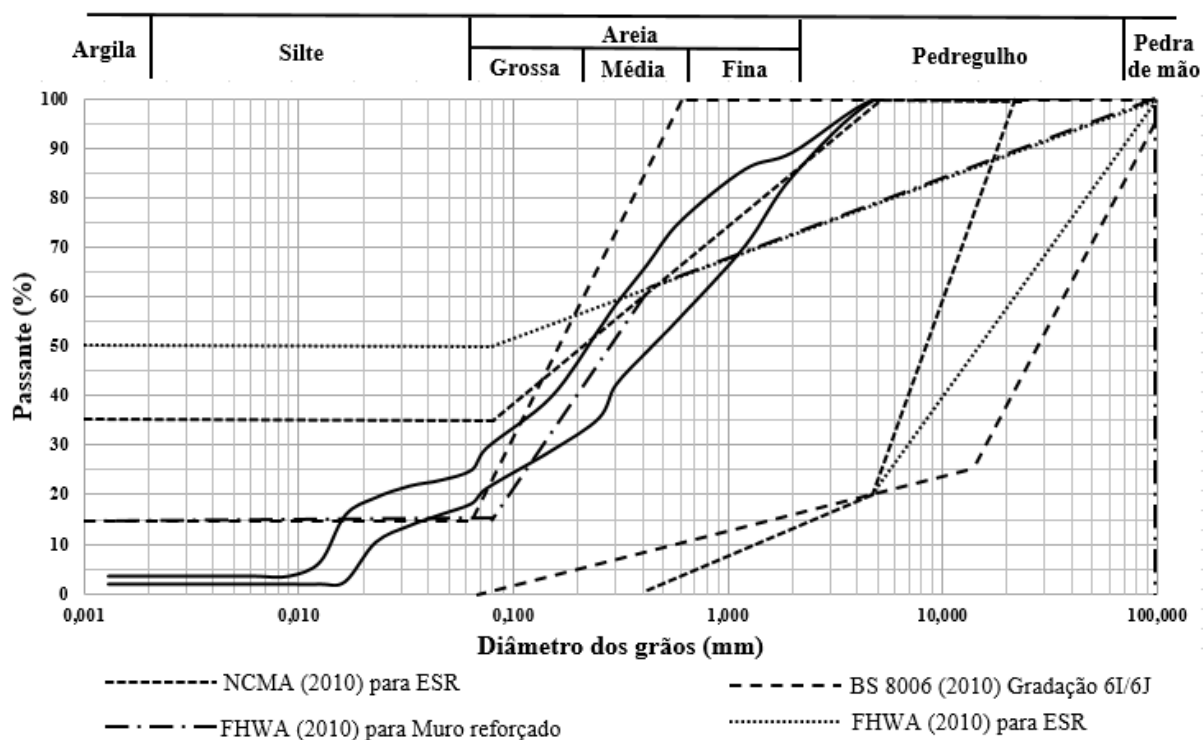
SP – Areia mal graduada

4.1.2.5. Aplicação das areias recicladas em obras geotécnicas

A análise da adequação granulométrica da ARC para uso em estruturas de solo reforçado (ESR) revelou a curva referente à amostra ARC-06 foi a que melhor correspondeu às especificações das normas internacionais BS 8006 (2010), FHWA (2010) e NCMA (2010). Considerando as recomendações da FHWA (2010), observou-se que seria necessário fazer algumas correções no material para ele se encaixasse dentro das faixas estabelecidas, conforme pode ser verificado na Figura 4.9. A parte superior da faixa de ARC teria que fazer correções em para ficar entre os limites preconizados em todas as normativas.

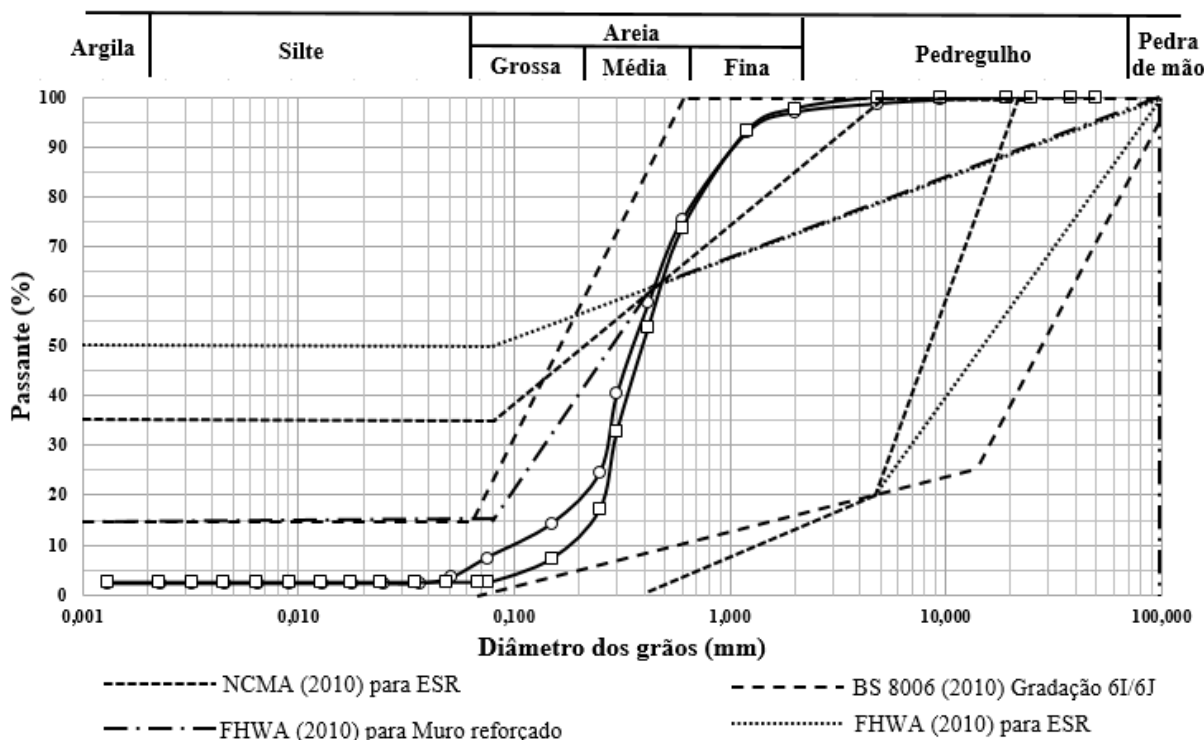
Observou-se ainda que as amostras de AN e ARC-C apresentaram curvas que ficaram dentro da normativa BS 8006 (2010), mas seria necessário fazer algumas correções granulométricas em relação aos grãos superiores a 0,4 mm para ficar dentro das faixas das normativas de FHWA (2010) e NCMA (2010) – ver Figura 4.10.

Figura 4.9 – Gradação das amostras de ARC para aplicação em ESR.



Os resultados encontrados para as amostras de areias recicladas estão de acordo com as afirmações de alguns autores em relação à possibilidade de utilização de materiais reciclados em obras geotécnicas como material de preenchimento (SANTOS, 2007, 2011; SANTOS, PALMEIRA e BATHURST, 2014; VIEIRA e PEREIRA, 2016; CARDOSO *et al.*, 2016).

Figura 4.10 – Gradação das amostras de AN e ARC-C para aplicação em ESR.

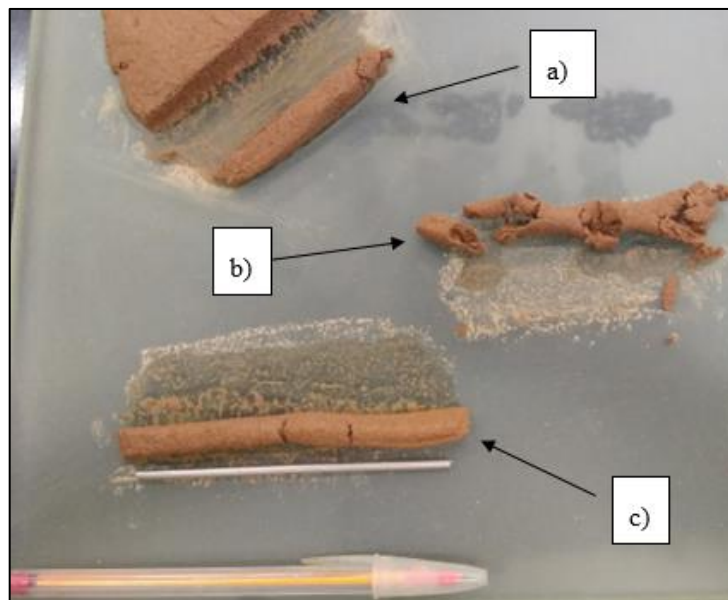


4.1.3. Índices de consistência

A realização dos ensaios de limite de consistência, para todas as amostras de ARC (01 a 06), revelou a dificuldade para determinar o limite de liquidez. Quanto ao limite de plasticidade, não foi possível a moldagem do cilindro de 3 mm de diâmetro (FIGURA 4.11). Diante desses resultados, todas as amostras de ARC foram classificadas como ‘não plásticas’ (NP). O mesmo comportamento foi verificado nas amostras de AN e ARC-C, pois esse material possui um baixo teor de finos em sua composição, e por isso esses materiais também foram classificados como ‘não plásticos’.

Vale ressaltar que outros trabalhos que investigaram materiais reciclados chamaram a atenção para o fato das amostras terem sido classificadas como ‘não plástica’ apresenta-se como um ponto positivo (SANTOS, 2007, 2011; FLEURY, 2018; SILVESTRE, 2019; e BRITTO, 2020), pois as normas BS 8006 (2010) e FHWA (2010) recomendam a utilização de materiais que não apresentem parcela de resistência coesiva.

Figura 4.11 – Ensaio de limite de plasticidade da ARC: a) parcela da amostra separada para obter a forma de um cilindro; b) parcela que apresentou quebra e não foi possível moldar o cilindro; c) parcela que adquiriu o tamanho de 10 cm, porém não atendeu ao diâmetro de 3 mm.



4.1.4. Compactação da ARC e ARC-C

Observou-se que, entre as amostras de ARC, a curva relativa à amostra ARC-06 apresentou o maior valor de $\gamma_d \text{ máx.}$ Esse material aparentemente possui em sua composição maior teor de materiais advindos do concreto, fator observado visualmente pela coloração mais acinzentada dessa amostra (ver Figura 4.6), o que certamente repercutiu nesse resultado. Apesar da ARC-C apresentar granulometria predominante da fração areia, foi possível realizar o ensaio de compactação. A diferença que ocorreu entre as curvas de ARC e ARC-C pode ter sido devido ao fato da amostra de ARC-C poder apresentar um maior teor de argamassa em sua composição, e esse material possuir um peso específico menor. Isso pode ter ocorrido durante o processo de peneiramento da ARC-06 para produção da ARC-C, dado que pode ter havido uma remoção da argamassa aderida aos grãos de concreto. As curvas de compactação das amostras de ARC (01 a 06) e da amostra de ARC-C estão apresentadas na Figura 4.12.

Em relação à umidade ótima (w_{ot}) das amostras de ARC (01 a 06), observou-se que quanto maior o teor de material cerâmico/solo, maior o valor $w_{ótima}$ da amostra em análise. A amostra de ARC-06 apresentou o menor teor de material cerâmico/solo – observado visualmente – e por isso apresentou o menor valor de umidade ótima (16,40%). Essa hipótese quanto a composição dos agregados foi também observada nos trabalhos de Brito, Pereira e Correia (2005), Silva,

Brito e Dhir (2014), Cardoso *et al.* (2016), Fleury (2018) e Domiciano, Santos e Lins da Silva (2020). A Tabela 4.3 apresenta os valores de γ_d máx e w ótima dos RCD-R ensaiados.

Os resultados dos ensaios de compactação (com energia Proctor Normal e reuso) realizados na ARC e ARC-C podem ser verificados na Tabela 4.4. Observa-se que tais resultados se mostraram próximos ao de outros autores que realizaram ensaios de compactação em amostras de areias recicladas.

Figura 4.12 – Curvas de compactação das amostras de ARC (01 a 06) e ARC-C.

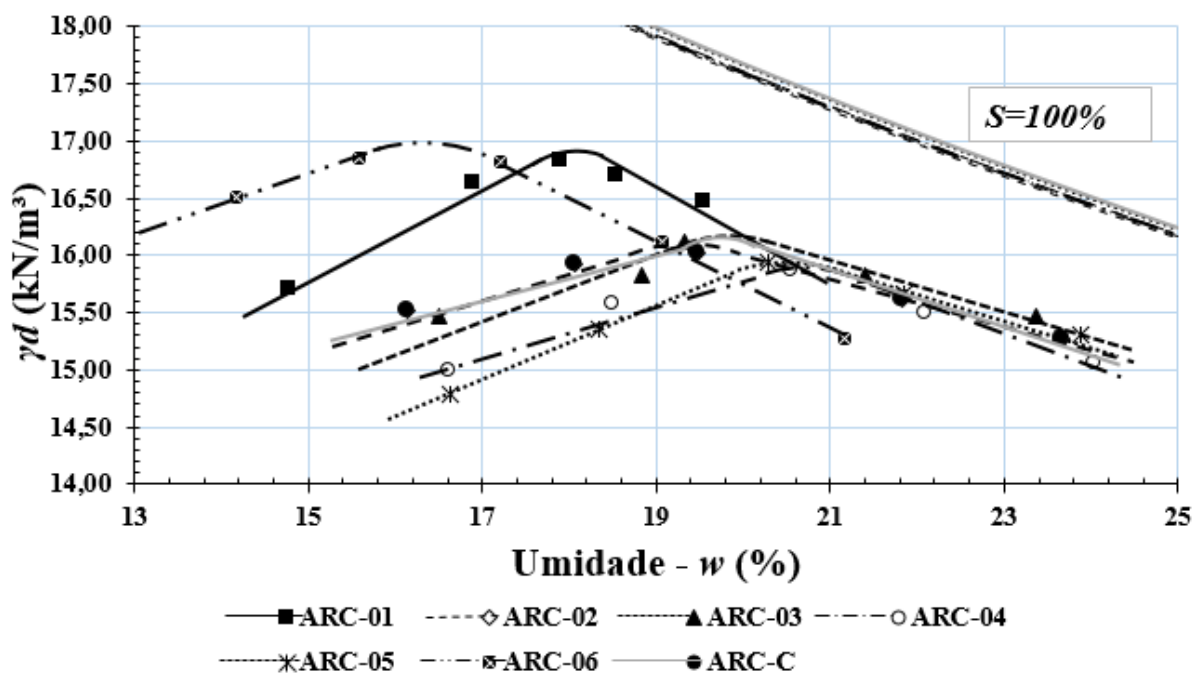


Tabela 4.3 – Peso específico seco máximo e umidade ótima dos RCD-R ensaiados.

Amostra	γ_d máx (kN/m ³)	w ótima (%)
ARC-01	16,85	18,00
ARC-02	16,05	19,40
ARC-03	16,15	21,00
ARC-04	15,91	21,00
ARC-05	16,00	21,10
ARC-06	16,90	16,40
Média	16,31	19,48
CV (%)	2,73	9,99
ARC-C	16,15	20,00

Tabela 4.4 – Resultado encontrados em ensaios de compactação em areias recicladas.

Material	w_{ot} (%)	γ_{d máx} (kN/m³)
ARC (01 a 06)	19,48 (CV = 9,99%)	16,31 (CV = 2,73%)
ARC-C	20,00	16,15
Referência		
Santos (2011)	13,70	19,30
Dias (2014)	18,00	17,60
Couto e Santos (2016)	12,50	20,21
Araújo Neto (2017)	15,50	17,61

4.1.5. Índice de vazios da AN, ARC e ARC-C

O ensaio de índice de vazios revelou que a ARC e a ARC-C apresentaram valores nos ensaios de índices de vazios máximos ($e_{máx}$) e mínimos ($e_{mín}$) próximos ao normalmente encontrados para areias uniformes de grãos angulares (valores de e de 0,70 a 1,10). Observou-se que a ARC-C apresentou curva granulométrica uniforme; por outro lado, todas as amostras de ARC revelaram curvas granulométricas bem graduadas. Vale ressaltar que, por serem obtidos da britagem de concreto e argamassa, é possível que os grãos desses materiais sejam mais angulares do que arredondados, conforme também foi verificado por Britto (2020).

Os resultados revelaram que a AN apresentou valores próximos ao usualmente encontrados para areias uniformes de grão arredondados (valores de e de 0,45 a 0,75) – como observado anteriormente a curva granulométrica da areia mostrou-se uniforme. Palmeira (1987), Santos (2007), Araújo Neto (2017), Kayadelen, Ökkeş Önal e Altay (2017) e Rodriguez (2018) utilizaram-se, em seus ensaios de arrancamento, areias cujos valores de $e_{máx}$ e $e_{mín}$ estariam nesse intervalo e receberiam a mesma classificação da AN. Os resultados obtidos nos ensaios de índices de vazios máximos e mínimos da AN, ARC e da ARC-C são apresentados nas Tabelas 4.5 e 4.6.

Para atingir grau de compactação de 90% (nos ensaios de cisalhamento direto e de arrancamento) os valores dos índices de vazios adotados para os ensaios na umidade higroscópica foram: i) AN = 0,61; ARC = 0,73 e ARC-C = 0,69.

Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de índices de vazios máximos da AN, ARC e ARC-C.

Material	Leitura	Massa específica real dos grãos- ρ (g/cm ³)	Índice de Vazios Máximo ($e_{máx}$)	Índice de Vazios Máximo médio ($e_{máx}$)
AN	1	1,455	0,86	0,87
	2	1,438	0,89	
	3	1,453	0,87	
ARC	1	1,325	1,05	1,06
	2	1,325	1,05	
	3	1,303	1,08	
ARC-C	1	1,375	0,99	0,98
	2	1,378	0,99	
	3	1,370	0,96	

Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios de índices de vazios mínimos da AN, ARC e ARC-C.

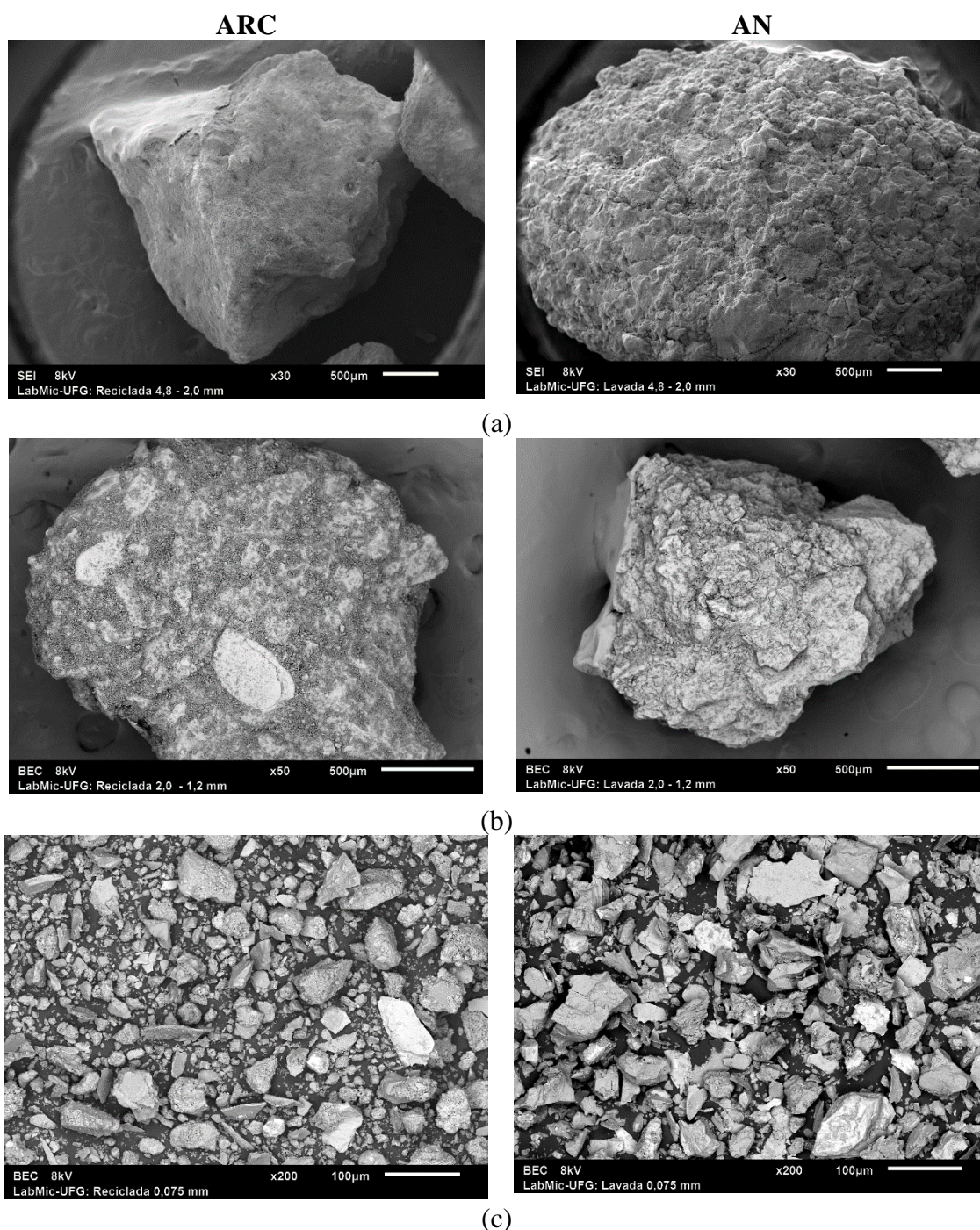
Material	Leitura	Massa específica real dos grãos- ρ (g/cm ³)	Índice de Vazios Mínimo ($e_{mín}$)	Índice de Vazios Mínimo médio ($e_{mín}$)
AN	1	1,725	0,57	0,58
	2	1,703	0,59	
	3	1,712	0,58	
ARC	1	1,606	0,69	0,69
	2	1,619	0,68	
	3	1,600	0,70	
ARC-C	1	1,630	0,67	0,64
	2	1,632	0,63	
	3	1,627	0,62	

4.1.6. Resultados de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e de Espectroscopia de raios x por dispersão em energia (EDS)

Realizou-se ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com as amostras de ARC-06 e AN, a fim de verificar o formato e a aparência da superfície dos materiais passantes em determinadas peneiras antes de serem submetidos aos ensaios de arrancamento. Foram analisados os mesmos três intervalos granulométricos para ambos os materiais – conforme apresentado no item 3.2.2. De forma geral, observou-se que ambos os materiais possuem grãos com o formato angular (FIGURA 4.13). Esse formato da ARC é devido à quebra do material durante o processo de beneficiamento na usina. Verificou-se que as partículas de ARC entre 4,8 mm e 2,0 mm é constatado o formato angular dos grãos; 2,0 mm e 1,2 mm apresentam superfícies rugosas e com cimentações; e nas passantes na peneira de 0,075 mm, observou-se

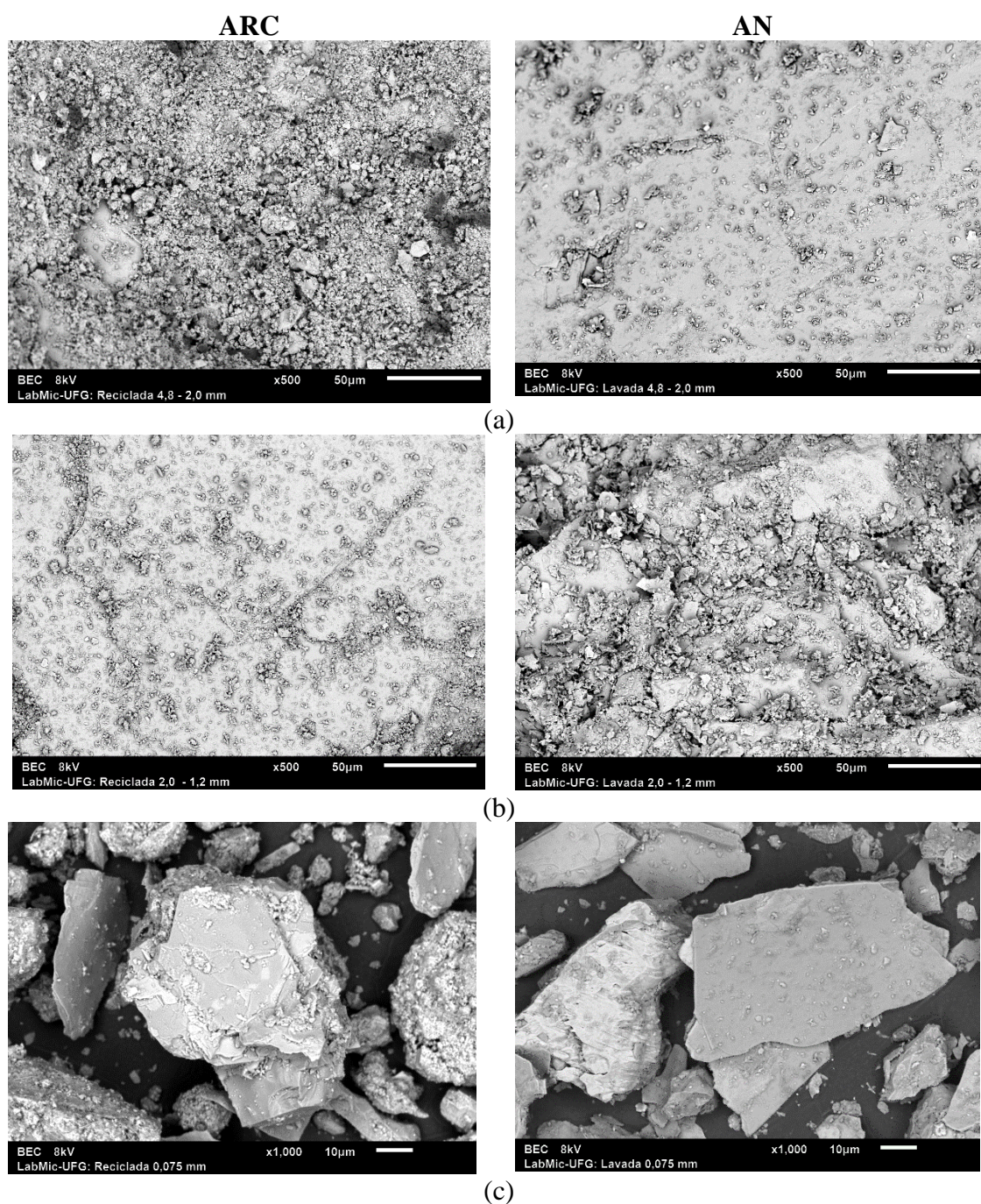
algumas partículas com o formato lamelar e a presença de muitos grãos com dimensões extremamente inferiores a 0,075mm. Para as partículas de AN entre 4,8 mm e 2,00 mm e entre 2,0 mm e 1,2 mm, observou-se superfícies rugosas; para grãos inferiores a 0,075 mm, verificou-se a existência de muitas partículas com o formato lamelar.

Figura 4.13 – Imagens de MEV das amostras de ARC e AN: a) grãos passantes na peneira de 4,8 mm e retidos na de 2,0 mm (aumento de 30x); b) grãos passantes na peneira de 2,0 mm e retidos na de 1,2 mm (aumento de 50x); e c) grãos passante na peneira de 0,075 mm (aumento de 200x).



Quando se observa a superfície desses materiais com aumento realizado pelo equipamento, evidencia-se que os grãos da ARC apresentaram superfícies marcadas por cimentações, sendo que isso pode ser verificado em todos os intervalos escolhidos para as análises. Verificou-se que essa característica ocorre nas superfícies das partículas de AN, porém em menor grau, pois, para algumas dimensões, essa característica não foi verificada (FIGURA 4.14).

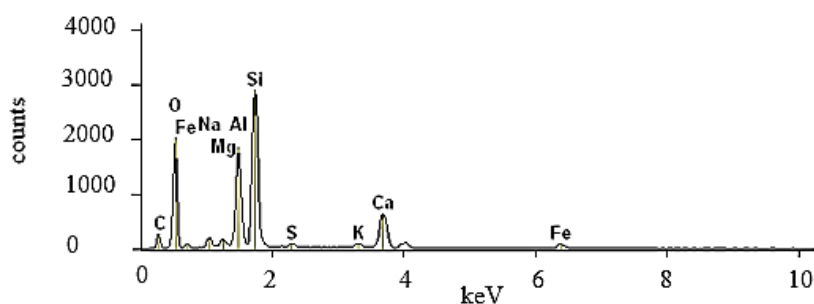
Figura 4.14 – Imagens de MEV nas amostras de ARC e AN: a) grãos passantes na peneira de 4,8 mm e retidos na peneira de 2,0 mm (aumento de 550x); b) grãos passantes na peneira de 2,0 mm e retidos de 1,2 mm (aumento de 550x); e c) grãos passantes na 0,075 mm (aumento de 1.000x).



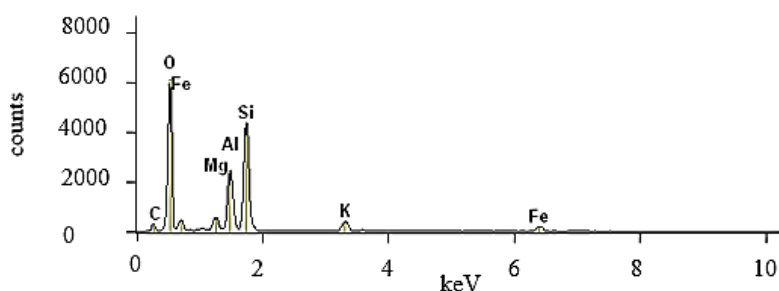
Os ensaios espectroscopia de raios x por dispersão em energia (EDS) para os mesmos intervalos granulométricos (4,8 mm – 2,0 mm; 2,0 mm – 1,2 mm; e $\leq 0,075$ mm) possibilitaram identificar a composição dos materiais presentes nas amostras de ARC e AN. Os resultados de EDS nas partículas de AN revelaram predomínio de silício (Si) e alumínio (Al), componentes da sílica (SiO_2) e quartzo, o que mostra-se coerente para com a composição mineralógica típica de areias naturais da região (FIGURA 4.15 (b), FIGURA 4.16 (b) e FIGURA 4.17 (b)).

Os ensaios de EDS realizados para as amostras de ARC identificaram a presença predominante de silício, (Si), alumínio (Al), cálcio (Ca), magnésio (Mg), Ferro (Fe) e potássio (K). A presença desses materiais indica a predominância de sílica (SiO_2), óxido de cálcio (CaO), alumina (Al_2O_3), óxido de ferroso (Fe_2O_3), óxido de potássio (K_2O) e magnésia (MgO). O fato de ARC ser originada a partir da britagem de materiais de concreto e argamassa justifica a presença de cálcio (FIGURA 4.15 (a), FIGURA 4.16 (a) e FIGURA 4.17 (a)), ocorrência também verificada por Oliveira, Dezen e Possan (2020) em resíduos de concreto e argamassa também submetidos a ensaios de EDS. Alguns componentes químicos presentes nas argilas são: óxido de sílica, alumina, óxido de cálcio, óxido de potássio, magnésio e óxido ferroso. Esses componentes foram relatados por Moura *et al.* (2018) em análises realizadas em telhas cerâmicas vermelhas e no cimento Portland.

Figura 4.15 – Resultados de EDS para as partículas passantes na peneira de 4,80 mm e retidas na peneira 2,00 mm: a) ARC e b) AN.

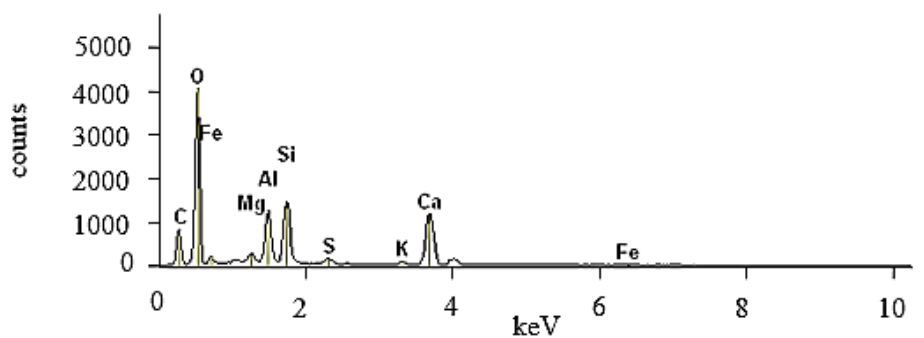


(a)

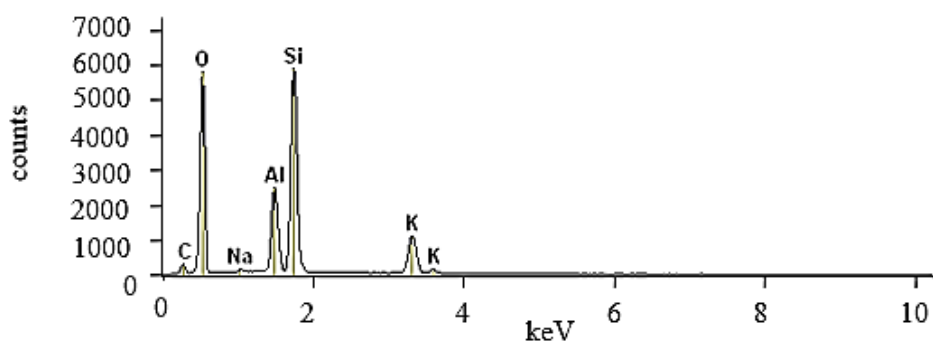


(b)

Figura 4.16 – Resultado de EDS para as partículas passantes na peneira de 2,00 mm e retidas na peneira 1,20 mm: a) ARC e b) AN.

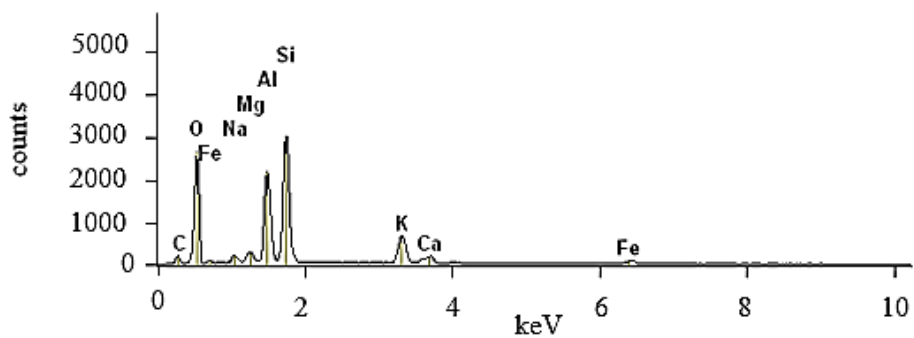


(a)

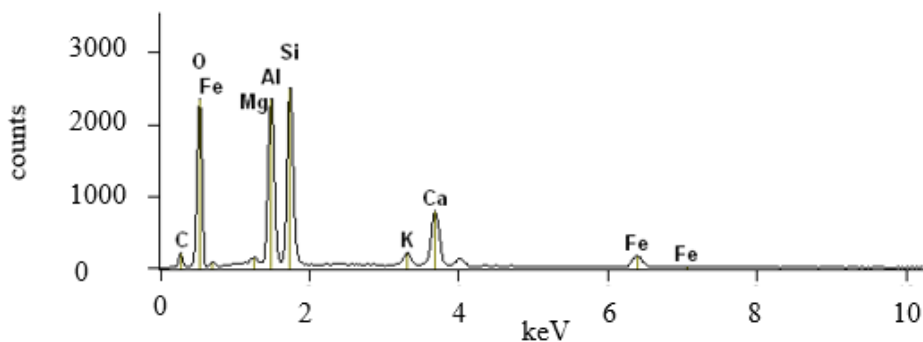


(b)

Figura 4.17 – Resultados de EDS para as partículas passantes na peneira de 0,075 mm: a) ARC e b) AN.



(a)

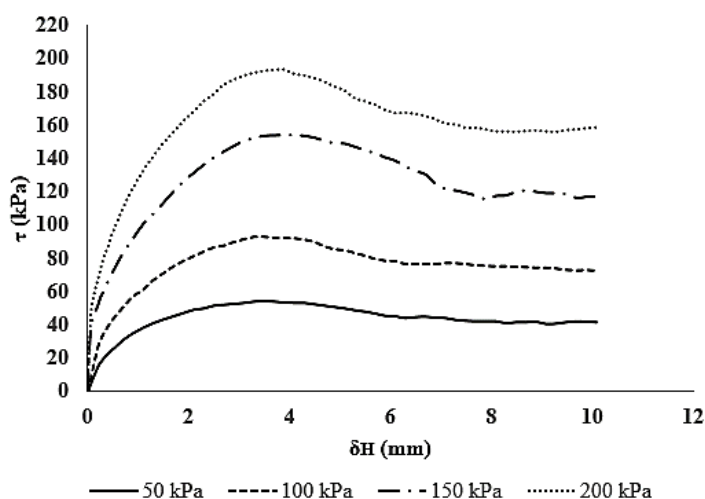


(b)

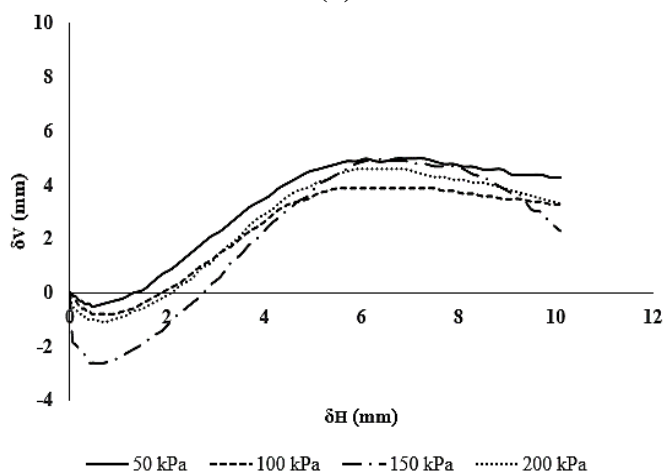
4.1.7. Cisalhamento Direto

Os ensaios de cisalhamento direto para as amostras revelaram a ocorrência de uma tensão de pico, seguida por uma tensão residual. Foi verificada, inicialmente, uma redução de volume dos corpos de prova para as quatro tensões aplicadas; e, logo após, uma dilatação (aumento de volume) antes da resistência de pico. Isso revelou um comportamento típico de areias compactas. As curvas (tensão versus. deslocamento e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal) obtidas no ensaio de cisalhamento direto para as amostras de areias (ensaiada na umidade higroscópica e na umidade ótima) são apresentadas na Figura 4.18 a 4.22 – (sendo que: ARC-06 = sexta amostra da areia reciclada cinza; ARC-C-06 = sexta amostra da areia reciclada cinza construída; S = umidade higroscópica e U = umidade ótima).

Figura 4.18 – Resultado do ensaio de cisalhamento direto da ARC-06-S: a) curvas tensão versus deslocamento horizontal; e b) curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal.

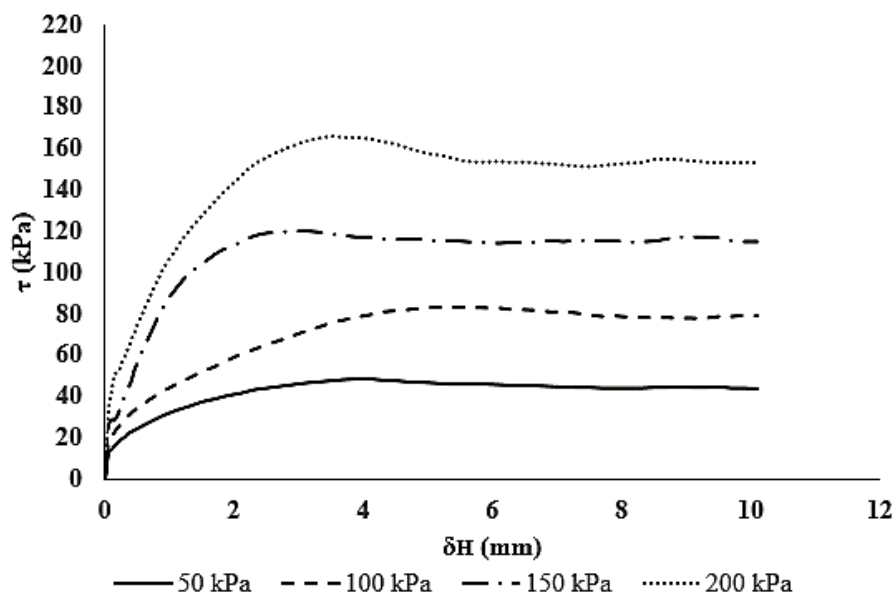


(a)

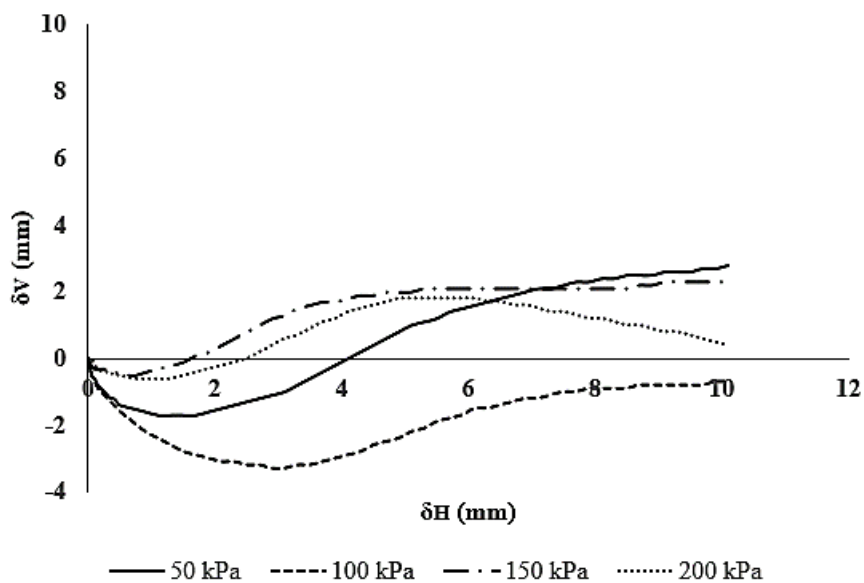


(b)

Figura 4.19 – Resultado do ensaio de cisalhamento direto da ARC-06-U: a) curvas tensão versus deslocamento horizontal; e b) curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal.



(a)



(b)

Figura 4.20 – Resultado do ensaio de cisalhamento direto da ARC-C-06-S: a) curvas tensão versus deslocamento horizontal; e b) curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal.

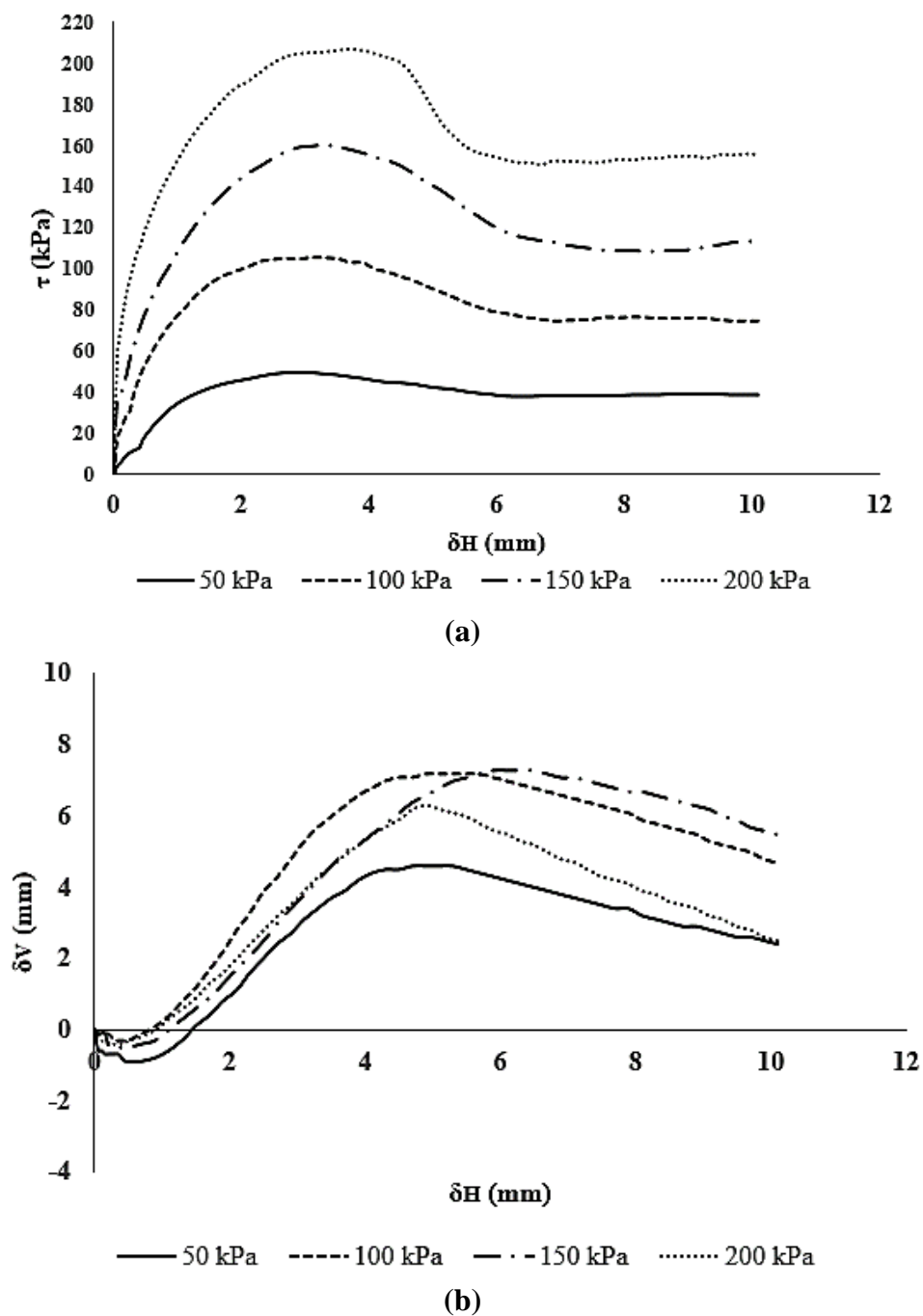
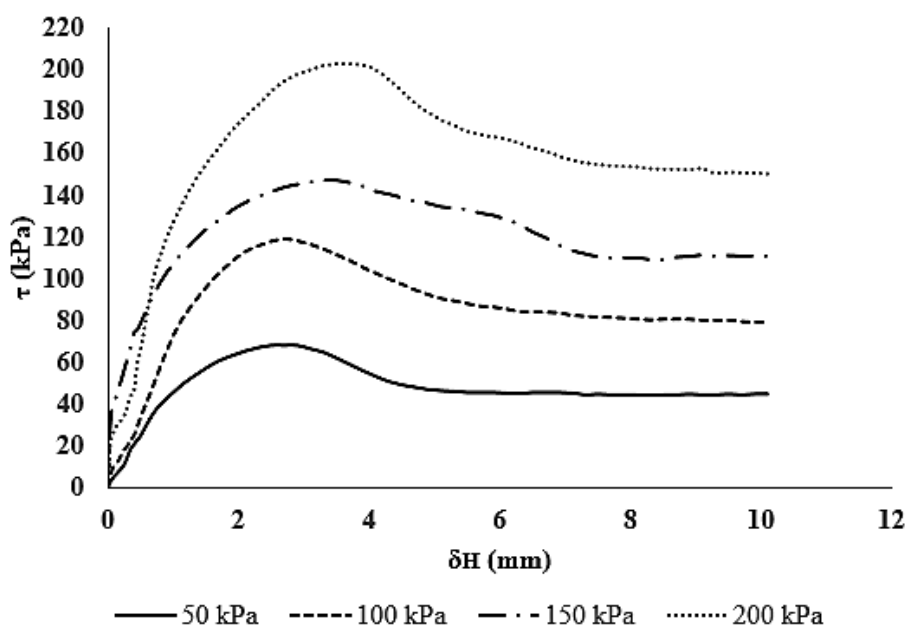
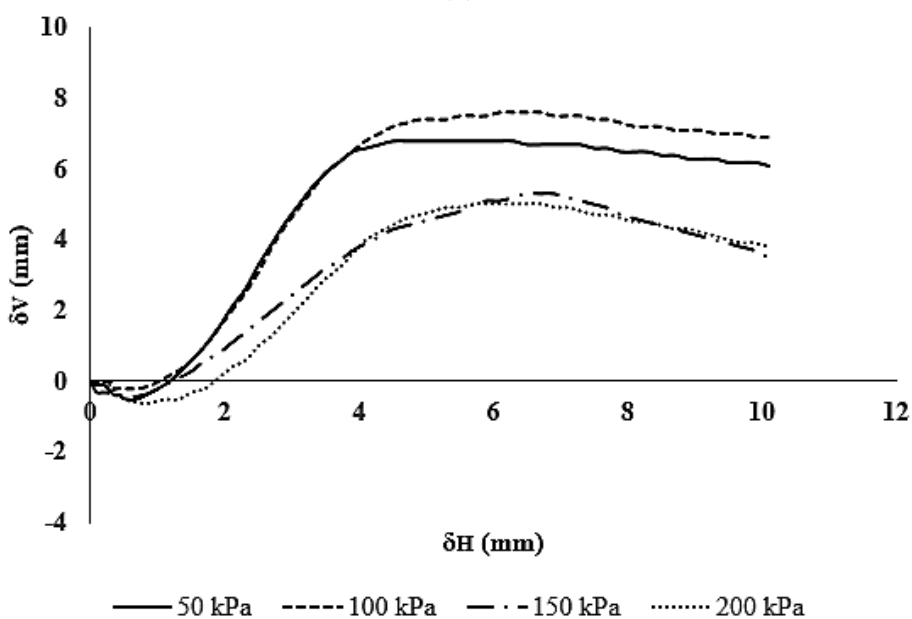


Figura 4.21 – Resultado do ensaio de cisalhamento direto da ARC-C-06-U: a) curvas tensão versus deslocamento horizontal; e b) curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal.

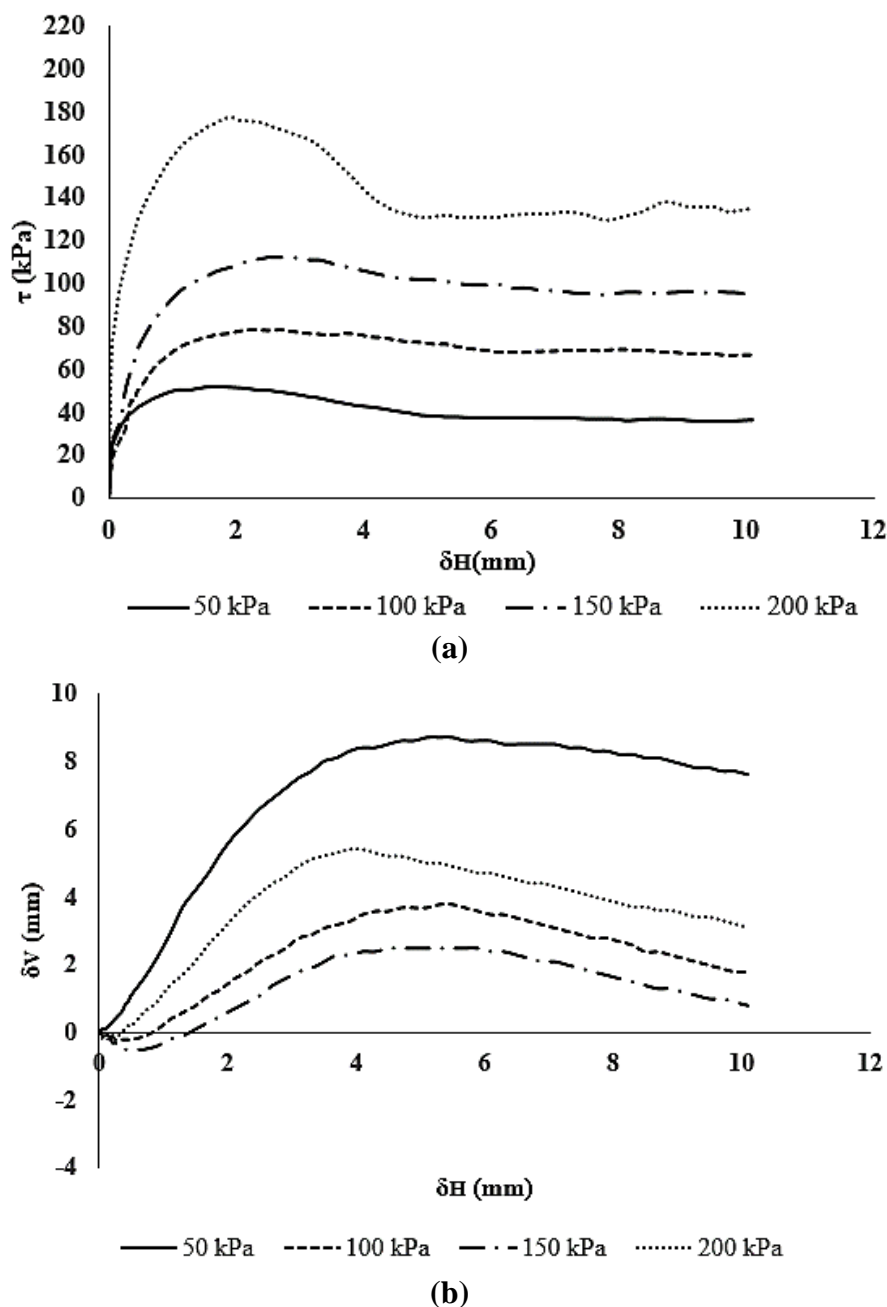


(a)



(b)

Figura 4.22 – Resultado do ensaio de cisalhamento direto da AN-S: a) curvas tensão versus deslocamento horizontal; e b) curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal.

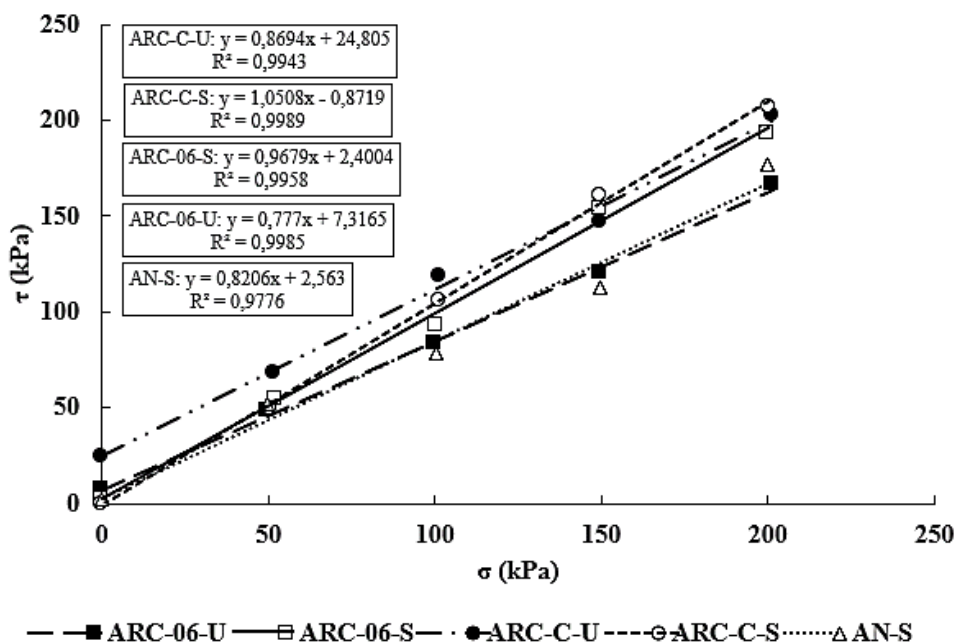


Verificou-se que as areias recicladas apresentaram valores superiores de ângulo de atrito (ϕ) em relação à AN, exceto a ARC-06-U (porém com valor semelhante à AN). Observou-se também que as areias apresentaram maiores valores de ϕ no estado seco em relação ao estado úmido. Por outro lado, os resíduos na condição úmida (umidade ótima) apresentam maiores valores de intercepto de coesão (c) em relação aos seus estados secos, com uma grande diferença sendo observada para a ARC-C, demonstrando a necessidade de analisar mais amostras de resíduos em ambas as condições (seca e úmida). As envoltórias de todos os

materiais são apresentadas na Figura 4.23 e os valores de intercepto de coesão e ângulo de atrito de todos os materiais são apresentados na Tabela 4.7.

Os resultados de ângulo de atrito mostraram-se próximos aos encontrados por outros autores que utilizaram areias recicladas (SANTOS e VILAR, 2008; ARULRAJAH *et al.*, 2013; VIEIRA e PEREIRA, 2016; ARAÚJO NETO, 2017; e BRITTO, 2020). Em relação à coesão encontrada pelos autores citados, observou-se uma grande variabilidade, demonstrando a maior influência dos materiais componentes das amostras nesse parâmetro. Vale ressaltar que os resultados encontrados para os resíduos revelaram que os materiais apresentam um bom comportamento mecânico, semelhante ao de materiais naturais, o que viabilizaria a sua utilização em obras geotécnicas.

Figura 4.23 – Envoltória de resistência dos materiais.



Nota: S = seca (umidade higroscópica); e U = úmida (umidade ótima).

Tabela 4.7 – Dados das envoltórias de resistência dos ensaios de cisalhamento direto.

Material	c (kPa)	ϕ (°)
ARC-06-U	7,32	37,85
ARC-06-S	2,40	44,07
ARC-C-U	24,81	41,00
ARC-C-S	0,00	46,42
AN-S	2,56	39,37

Onde: c = coesão; ϕ = ângulo de atrito;

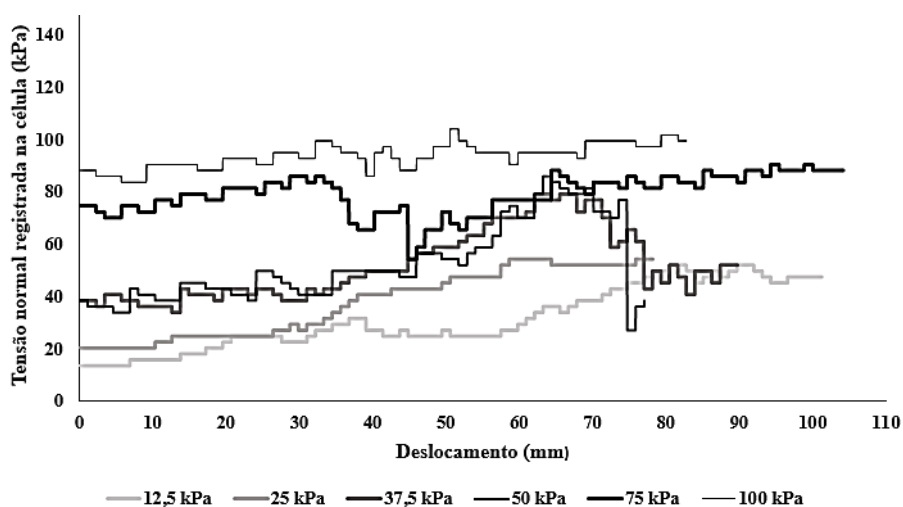
4.2. ENSAIOS DE ARRANCAMENTO

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios de arrancamento para as areias recicladas e a areia natural com utilização de equipamento de pequeno porte.

4.2.1. Valores das tensões normais obtidas através da célula de tensão total

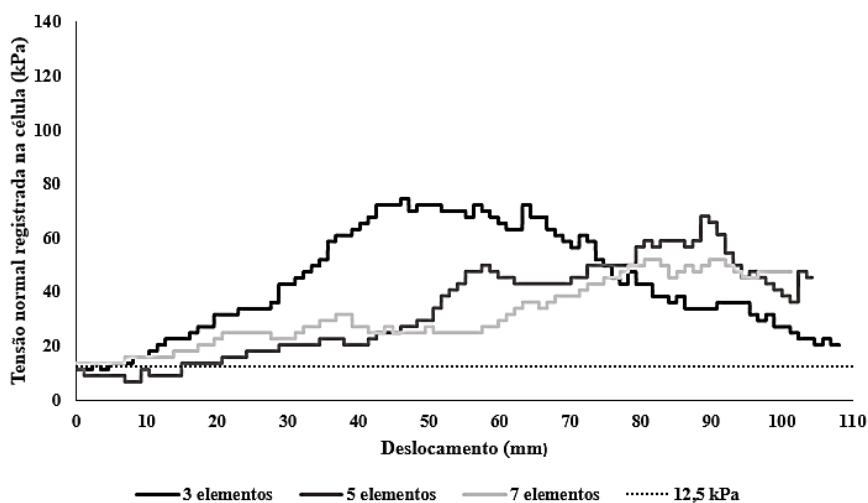
Os resultados obtidos pela célula de tensão total (CTT), referentes aos testes realizados com a ARC, quando ensaiadas na umidade ótima, utilizando geogrelha com largura de 200 mm e variando a sobrecarga, são apresentados na Figura 4.24. Observou-se que, em todos os ensaios, realizados houve oscilação dos valores das tensões normais. Esse mesmo comportamento foi também verificado para os demais ensaios realizados, conforme pode ser verificado no Apêndice C. Verificou-se que os maiores valores de oscilação ocorreram para as menores sobrecargas aplicadas.

Figura 4.24 – Leituras de tensão normal obtidas com a utilização da CTT para os ensaios com ARC-200-U.



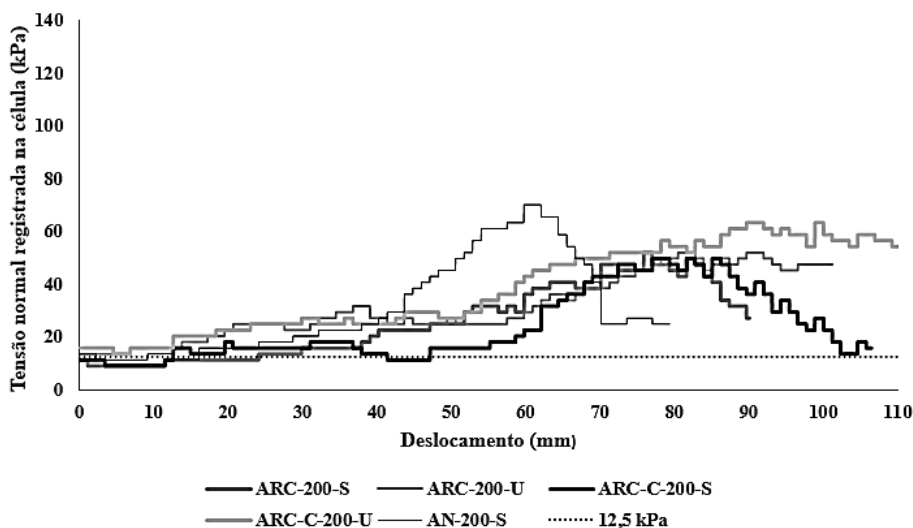
De uma forma geral, houve variação nos resultados obtidos na CTT para todas as variações de largura da geogrelha. Os resultados, quando ensaiados com a mesma tensão normal de 12,5 kPa, demonstram que a amostra com 90 mm (três elementos longitudinais) foi a que apresentou maior valor de obtido pela CTT e que os valores de variação diminuíram com o aumento da largura do corpo de prova (ver Figura 4.25). Além disso, foi observado que para a largura de geogrelha menor o deslocamento desenvolvido durante o ensaio de arrancamento foi menor quando comparado as demais.

Figura 4.25 – Leituras de tensão normal obtidas com a utilização da célula de tensão total para os ensaios com variação de largura da geogrelha para a ARC-200-U.



Os resultados obtidos pela CTT quando se variou apenas os materiais utilizados para preencher a caixa, para uma sobrecarga de 12,5 kPa podem ser verificados na Figura 4.26. Observou-se, para esse caso, que a AN apresentou um valor maior de variação (diferença do valor inicial e máximo durante o ensaio) com um deslocamento menor que os apresentados pelas areias recicladas. Esse fato deve ser uma característica devido a rigidez do material, pois, notou-se dos ensaios de cisalhamento direto que a AN apresentou valores máximos de tensão cisalhante para menores valores de deslocamento horizontal; enquanto, nas areias recicladas o deslocamento observado para a tensão máxima cisalhante foram aproximadamente o dobro do valor obtido para AN.

Figura 4.26 – Leituras de tensão normal obtidas com a utilização da célula de tensão total para diferentes tipos de areias na sobrecarga de 12,5 kPa.



Analisando as figuras apresentadas anteriormente, verifica-se que de forma geral os valores obtidos para os ensaios foram quase sempre superiores aos valores nominais das sobrecargas aplicadas. Ao variar a largura dos corpos de prova, observou-se que aqueles que continham mais elementos longitudinais apresentam variação menor. Ao variar as areias de preenchimento, observou-se que a AN foi a que apresentou maior variação e que para a condição de umidade (seca ou úmida) não afetou os valores e comportamento das curvas obtidas pela CTT.

O incremento de tensões no solo durante o processo de arrancamento de geogrelhas, decorrente da movimentação dos elementos transversais, foi observado por vários autores (DYER, 1985; PALMEIRA, 1987; PALMEIRA; MILLIGAN, 1989; PALMEIRA, 2004). Utilizando uma caixa de arrancamento de pequenas dimensões, Kakuda (2005) encontrou oscilação registrada pela CTT com valores superiores a 2,5 vezes quando ensaiando uma areia ($D_{50} = 0,16$ mm) com sobrecarga de 25 kPa.

4.2.2. Análise das Curvas Força versus Deslocamento para diversos valores de tensões normais

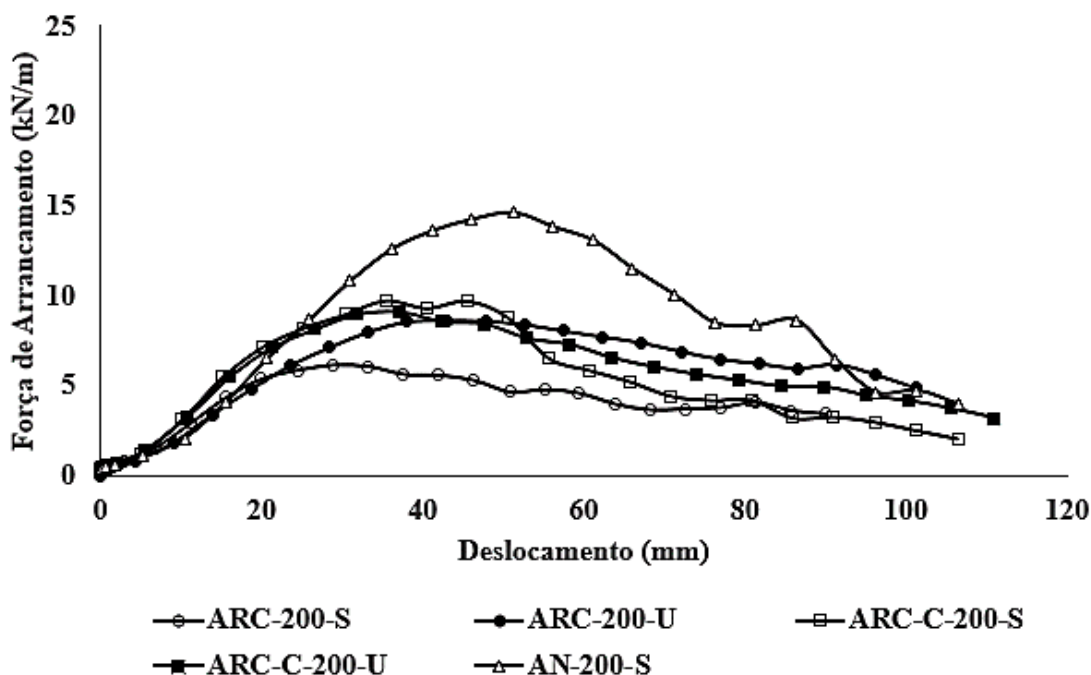
Inicialmente são apresentados os resultados dos ensaios realizados para todos os materiais em suas respectivas umidades (higroscópica e ótima) para as diferentes sobrecargas aplicadas. Todos os resultados apresentados a seguir foram realizados com corpos de prova de geogrelha com 200 mm de largura.

4.2.2.1. Ensaios com tensão normal de 12,5 kPa

Todos os materiais ensaiados – com diferentes valores de umidade e mesmo grau de compactação de 90% – com a aplicação de uma sobrecarga de 12,5 kPa promoveram o arrancamento da geogrelha. Observou-se que os RCD-R apresentaram um comportamento semelhante, indicando que houve rompimento do material de preenchimento. Verificou-se uma mobilização maior dos elementos transversais mais próximos ao ponto de aplicação do esforço, comportamento característico de materiais com baixa rigidez. Todos os materiais (FIGURA 4.27) apresentaram curvas com comportamento típico, em que durante o deslocamento a força aplicada aumenta seu valor até atingir um valor de pico; seguido de uma diminuição do valor da força de arrancamento.

A AN apresentou o maior valor de resistência ao arrancamento em relação aos materiais reciclados (FIGURA 4.27). Foi observado que os elementos das geogrelhas enterradas na AN danificaram-se mais durante a realização dos ensaios de arrancamento do que os enterrados nas areias recicladas. No ensaio com a AN, houve uma movimentação lateral dos elementos longitudinais externos da amostra de geogrelha e também alguns danos nos elementos transversais (em alguns pontos esses se desprenderam completamente dos longitudinais). As geogrelhas arrancadas nos ensaios com as areias recicladas apresentaram poucos danos aos elementos transversais, esses apresentaram pequenas deformações quando solicitados (FIGURA 4.28). Observou-se, assim, que nos ensaios com AN ocorreu o desprendimento dos elementos do material polimérico, embora tenha ocorrido uma pequena movimentação de solo junto a abertura frontal.

Figura 4.27 – Ensaio de arrancamento (sobrecarga de 12,5 kPa).



Legenda:

ARC = areia reciclada cinza; ARC-C = areia reciclada cinza construída; AN = areia natural

200 = largura de duzentos milímetros da amostra de geogrelha; U = umidade ótima; S = umidade higroscópica

Figura 4.28 – Exumação das geogrelhas empregadas no ensaio de arrancamento (sobrecarga de 12,5 kPa): a) AN e b) ARC-C-200-S.



(a)



(b)

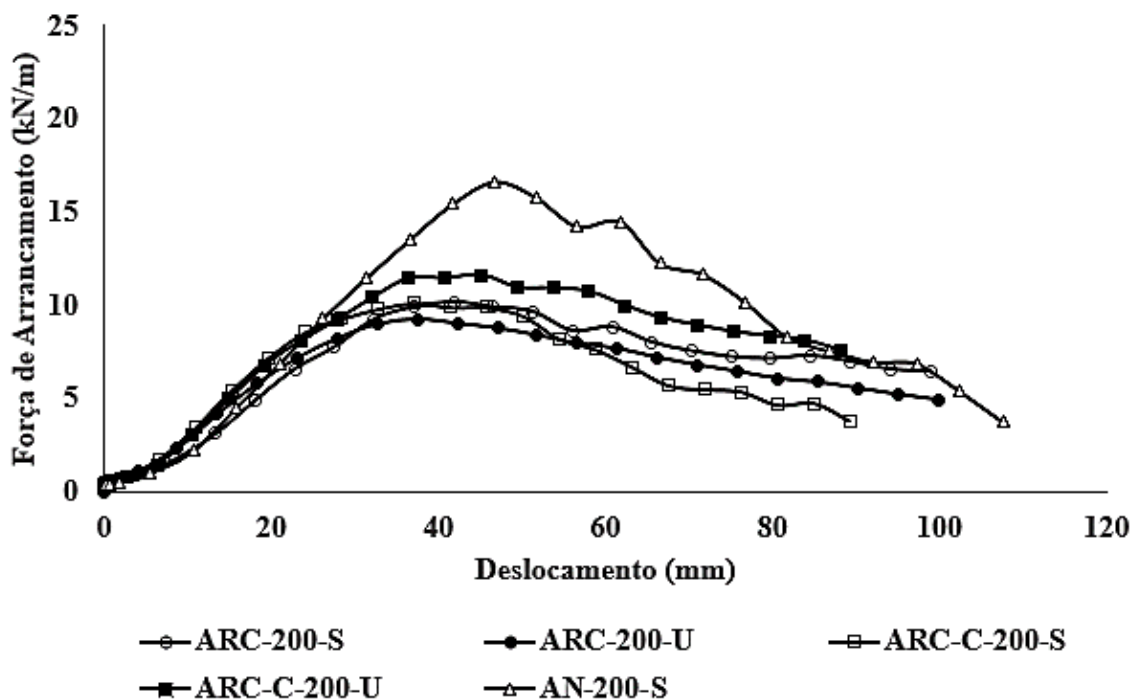
4.2.2.2. Ensaios com tensão normal de 25 kPa

Todos os materiais ensaiados – com diferentes valores de umidade – com a aplicação de uma sobrecarga de 25 kPa promoveram o arrancamento da geogrelha. Nesses ensaios, observou-se também que há um valor máximo da força de arrancamento. Analisando a Figura 4.29 (ensaios com sobrecarga de 25 kPa), é possível observar comportamentos semelhantes aos apresentados com o valor de sobrecarga de 12,5 kPa.

Como na análise anterior, foi observada a ruptura de elementos transversais nos ensaios com AN, embora tenha ocorrido uma pequena movimentação de solo junto abertura frontal. Não houve ruptura de elementos transversais durante os ensaios com as areias recicladas. A análise da Figura 4.29 permite observar os valores de resistência ao arrancamento para as areias recicladas mais próximos ao da AN, em relação aos ensaios com sobrecarga de 12,5 kPa. Esse fato ressalta que as geogrelhas foram mais solicitadas para essa sobrecarga durante seu arrancamento, mesmo não sendo tão danificadas pelos resíduos (FIGURA 4.30).

O segundo patamar após o pico de ruptura na curva da AN, deve ao fato de que após o período que de fato a geogrelha está sendo arrancada ocorre um aumento da tensão na parede frontal provocado pelo solo, e este passa a funcionar como uma espécie de “garra” que começa a deformar os elementos envolvidos pela AN – que já se encontram danificados. A Figura 4.31 apresenta esses detalhes do ensaio de arrancamento da AN com sobrecarga de 25 kPa.

Figura 4.29 – Ensaio de arrancamento (sobrecarga de 25 kPa).



Legenda:

ARC = areia reciclada cinza; ARC-C = areia reciclada cinza construída; AN = areia natural

200 = largura de duzentos milímetros da amostra de geogrelha; U = umidade ótima; S = umidade higroscópica

Figura 4.30 – Exumação da geogrelha empregada no ensaio de arrancamento com ARC-C-200-S (sobrecarga de 25 kPa).



Figura 4.31 – Exumação da geogrelha empregada no ensaio de arrancamento com a AN (sobrecarga de 25 kPa):
a) geogrelha envolvida pelo material granular e b) geogrelha após término do ensaio.



(a)



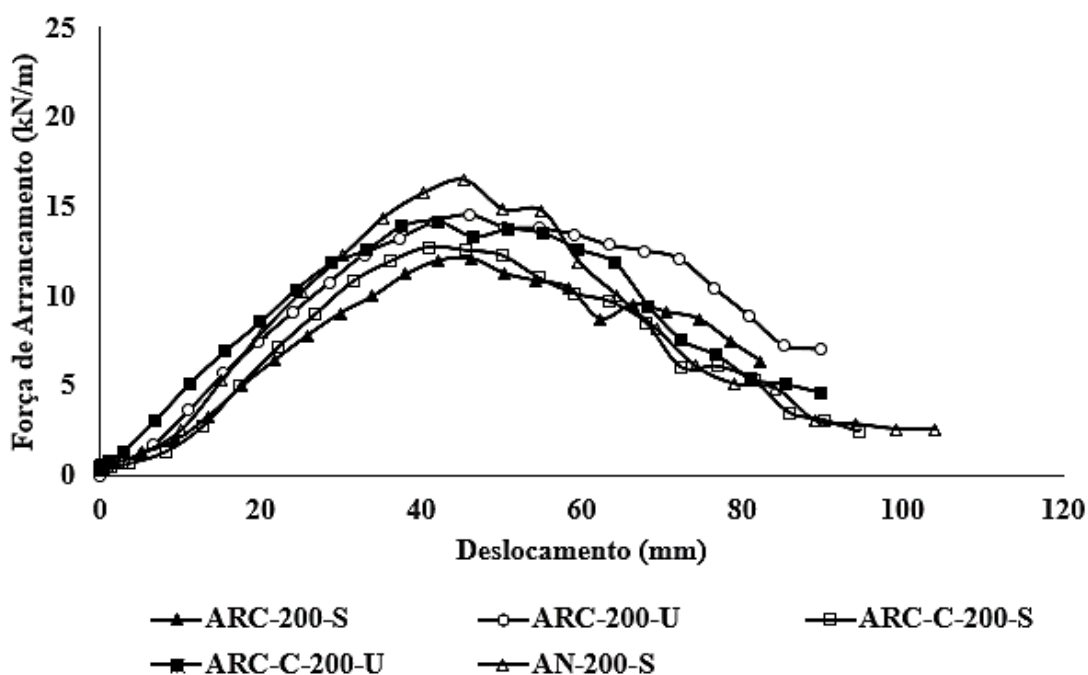
(b)

4.2.2.3. Ensaios com tensão normal de 37,5 kPa

Os resultados dos ensaios de arrancamento realizados com a sobrecarga de 37,5 kPa e areias recicladas revelaram diminuição do deslocamento da geogrelha quando comparados aos obtidos para as sobrecargas analisadas anteriormente (12,5 kPa e 25 kPa). Observou-se que as curvas de todos os materiais ensaiados estão próximas e apresentam um formato menos abatido que os anteriores (FIGURA 4.32). Isso pode ser devido ao aumento das deformações da geogrelha na porção mais próxima da abertura da caixa. Nos ensaios com areia recicladas foi verificado uma pequena movimentação de solo para fora da caixa junto à abertura da parede frontal, e, também o desprendimento dos elementos transversais da geogrelha na porção interna da caixa.

A Figura 4.33 apresenta imagens das geogrelhas após ensaiadas na AN e ARC-C-S (cenário escolhido para representar as areias recicladas). Verificou-se que a AN apresentou os elementos da geogrelha bem danificados, indicando um aumento da tensão sobre os elementos próximos a abertura da parede frontal, local onde foram verificadas as maiores deformações da geogrelha. Foi observado também o desprendimento dos elementos da geogrelha.

Figura 4.32 – Ensaio de arrancamento (sobrecarga de 37,5 kPa).

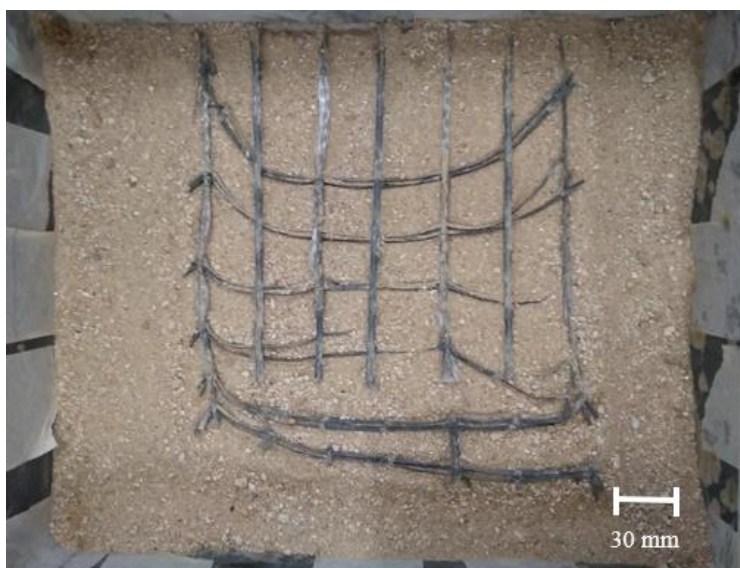


Legenda:

ARC = areia reciclada cinza; ARC-C = areia reciclada cinza construída; AN = areia natural

200 = largura de duzentos milímetros da amostra de geogrelha; U = umidade ótima; S = umidade higroscópica

Figura 4.33 – Exumação das geogrelhas empregadas no ensaio de arrancamento (sobrecarga de 37,5 kPa): a) AN e b) ARC-200-S.



(a)



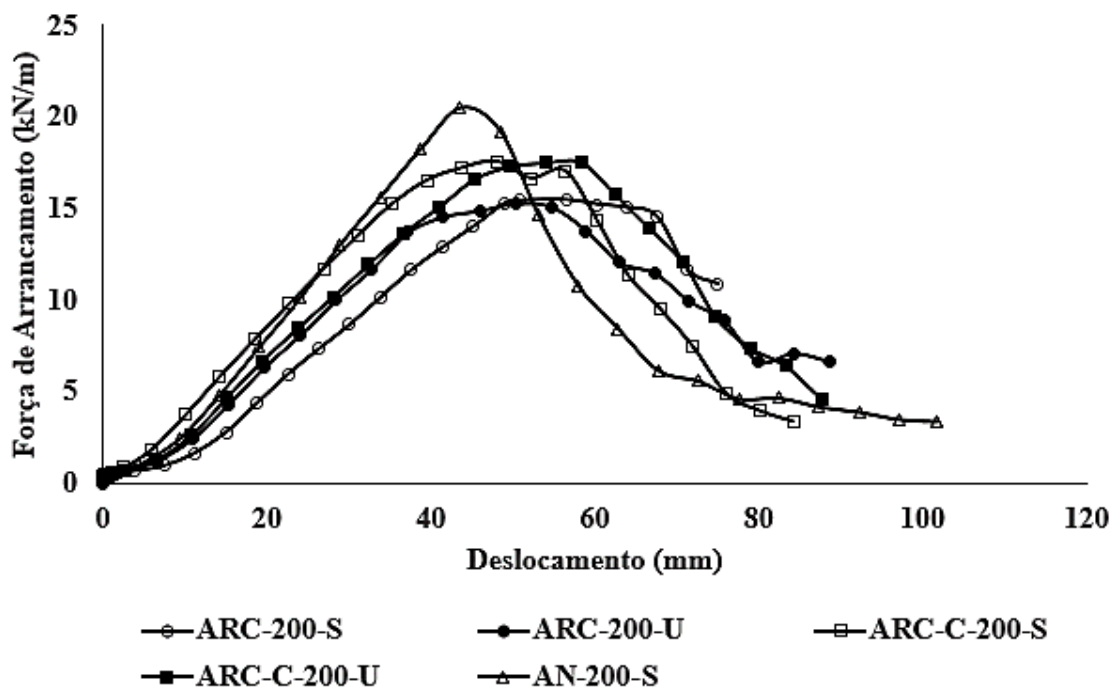
(b)

4.2.2.4. Ensaios com tensão normal de 50 kPa

Com os resultados dos ensaios realizados com a sobrecarga de 50 kPa, verificou-se que as curvas dos materiais estão mais inclinadas quando comparadas às curvas dos ensaios com valores de sobrecarga menores (12,5 kPa, 25 kPa e 37,5 kPa) (FIGURA 4.34). Nos ensaios realizados com areias recicladas, foi verificado uma pequena mobilização da porção enterrada do corpo de prova e, após isso, os elementos da grelha apenas apresentaram deformação na porção externa da caixa. Assim, ruptura ocorreu por tração isolada.

Pela a AN observou-se a mobilização de poucos pontos da porção enterrada do corpo de prova, com a maioria dos elementos tendo permanecido intactos. Nesse valor de sobrecarga, verificou-se que as deformações e rupturas ocorreram principalmente nos elementos próximos a abertura da caixa de ensaio e fora da caixa.

Figura 4.34 – Ensaio de arrancamento (sobrecarga de 50 kPa).



Legenda:

ARC = areia reciclada cinza; ARC-C = areia reciclada cinza construída; AN = areia natural

200 = largura de duzentos milímetros da amostra de geogrelha; U = unidade ótima; S = umidade higroscópica

As imagens das exumações das geogrelhas empregadas nos ensaios com a AN, ARC-C-200-U e ARC-200-S são apresentadas na Figura 4.35.

Figura 4.35 – Exumação das geogrelhas empregadas no ensaio de arrancamento (sobrecarga de 50 kPa): a) AN, b) ARC-C-200-U e c) ARC-200-S.



(a)



(b)

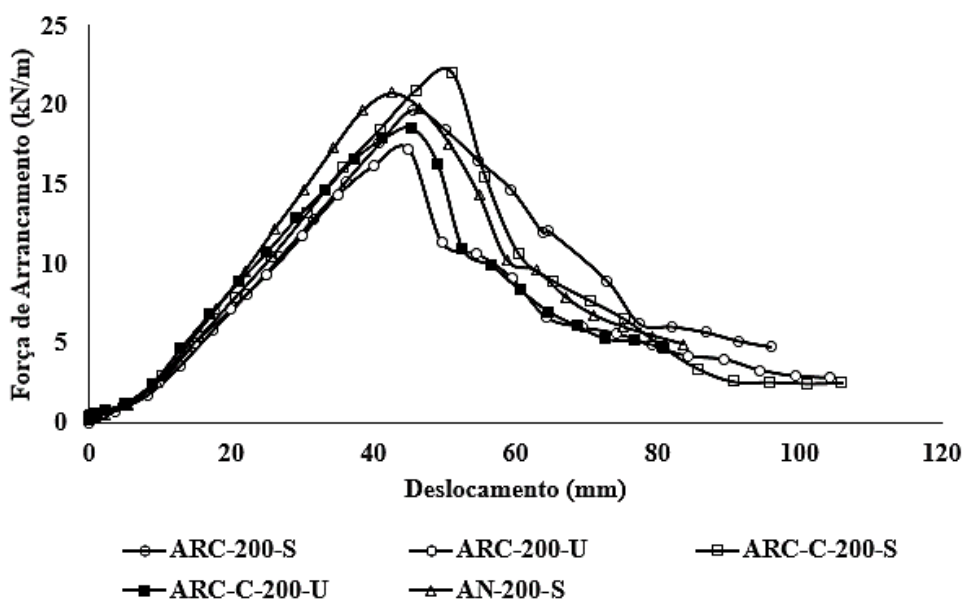


(c)

4.2.2.5. Ensaios com tensões normais de 75 kPa e 100 kPa

Observou-se um comportamento semelhante aos ensaios realizados aplicando-se sobrecarga de 50 kPa, em que o corpo de prova, durante a realização dos testes, sofreu uma maior deformação e ruptura nos pontos mais próximos da abertura da caixa e na porção externa. Nos ensaios com sobrecarga de 75 kPa e 100 kPa praticamente não houve mobilização dos corpos de prova nas suas porções enterradas. Assim, verificou-se que não existiu arrancamento das geogrelhas para todos os tipos de materiais e em todas as configurações de ensaio. Os resultados dos ensaios aplicando-se a sobrecarga de 75 kPa são apresentados nas Figuras 4.36, enquanto as imagens das exumações são apresentadas na Figura 4.37. Os resultados dos ensaios aplicando-se a sobrecarga de 100 kPa são apresentados nas Figuras 4.38.

Figura 4.36 – Ensaio de arrancamento (sobrecarga de 75 kPa).



Legenda:

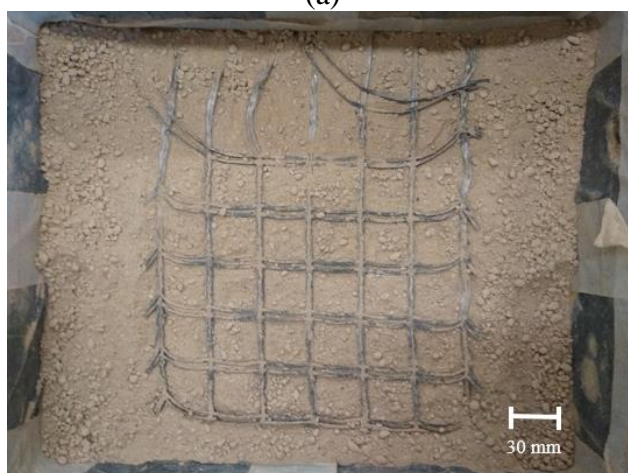
ARC = areia reciclada cinza; ARC-C = areia reciclada cinza construída; AN = areia natural

200 = largura de duzentos milímetros da amostra de geogrelha; U = umidade ótima; S = umidade higroscópica

Figura 4.37 – Exumação da geogrelha submetida ao ensaio de arrancamento com uma sobrecarga de 75 kPa para a) AN, e b) ARC-C-200-U.

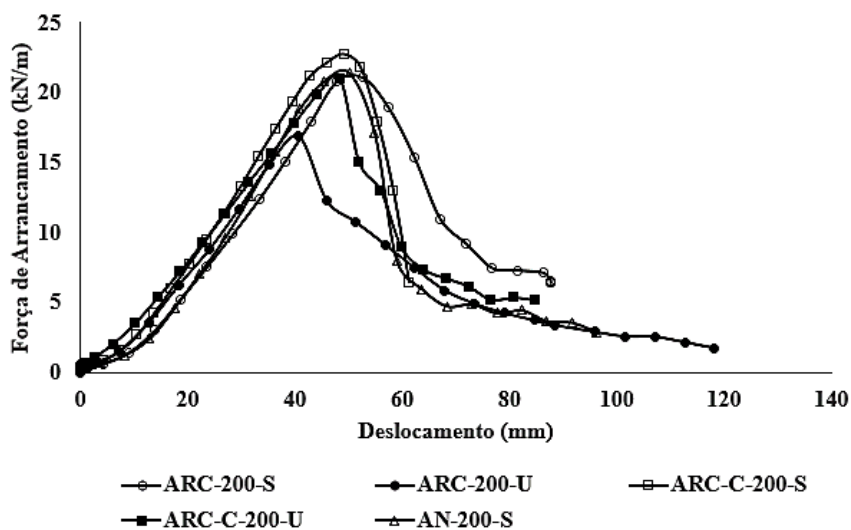


(a)



(b)

Figura 4.38 – Ensaio de arrancamento (sobrecarga de 100 kPa).



Legenda:

ARC = areia reciclada cinza; ARC-C = areia reciclada cinza construída; AN = areia natural
 200 = largura de duzentos milímetros da amostra de geogrelha; U = umidade ótima; S = umidade higroscópica

4.2.3. Efeito da sobrecarga na resistência ao arrancamento

Nos itens anteriores foram apresentadas as curvas de tensão de arrancamento versus deslocamento de todos os ensaios realizados com geogrelha de 200 mm de largura. As curvas forneceram informações qualitativas importantes em relação ao comportamento da inclusão durante o arrancamento, como, por exemplo, observou-se uma distinção de comportamentos entre as areia recicladas em relação à AN. Foi verificado que, o aumento do valor de sobrecarga, além de aumentar o valor da força de arrancamento de ruptura, provoca aumento da rigidez do sistema solo-geogrelha (observou-se um deslocamento para a esquerda das curvas de tensão de arrancamento versus deslocamento), essa fato foi constatado anteriormente em outros trabalhos (ALFARO; MIURA; BERGADO, 1995; OCHIAI *et al.*, 1996; e KAKUDA, 2005).

Nas Figura 4.39 e Tabela 4.8 são apresentadas as envoltórias de resistência da interface solo-inclusão e os valores máximos da força de arrancamento, respectivamente, para todos os ensaios executados utilizando-se geogrelhas de 200 mm de largura. Observou-se que os pontos de maior resistência ao arrancamento aumentam com o incremento da sobrecarga aplicada naqueles cenários onde ocorreu o arrancamento da geogrelha; e depois estabiliza-se, para as maiores sobrecargas (cenários em que a geogrelha não foi arrancada).

Figura 4.39 – Envoltória de resistência de interface solo-geogrelha.

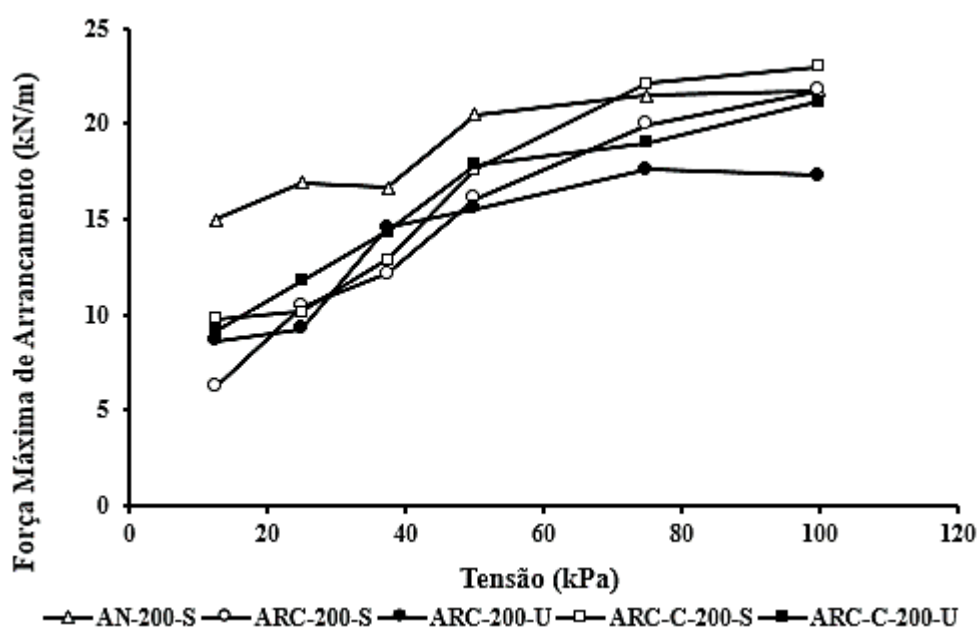


Tabela 4.8 – Resumo dos resultados dos ensaios de arrancamento.

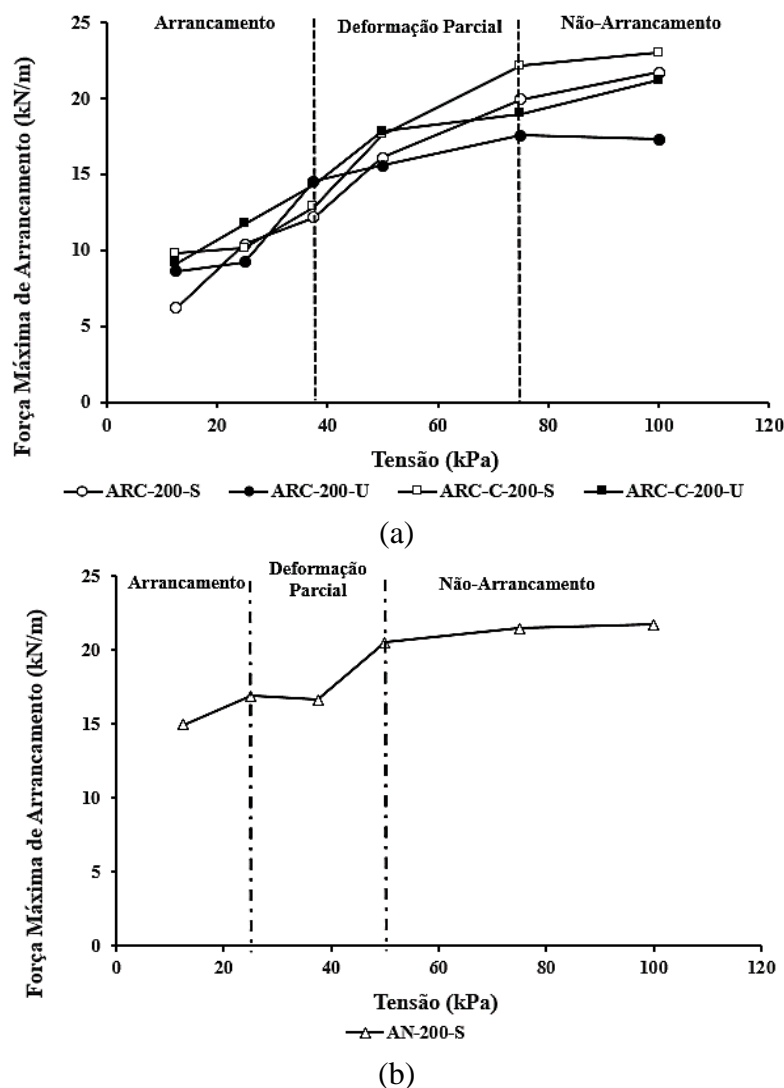
Tensão (kPa)	Materiais				
	ARC-200-S	ARC-200-U	ARC-C-200-S	ARC-C-200-U	AN-200-S
	Força Máxima de Arrancamento (kN/m)				
12,5	6,22	8,64	9,79	9,16	14,97
25	10,41	9,27	10,13	11,76	16,91
37,5	12,16	14,56	12,86	14,34	16,63
50	16,10	15,57	17,60	17,83	20,50
75	19,95	17,57	22,12	18,98	21,45
100	21,72	17,30	23,00	21,17	21,75

De forma geral, a AN apresentou os maiores valores de força de arrancamento máximo. Observando os valores máximos de força de arrancamento obtidos para a tensão de 12,5 kPa, verifica-se que: i) AN apresentou um valor 58,45% superior ao da ARC-200-S; ii) ARC-C-200-S foi 36,47% superior ARC-200-S; e iii) AN foi 34,60% superior a ARC-C-200-S.

Os valores de força de ruptura obtidos para todos os materiais apresentaram-se abaixo do valor de referência nominal divulgada pelo fabricante, isso deve-se ao fato dos elementos transversais da geogrelha terem sofrido alguns danos durante os testes, pois foi observado que para as tensões mais elevadas o sistema de confinamento do material funcionou como uma garra do tipo mordente. Esse fato gerou uma concentração de tensão em algumas regiões da geogrelha, causando uma ruptura precoce dos elementos nessas regiões.

Como foi observado que, para algumas sobrecargas, houve o arrancamento e, para outras, apenas houve deformação dos elementos da geogrelha na porção mais próxima da abertura da caixa. A Figura 4.40 apresenta as tensões em que ocorreram arrancamento da geogrelha para os ensaios com RCD-R e para a AN. Verifica-se que apesar da AN apresentar maiores valores de resistência ao arrancamento, esse desenvolveu-se de fato para tensões menores. Os resíduos apresentaram uma melhor interação entre os grãos e o sistema de inclusão montados. Assim, foi observado que há a formação de zonas de tensões quando de fato ocorre o arrancamento da geogrelha sem que haja desprendimento dos elementos; na zona de deformação parcial ocorre o deslocamento da geogrelha e depois apenas o desprendimento dos elementos; e a zona de não-arrancamento (onde não há arrancamento), há apenas a danificação dos elementos da geogrelha próximos a abertura frontal da caixa.

Figura 4.40 – Mecanismos de sollicitação nos ensaios de arrancamento: a) RCD-R e b) AN



4.2.4. Análise dos Coeficientes de Resistência de Interface

Como foi observado anteriormente, para alguns valores de sobrecarga aplicados não ocorreu arrancamento – tanto para os ensaios com as areias recicladas quanto para os com a AN. Porém, verificou-se que o aumento das sobrecargas aplicadas provocou o decréscimo do coeficiente de resistência de interface (FIGURA 4.41 e TABELA 4.9), comportamento também foi observado em outros trabalhos que utilizaram areias (LOPES e LADEIRA, 1996; TEIXEIRA, 1999; e ARAÚJO NETO, 2017).

Observou-se que há uma tendência de estabilização dos valores do coeficiente de resistência de interface (f) conforme aumenta-se o valor da sobrecarga de ensaio. Verificou-se diferentes valores de f para os materiais investigados nas tensões menores que 37,5 kPa – trecho onde

ocorreu arrancamento da geogrelha –, e para as tensões superiores houve uma tendência de aproximação dos valores de f , sendo, para a sobrecarga de 100 kPa, praticamente o mesmo independentemente do material e da condição de umidade. A AN apresentou valores superiores de coeficiente de interação quando comparado às areias recicladas, sendo que esse fato foi observado principalmente para os menores valores de tensão de confinamento.

A ARC-C apresentou valores um pouco superior em relação à ARC, tanto na umidade ótima quanto na higroscópica. De uma forma geral, para cada areia reciclada (ARC e ARC-C), os ensaios realizados na umidade ótima apresentaram valores levemente superiores aos realizados na umidade higroscópica.

Figura 4.41 – Variação do coeficiente de interface em função da tensão normal aplicada.

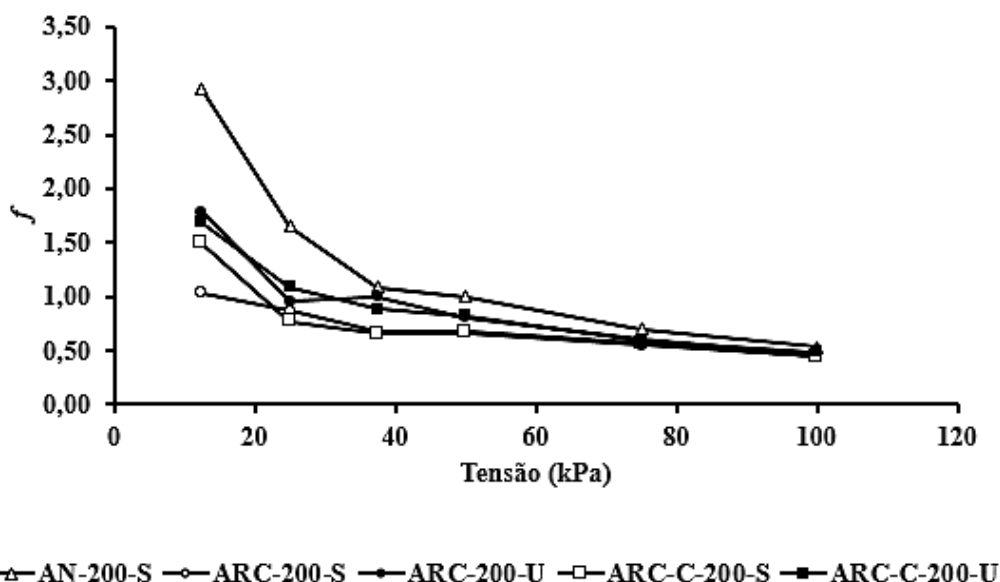


Tabela 4.9 – Coeficientes de resistência de interface.

Materiais	Tensão (kPa)					
	12,5	25	37,5	50	75	100
	f^*					
ARC-200-S	1,028	0,861	0,670	0,665	0,550	0,449
ARC-200-U	1,779	0,954	1,000	0,801	0,603	0,445
ARC-C-200-S	1,490	0,771	0,653	0,670	0,561	0,438
ARC-C-200-U	1,685	1,082	0,880	0,820	0,582	0,487
AN-200-S	2,918	1,649	1,081	0,999	0,697	0,530

Nota: (*) f é o coeficiente de interface, onde $f = \tau / (\sigma \operatorname{tg} \phi)$. Onde: τ é a tensão cisalhante em uma face da geogrelha, no instante da ruptura; σ é a tensão normal; ϕ é o ângulo de atrito do material.

O fato observado acima (valores superiores a 1) pode ser devido ao efeito relatado por Palmeira (1987), que a interferência entre os campos de tensões individuais que podem influenciar o comportamento e carga passiva de cada membro, de forma semelhante ao efeito de grupo em fundações.

4.2.5. Efeito da sobrecarga nos parâmetros de resistência obtidos

A partir da envoltória de resistência ao arrancamento (tensão máxima de arrancamento versus sobrecarga aplicada) é possível determinar alguns parâmetros encontrados no sistema solo-inserção: adesão (a) e ângulo de atrito de interface (δ). A Figura 4.42 apresenta a envoltória das amostras ensaiadas com geogrelha de largura 200 mm para os diferentes materiais nas umidades higroscópica e ótima (exceto a areia, que foi ensaiada apenas na higroscópica) e mesmo grau de compactação de 90%.

A partir das envoltórias de resistência obtidas nos ensaios de arrancamento (areias + geogrelha) e no ensaio de cisalhamento direto (areias), desses parâmetros pode-se calcular os parâmetros λ e f :

$$\lambda = a/c$$

$$f = tg\delta/tg\phi$$

A Tabela 4.10 e Figura 4.43 apresentam a variação dos parâmetros encontrados em função das zonas de sobrecarga, as quais foram utilizadas anteriormente para identificar os diferentes tipos de mecanismos durante o ensaio: i) arrancamento, ii) deformação localizada e iii) não arrancamento. Observou-se que o parâmetro f encontrado na região em que de fato ocorreu arrancamento, para todos os materiais, mostra-se superior quando comparado aos que levam em consideração desde a zona onde há arrancamento até onde a caixa funcionou como uma garra.

Figura 4.42 – Envoltória de resistência ao arrancamento.

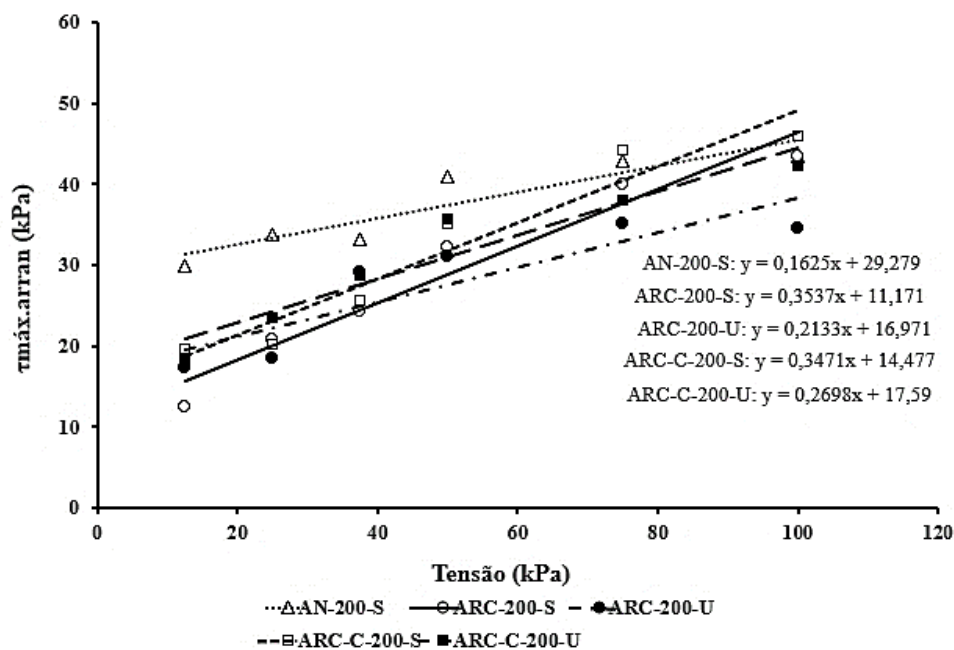
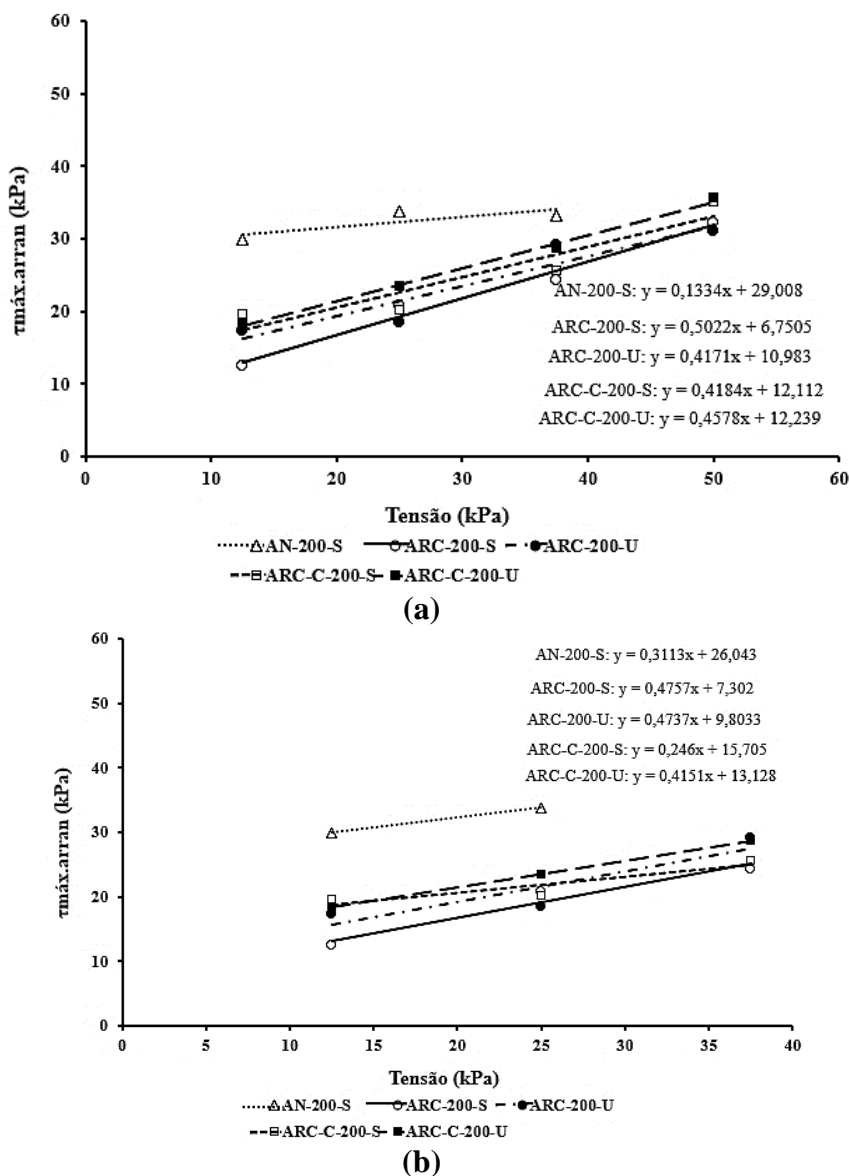


Tabela 4.10 – Variação dos parâmetros de resistência devido as sobrecargas aplicadas.

Zona	Tensões	Material	Parâmetros			
			a	λ	δ	f
Arrancamento	12,5 kPa a 37,5 kPa (Resíduos); 12,5 e 25 kPa (Areia Natural)	NA-200-S	26,04	10,17	17,29	0,44
		ARC-200-S	7,30	3,04	25,44	0,58
		ARC-200-U	9,80	1,34	25,35	0,67
		ARC-C-200-S	15,71	15,71	13,82	0,30
		ARC-C-200-U	13,13	0,53	22,54	0,55
Deformação Parcial	12,5 kPa a 50 kPa (Resíduos); 12,5 kPa a 37,5 kPa (Areia Natural)	NA-200-S	29,01	11,33	7,60	0,19
		ARC-200-S	6,75	2,81	26,67	0,61
		ARC-200-U	10,98	1,50	22,64	0,60
		ARC-C-200-S	12,11	12,11	22,70	0,49
		ARC-C-200-U	12,24	0,49	24,60	0,60
Não-arrancamento	12,5 kPa a 100 kPa	NA-200-S	29,23	11,42	9,23	0,24
		ARC-200-S	11,17	4,65	19,47	0,44
		ARC-200-U	16,97	2,32	12,04	0,32
		ARC-C-200-S	14,48	14,48	19,14	0,42
		ARC-C-200-U	17,59	0,71	15,10	0,37

Figura 4.43 – Envoltória de resistência: a) Para os RCD-R (12, 5 kPa a 50 kPa) e AN e (12,5 kPa a 37,5 kPa); e b) Para os RCD-R (12, 5 kPa a 37,5 kPa) e AN e (12,5 kPa a 25 kPa).



Observou-se que, para os resultados onde foi verificado o arrancamento de fato, os valores de ângulo de atrito da interface solo-geogrelha apresentam valores superiores em relação àqueles onde ocorreu a deformação do material região próxima à abertura e externa à caixa; o contrário foi verificado para a adesão.

Assim, observa-se que os parâmetros obtidos da envoltória de resistência ao arrancamento são influenciados pelos mecanismos desenvolvidos durante o ensaio, e que é necessário analisar de forma cautelosa os ensaios realizados, para que eles possam contribuir com fatores a serem empregados na execução de projetos de estrutura de solo reforçado.

4.2.6. Efeito da largura das amostras de geogrelha

Nesta etapa, buscou-se analisar a interferência da quantidade de elementos longitudinais e, para isso, foram realizados ensaios com diferentes valores de sobrecargas. Ressalta-se que todas as larguras de corpos de prova utilizadas (90 mm, 150 mm e 200 mm) foram ensaiadas com a mesma velocidade (4,6 mm/min), grau de compactação (90%), umidade ótima (16,4%) e material (ARC-06). Observou-se que, conforme o valor de sobrecarga foi aumentado, obteve-se maiores valores de resistência ao arrancamento, independentemente da largura da amostra. A Figura 4.44 e a Tabela 4.11 apresentam os valores obtidos durante a execução dos ensaios de arrancamento.

Verificou-se que houve um padrão das retas geradas: i) nos ensaios onde ocorreu o arrancamento (12,5 kPa e 25 kPa) observou-se um comportamento tendendo para uma reta horizontal; ii) para a tensão de 37,5 kPa houve aumento da resistência com o aumento do número de elemento; e iii) para os maiores valores de sobrecarga onde a caixa funcionou como uma garra (50 kPa e 100 kPa) as resistências encontradas foram praticamente iguais. Kakuda (2005) realizou ensaios com variação de largura de geogrelha e observou que houve uma tendência da força de arrancamento manter-se constante à medida que a largura da amostra aproximou-se da dimensão interna da caixa. Diante disso, o autor aconselhou a utilização do maior número de elementos utilizado em seus testes (doze elementos longitudinais).

Sugimoto, Alagiyawanna e Kadoguchi (2001) e Kakuda (2005) realizaram ensaios em equipamentos de pequeno porte e adotaram amostras com a largura total da abertura da parede frontal, de forma que a configuração do ensaio se aproximasse de um estado plano de tensão. Neste trabalho as amostras empregadas de 200 mm são menores que a abertura frontal da caixa (300 mm) devido ao fato da garra utilizada permitir no máximo uma amostra com 200 mm.

Figura 4.44 – Quantidade de elementos longitudinais versus a tensão máxima de arrancamento.

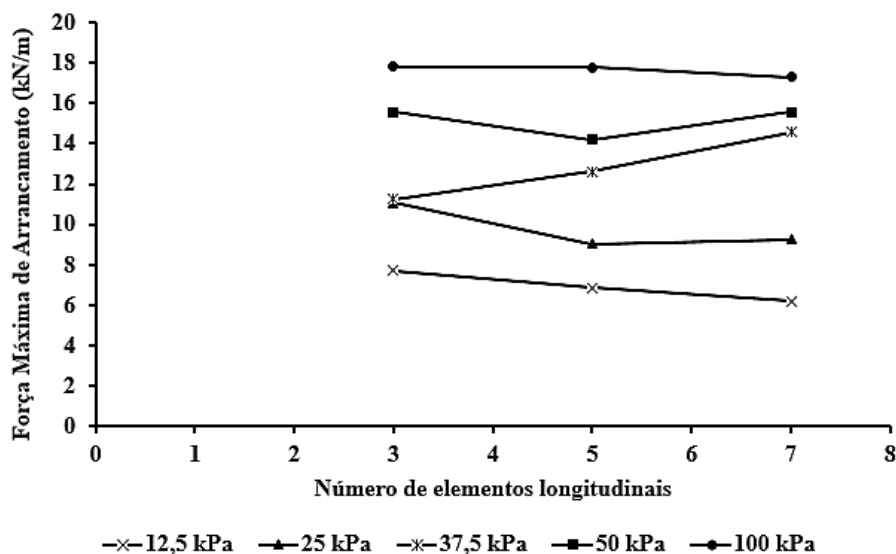


Tabela 4.11 – Resultados dos ensaios de arrancamento para as sobrecargas aplicadas.

Elementos longitudinais	Largura (mm)	Tensão (kPa)				
		12,5	25	37,5	50	100
Força Máxima de Arrancamento (kN/m)						
3	90	7,73	11,08	11,27	15,57	17,80
5	150	6,87	9,04	12,60	14,22	17,79
7	200	6,22	9,27	14,56	15,57	17,30

4.2.7. Efeito do tipo de areia utilizada nos ensaios de arrancamento

Os resultados estão apresentados na Tabela 4.12 e expõem a adesão (a) e o ângulo de atrito de interface solo-geogrelha (δ) obtidos das envoltórias de resistência ao arrancamento, em termos de tensões totais. Nesta parte serão analisados os materiais ensaiados na umidade higroscópica e com grau de compactação de 90% (Proctor Normal).

Para avaliar a interferência do tipo de areia na resistência ao arrancamento da geogrelha, optou-se por avaliar os ensaios realizados com a geogrelha de 200 mm de largura e sobrecarga de 12,5 kPa (tensão na qual ocorreu arrancamento para todas as areias). A Tabela 4.13 apresenta a tensão de pico de arrancamento ($\tau_{\text{máx. arran}}$) e o seu respectivo deslocamento. Apresenta-se também o coeficiente de interação (f), e diâmetro médio das partículas de solo (D_{50}).

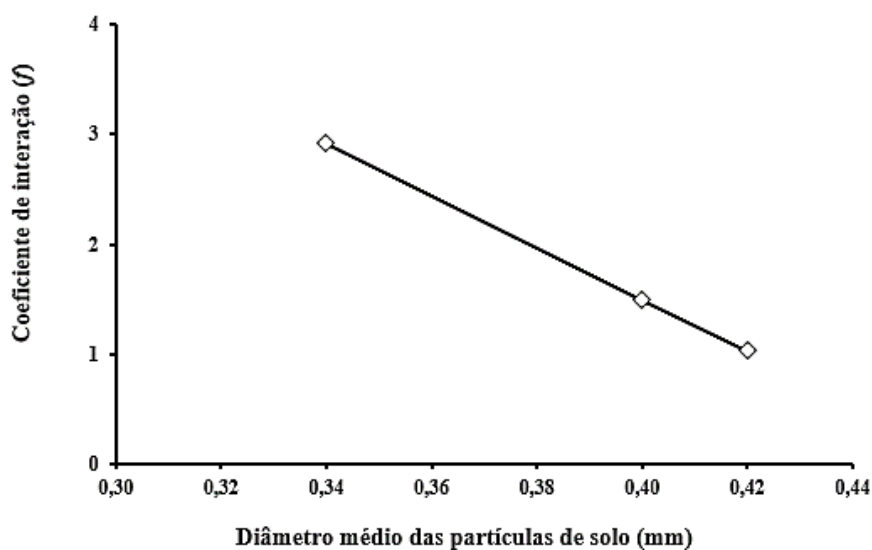
Tabela 4.12 –Parâmetros de resistência ao cisalhamento das areias e resistência de interface solo-geogrelha.

Material	ϕ (°)	c (kPa)	δ (°)	a (kPa)
ARC-06	44	2,40	35	22,34
ARC-C	46	-	35	28,95
NA	39	2,56	18	58,56

Tabela 4.13 –Valores máximos de deslocamento e tensão de arrancamento.

Material	$\tau_{\text{máx. arran}}$ (kPa)	Deslocamento (mm)	f	D_{50} (mm)
ARC-20-S	24,86	29,69	1,03	0,42
ARC-C-20-S	39,15	44,90	1,49	0,40
NA-20-S	59,87	52,16	2,92	0,34

Comparando-se os valores de f (coeficiente de interação) e de D_{50} (diâmetro médio) das partículas, observou-se um comportamento linear, conforme Figura 4.45. Nota-se que para esses materiais, os menores diâmetros apresentam uma melhor interação com a geogrelha analisada

Figura 4.45– Coeficiente de interação (f) versus diâmetro médio (D_{50}).

Analisando-se os deslocamentos necessários (TABELA 4.13) para atingir a resistência máxima ao arrancamento quando submetidas a uma sobrecarga de 12,5 kPa, verificou-se que para os maiores valores de $\tau_{\text{máx}}$ exigirem maiores valores de deslocamento.

4.2.8. Efeito da variação da umidade na resistência das areias recicladas

Os ângulos de atrito de interface (δ) seguiram a mesma tendência de comportamento dos ângulos de atrito interno das areias (ϕ), pois observou-se que o estado seco apresentou maiores valores. Isso pode ser justificado pela lubrificação entre os grãos e no contato de interface com os elementos da geogrelha. Em relação à adesão (a), é importante observar que houve um aumento significativo para as condições úmidas (umidade ótima). Na Tabela 4.14 são mostrados os parâmetros obtidos pelas envoltórias de resistência comparativas entre as interfaces areia reciclada-geogrelha considerando-se apenas os ensaios com as sobrecargas que possibilitaram o arrancamento (12,5 kPa a 25 kPa) e os parâmetros de resistência da própria areia reciclada (obtidos nos ensaios de cisalhamento direto).

Tabela 4.14 –Parâmetros de resistência para os ensaios com resíduos variando a umidade.

Material	ϕ (°)	c (kPa)	δ (°)	a (kPa)
ARC-20-S	44	2,40	45	13,50
ARC-20-U	38	7,32	40	21,97
ARC-C-20-S	46	-	40	24,22
ARC-C-20-U	41	24,81	42	24,48

Analisando-se os valores obtidos de resistência ao arrancamento máxima (sobrecarga de 12,5 kPa), observou-se que a ARC, quando úmida, apresentou maior em relação ao seu estado seco. Por outro lado, para ARC-C, o contrário foi observado, embora os valores de resistência ao arrancamento máxima tenham ficado bem próximos. A Tabela 4.15 apresenta os valores da resistência máxima ao arrancamento e os respectivos deslocamentos para os ensaios com as areias recicladas com sobrecarga de 12,5 kPa.

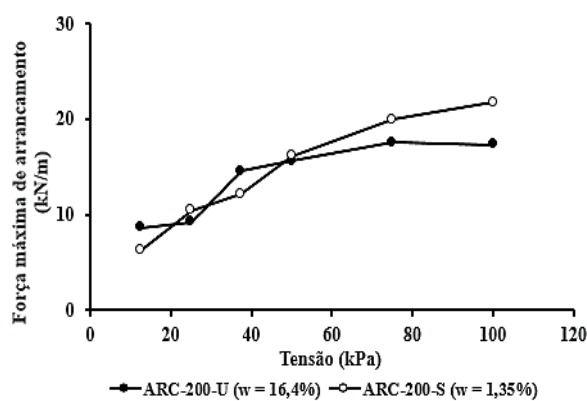
Analisando-se a Figura 4.46, observa-se que esse comportamento (material seco com menor resistência) na ARC não representa todos os valores para as diferentes sobrecargas, pois a resistência até a sobrecarga de 50 kPa manteve-se com valores próximos, porém, para os valores de sobrecarga superiores a esse, a resistência do material seco foi maior. Para a ARC-C, observou-se que o comportamento foi semelhante ao anteriormente relatado até a sobrecarga de 50 kPa (valores de resistência próximos). Mas, de uma forma geral, verificou-se que o coeficiente de interação entre os materiais mostrou-se maior para ambos os materiais quando eles estavam na umidade ótima.

Quando são comparadas as areias na mesma umidade (FIGURA 4.46c e 4.46d) observa-se que a ARC-C apresentou maiores valores de resistência ao arrancamento, embora os valores entre ambos os materiais tenham ficado bem próximos.

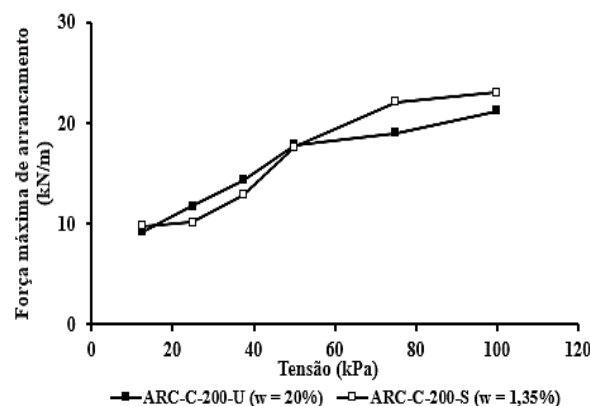
Tabela 4.15 – Valores máximos de deslocamento e tensão de arrancamento das areias em diferentes condições de umidades (sobrecarga de 12,5 kPa).

Material	$\tau_{\text{máx.arran}}$ (kPa)	Deslocamento (mm)	F
ARC-20-S	24,86	29,69	1,03
ARC-20-U	34,57	43,28	1,78
ARC-C-20-S	39,15	44,90	1,49
ARC-C-20-U	36,62	35,08	1,68

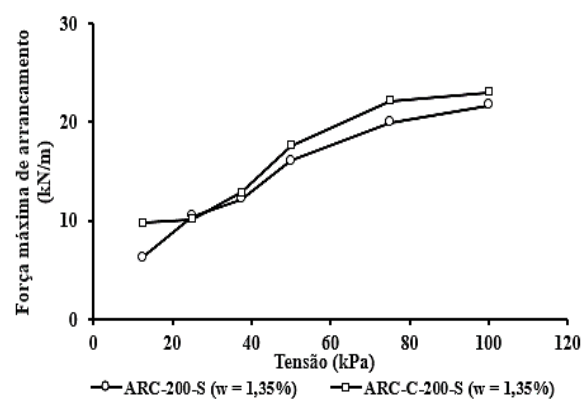
Figura 4.46 – Força máxima de arrancamento versus tensão confinante: a) ARC-200 (umidade ótima e umidade higroscópica); b) ARC-C-200 (umidade ótima e umidade higroscópica); c) ARC-200 e ARC-C-200 (umidade higroscópica); e d) ARC-200 e ARC-C-200 (umidade ótima).



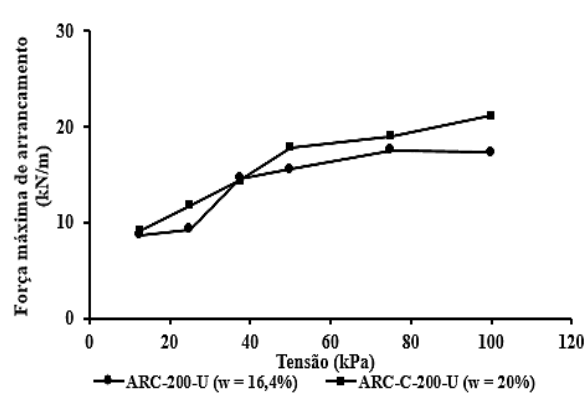
(a)



(b)



(c)



(d)

4.2.9. Efeito dos valores obtidos através da célula de tensão total na resistência ao arrancamento

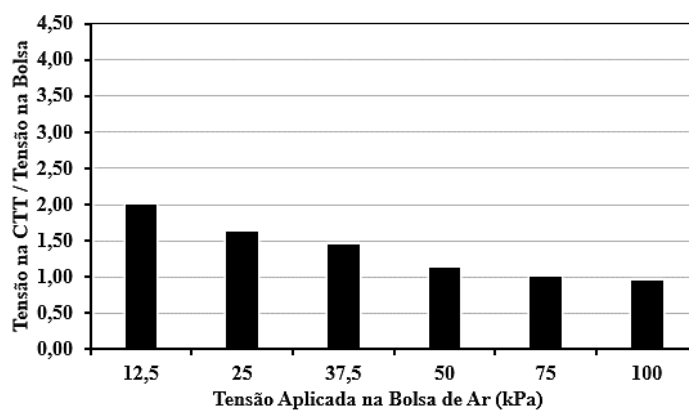
Como foi observado anteriormente, houve uma diferença entre os valores lidos pela CTT e o nominal aplicado pela bolsa de ar. Todos os ensaios realizados para fazer essa comparação foram executados com amostras de geogrelhas de 200 mm, sendo que a CTT em todos os ensaios estava a 125 mm da parede frontal (distância a partir do centro da CTT). A Figura 4.47(a) apresenta a relação entre a sobrecarga obtida pela CTT e a sobrecarga aplicada pela bolsa de ar, sendo que esses valores foram obtidos para a força máxima de arrancamento nos ensaios realizados para ARC-200-U. Em relação aos valores aplicados na bolsa de ar e os obtidos pela CTT na força máxima de arrancamento, observou-se que para as menores sobrecargas foram lidos os maiores valores pela CTT, enquanto para as tensões de 75 kPa e 100 kPa essa variação foi menor – conforme Apêndice D.

Tendo em vista que os valores de sobrecarga foram diferentes para as leituras realizadas na CTT e no manômetro acoplado à bolsa de ar, o parâmetro f apresenta valores distintos (Figura 4.47b).

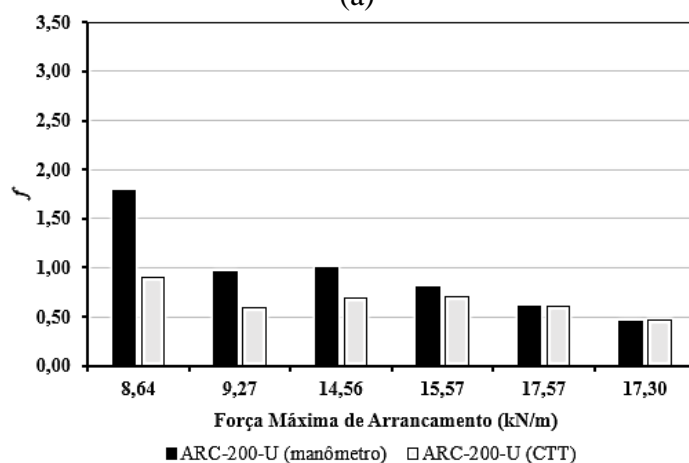
Como observado no item 2.3.2.5 (Tabela 2.6), os valores obtidos pela CTT foram normalmente superiores aos aplicados pela bolsa de ar. Nesta pesquisa, observou-se que, em sua maioria, os valores obtidos na CTT foram também superiores em relação aos aplicados pela bolsa de ar. A Figura 4.48, 4.49 e 4.50 apresentam os resultados para ensaios desta pesquisa e de outros estudos que utilizaram materiais granulares e geogrelhas poliméricas com a CTT instalada a 125 mm da parede frontal da caixa.

Verificou-se que, quando o valor da sobrecarga de confinamento foi aumentado, houve uma aproximação os valores lidos com a CTT e os aplicados pela bolsa de ar. Essa observação foi verificada para os resultados deste trabalho e dos autores citados nas Figuras 4.48 a 4.50.

Figura 4.47 – Diferença entre os valores nominais e obtidos pela CTT para a ARC-20-S: a) Tensão normal e b) Coeficiente de Interação.

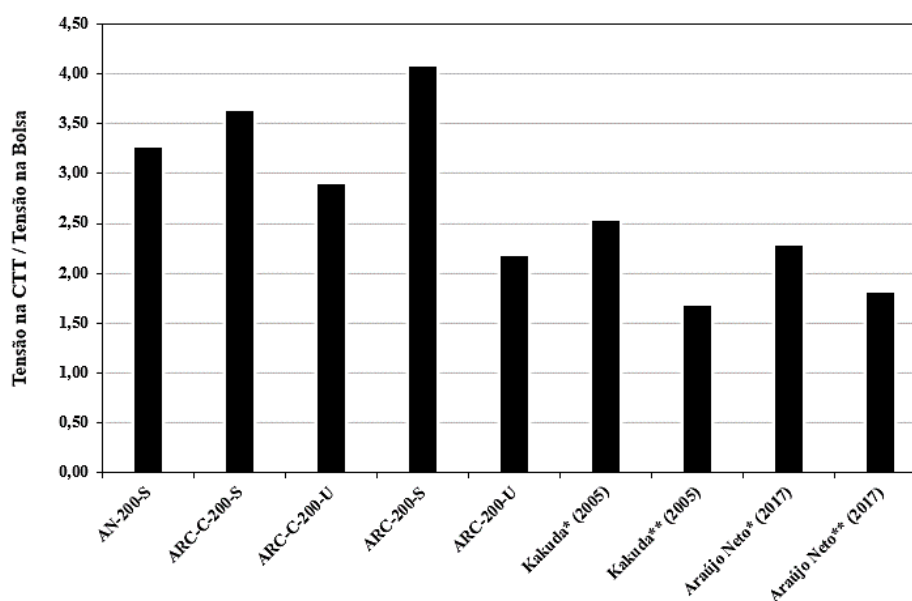


(a)



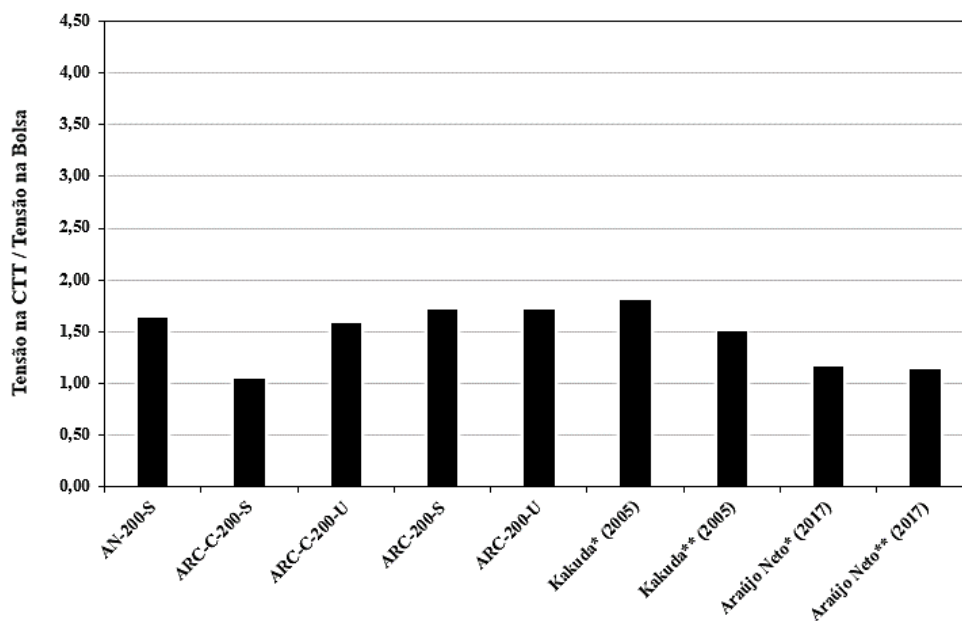
(b)

Figura 4.48 – Relação entre os valores de sobrecargas lidos com a CTT e com o manômetro para diversos estudos de arrancamento com caixa de pequeno porte (sobrecarga nominal de 25 kPa).



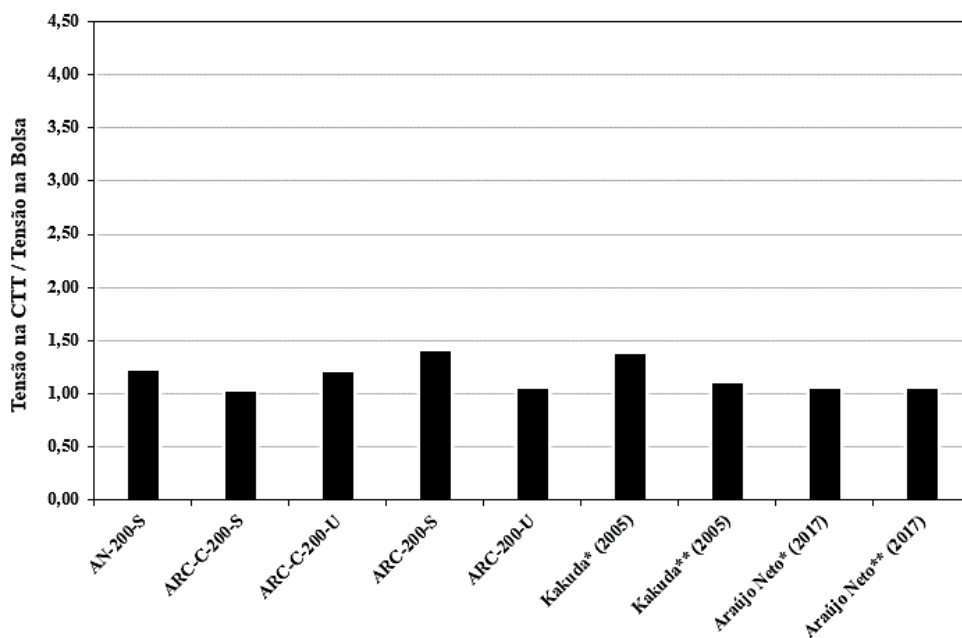
Nota: (*) e (***) indicam que são resultados obtidos em ensaios com configurações distintas conforme apresentado na Tabela 2.5.

Figura 4.49 – Relação entre os valores de sobrecargas lidos com a CTT e com o manômetro para diversos estudos de arrancamento com caixa de pequeno porte (sobrecarga nominal de 50 kPa).



Nota: (*) e (**) indicam que são resultados obtidos em ensaios com configurações distintas conforme apresentado na Tabela 2.5.

Figura 4.50 – Relação entre os valores de sobrecargas lidos com a CTT e com o manômetro para diversos estudos de arrancamento com caixa de pequeno porte (sobrecarga nominal de 100 kPa).



Nota: (*) e (**) indicam que são resultados obtidos em ensaios com configurações distintas conforme apresentado na Tabela 2.5.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Diante da problemática causada pelo resíduo de construção e demolição (RCD), medidas estão sendo adotadas para que esse material possa reingressar na cadeia produtiva da construção civil, como, por exemplo, a reciclagem. Neste cenário, o resíduo de construção e demolição reciclado (RCD-R) tem sido visto como um material atrativo a ser empregado em obras geotécnicas. Assim, este trabalho buscou avaliar a utilização desse material em estruturas de solo reforçado (ESR) com geogrelhas, por meio de análises de ensaios de arrancamento. Este capítulo apresenta as conclusões desta pesquisa e sugestões para pesquisas futuras.

5.1. CONCLUSÕES

Diante dos resultados encontrados, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- Por meio de uma observação visual das diferentes amostras de resíduos, verificou-se, pela coloração dos materiais, que ocorreram amostras com tons de marrom, sendo isso um indício da presença de material cerâmico/solo em sua composição, embora o material receba o nome de areia reciclada cinza (ARC) pelo fabricante.
- As areias recicladas apresentaram valores de peso específico dos grãos normalmente verificados para solos.
- De uma forma geral, as areias recicladas apresentaram, por meio da análise granulométrica, um padrão de produção realizado pela usina de reciclagem. Porém, chama-se a atenção para a 6^a amostra coletada, uma vez que essa apresentou maior diferença em relação às demais; provavelmente devido à mudança no processo produtivo da empresa. Apesar disso, tal diferença foi pequena, e assim esse material apresenta outros aspectos que impulsionam a sua utilização, como, por exemplo, o fato de não apresentar plasticidade.
- No ensaio de cisalhamento, verificou-se que todos os materiais ensaiados apresentaram valores de ângulo de atrito superiores a 37° e que os valores da coesão encontrados

sofreram influência da umidade das amostras. Contudo, de forma geral, esses materiais apresentaram aspectos positivos para serem utilizados em aplicações geotécnicas.

- Os resultados dos ensaios de arrancamento de geogrelha (equipamento de pequenas dimensões) revelaram, por meio das curvas de força de arrancamento versus deslocamento, que o sistema montado mostrou-se mais eficiente para menores sobrecargas aplicadas na bolsa de ar. Para tensões muito elevadas o sistema funcionou como uma garra de mordente, que impedia o arrancamento da geogrelha. Assim, baseando-se no efeito da sobrecarga no ensaio, foi possível delimitar zonas de tensões, para cada material específico ensaiado, em que de fato ocorreu o arrancamento.
- A sobrecarga influenciou marcadamente nos mecanismos observados durante o ensaio de arrancamento. Assim, precisa-se avaliar de forma cautelosa os valores adotados nos ensaios, de forma que eles possam representar a condição de arrancamento e possam contribuir com parâmetros a serem empregados na execução de projetos de estrutura de solo reforçado.
- Observou-se que a variação da largura do corpo de prova submetido ao ensaio de arrancamento não influenciou na força de arrancamento, tendo sido possível, no entanto, verificar um comportamento diferente para a tensão a partir da qual a caixa de ensaio funcionou como uma garra de mordente.
- Verificou-se que as areias recicladas ensaiadas na umidade ótima apresentaram, de uma forma geral, maiores valores de resistência ao arrancamento (onde de fato ocorreu o arrancamento da geogrelha). Isso, pode ter ocorrido devido a um melhor entrosamento entre os grãos devido à presença da água.

Conclui-se, portanto, que as areias recicladas apresentaram baixos coeficientes de variação nos resultados de caracterização, boas propriedades de resistência e comportamento mecânico que justificam sua utilização em obras geotécnicas, inclusive, atendendo, de forma geral, as recomendações previstas nas normativas internacionais para construção de ESR.

5.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Diante dos resultados e conclusões obtidas nessa pesquisa sugere-se para pesquisas futuras:

- Em relação aos ensaios de arrancamento, sugere-se a realização de estudos com outras areias recicladas produzidas por usinas e que possuam grandes teores de materiais cerâmicos e solo; assim como variar as velocidades de ensaios.
- Ensaiar outras geogrelhas para verificar seu comportamento no sistema montado para realização dos ensaios de arrancamento de pequeno porte.
- Realizar ensaios com instrumentação que permita o monitoramento das deformações internas da porção enterrada da geogrelha na caixa de arrancamento, medidores de poro-pressão e outros.
- Realização de ensaios de DRX para verificar com mais precisão os elementos químicos presentes nas amostras de RCD-R e suas eventuais influências nos ensaios realizados.

REFERÊNCIAS

- ABDI, M. R.; ZANDIEH, A. R. Experimental and numerical analysis of large scale pull out tests conducted on clays reinforced with geogrids encapsulated with coarse material. **Geotextiles and Geomembranes**, v 42, n 5, p.494-504, 2014. DOI:10.1016/j.geotexmem.2014.07.008
- AGGARWAL, P.; GUPT, K. K.; SHARMA, K. G. Modelling of Pull-Out Behaviour of Geogrid Embedded In Sand. **International Journal of Modelling and Simulation**, v 28, n 3, p. 264–270, 2008. DOI:10.1080/02286203.2008.11442477
- ALFAIA, R. G. de S. M.; COSTA, A. M.; CAMPOS, J. C. Municipal solid waste in Brazil: A review. **Waste Management & Research**, v 35, n 12, p.1195–1209, 2017. DOI:10.1177/0734242x17735375
- ALFARO, M. C.; HAYASHI, S.; MIURA, N.; WATANABE, K. Pullout interaction mechanism of geogrid strip reinforcement. **Geosynthetics International**, v 2, n 4, p. 679-698, 1995.
- ALFARO, M.; MIURA, N.; BERGADO, D. Soil-Geogrid Reinforcement Interaction by Pullout and Direct Shear Tests. **Geotechnical Testing Journal**, v 18, n 2, p. 157-167, 1995.
- ALMEIDA, J. G. R. **Erodibilidade de solos tropicais não saturados nos municípios de senador Canedo e Bonfinópolis – GO**. 2014. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.
- 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 DESIGNATION. **D 3080/D 3080M-11**: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. Overland Park (KS): ASTM International, 2011. 9 p.
- _____. **D4253 – 16**: Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table1. Overland Park (KS): ASTM International. 2016a. 14 p.
- _____. **D4254 – 16**: Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density. Overland Park (KS): ASTM International. 2016b. 9 p.
- D6706-01**: Standard Test Method for Measuring Geosynthetic Pullout Resistance in Soil. ASTM International. 2013.8 p.
- _____. **D2487-06**: Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). Overland Park (KS): ASTM International, 2006. 12p.
- ANDRAWES, K. Z.; MCGOWN, A.; KABIR, M. H. Uniaxial strength testing of woven and nonwoven geotextiles. **Geotextiles and Geomembranes**, v 1, n 1, p. 41–56, 1984. doi:10.1016/0266-1144(84)90004-

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.; ARTHUR P. CHAVES, A. P.; ALMEIDA, S. L. M.; LIMA, F. M. R. S.; GOMES, P. C. Aperfeiçoamento da reciclagem da fração mineral dos Resíduos de construção e demolição – uso em concretos. In: SEMINÁRIO: O Uso da Fração Fina da Britagem, 2005. **Anais de II SUFFIB...** Cuchierato et al. (eds) 2005.

ARAÚJO, A. G. **Análise do desempenho de poços de infiltração na cidade de Goiânia-GO**. 2010. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

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 em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, Pernambuco, 2017.

ARULRAJAH, A.; PIRATHEEPAN, J.; DISFANI, M.; BO, M. Geotechnical and geoenvironmental properties of recycled construction and demolition materials in pavement subbase applications. **ASCE**, v 25, n. 8, p. 1077–1088, 2013.

ARULRAJAH, A.; RAHMAN, M. A.; PIRATHEEPAN, J.; BO, M. W.; IMTEAZ, M. A. Evaluation of Interface Shear Strength Properties of Geogrid-Reinforced Construction and Demolition Materials Using a Modified Large-Scale Direct Shear Testing Apparatus. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v 26, n 5, p. 974–982, 2014. DOI:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000897

ASGARI, A.; GHORBANIAN, T.; YOUSEFI, N.; DADASHZADEH, D.; KHALILI, F.; BAGHERI, A.; RAEI, M.; MAHVI, A. H. **Quality and quantity of construction and demolition waste in Tehran**, v 15, n 1, 2017. DOI: 10.1186/s40201-017-0276-0

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/2019**. São Paulo, 2019, 64 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. 71 p. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10007**: Amostragem de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 12004**: Determinação do índice de vazios máximo em solos não coesivos. Rio de Janeiro, 1990.

_____. **NBR 12051**: Determinação do índice de vazios mínimo em solos não coesivos. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 6457**: Amostra de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016a.

_____. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017.

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

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

_____. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016c.

- ____. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016d.
- ____. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016e.
- ____. **NBR ISO 10318-1**: Geossintéticos. Parte 1: Termos e definições. Rio de Janeiro, 2018.
- ____. **NBR NM 26**: Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro, 2009.
- AZAMBUJA, E. A influência do dano mecânico na tensão admissível dos geossintéticos em estruturas de solo reforçado. *In*: 1º Simpósio Sul-Americano de Geossintéticos – 3º Simpósio Brasileiro de Geossintéticos – Geossintéticos'1999, 1999, Rio de Janeiro. p. 157-165. **Anais de SIMPÓSIO...** Rio de Janeiro, 1999.
- BAKEER, R. M., SAYED S. M., CATES, P. & SUBRAMANIAN, R. Pullout and shear tests on geogrid reinforced lightweight aggregate. **Geotextiles and Geomembranes**, v 16, p. 119-133, 1998.
- BALAKRISHNAN, S.; VISWANADHAM, B. V. S. Performance evaluation of geogrid reinforced soil walls with marginal backfills through centrifuge model tests. **Geotextiles and Geomembranes**, v 44, n 1, p. 95-108, 2016. DOI: 10.1016/j.geotextmem.2015.06.002
- BALUNAINI, U.; YOON, S.; PREZZI, M.; SALGADO, R. Pullout Response of Uniaxial Geogrid in Tire Shred–Sand Mixtures. **Geotechnical and Geological Engineering**, v 32, n 2, p. 505–523, 2014. DOI:10.1007/s10706-014-9731-1
- BAUER, G. E.; SHANG, Q. Pullout Resistance of Large Geogrid Specimens in Site Specific Soils. **Geotechnical Engineering**, v 24, n 1, 1993.
- 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). *In*: XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2016, Belo Horizonte. **Anais de COBRAMSEG...** Belo Horizonte, 2016.
- 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 em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, Pernambuco, 2017.
- BERGADO, D. T.; BUKKANASUTA, A.; BALASUBRAMANIAM, A. S. Laboratory pull-out tests using bamboo and polymer geogrids including a case study. **Geotextiles and Geomembranes**, v 5, n 3, p.153–189, 1987. DOI:10.1016/0266-1144(87)90015-x
- BOGADO, J. G. M. **Aumento da produtividade e diminuição de desperdícios na construção civil: um estudo de caso – Paraguai**. 1998. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.
- BONAPARTE, R.; HOLTZ, R. D.; GIROUD, J. P. Soil reinforcement design using geotextiles and geogrids. **Geotextile Testing and the Design Engineer**, ASTM STP 952, p. 69-116, 1987.
- BORGES, B. S. **Estudo da Interação Solo-Geogrelha pelo Método dos Elementos Discretos**. 2012. 178f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura 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. 274p.

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, 2005.

BRITO, J. A. Cidade versus entulho. *Areia&Brita*. p. 22-26. Out-dez/1998.

BRITTO, A. F. S. **Permeabilidade de sistemas compostos de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) e geotêxteis não tecidos**. 2020. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2020.

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

BUENO, B. S.; VILAR, O. M. **Propriedades, Ensaios e Normas. Manual Brasileiro de Geossintéticos**. Coordenador J. C. Vertematti, Editora Edgar Blücher, São Paulo, SP, p. 25-62, 2004.

CARDILE, G.; GIOFFRÈ, D.; MORACI, N.; CALVARANO, L. S. Modelling interference between the geogrid bearing members under pullout loading conditions. **Geotextiles and Geomembranes**, v 45, n 3, p. 169–177, 2017. DOI:10.1016/j.geotextmem.2017.01.008

CARDOSO, R.; SILVA, R. V.; BRITO, J. de; DHIR, R. Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review. **Waste Management**, v 49, p. 131–145, 2016. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.12.021

CHANG D. T.; SUN, T. S.; HUNG, F. Pullout Mechanism of Geogrids Under Confinement by Sandy and Clayey Soils. **Transportation Research Record**, n 1474, p. 64-72, 1995.

CHEN, C. W.; WU, J. Y. Effects of Wetting on the Pullout Resistance of Geogrids in **Compacted Silty Sand**. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering – EJGE**, v 17, p. 2529-2540, 2012.

CHEN, C.; MCDOWELL, G. R.; THOM, N. H. A study of geogrid-reinforced ballast using laboratory pull-out tests and discrete element modelling. **Geomechanics and Geoengineering**, v 8, n 4, p. 244–253, 2013. DOI:10.1080/17486025.2013.805253

CHRISTOPHER, B. R.; BERG, R. R. Pull evaluation of geosynthetics in cohesive soils. **Geotextiles, Geomembranes and related products**, Den Hoedt (ed.), Rotterdam, p. 731-737, 1990.

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

_____. Resolução nº 448. Brasília, 2012.

COUTO, D. M.; SANTOS, E. C. G. Permeabilidade de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R): Efeito da Presença de Material Concretício e do Grau de Compactação. *In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, 2016, Belo Horizonte. **Anais de COBRAMSEG...** Belo Horizonte, 2016.

- DI MARIA, A.; EYCKMANS, J.; VAN ACKER, K. Downcycling versus recycling of construction and demolition waste: Combining LCA and LCC to support sustainable policy making. **Waste Management**, v 75, p.3-21, 2018. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.01.028
- DIAS, A. C. **Análise Numérica da Interação Solo-Geossintético em Ensaio de Arrancamento**. 2004. 102f. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2004.
- 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 em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.
- DOMICIANO, M. L.; SANTOS, E. C. G.; LINS DA SILVA, J. Geogrid Mechanical Damage Caused by Recycled Construction and Demolition Waste (RCDW): Influence of Grain Size Distribution. **Soils and Rocks**, São Paulo, v 43, n 2, p. 231-246, 2020.
- EN 00189016 - Geotextiles and Geotextile Related Products: Determination of Pullout Resistance in Soil. 1998.
- ESA, M. R.; HALOG, A.; RIGAMONTI, L. Strategies for minimizing construction and demolition wastes in Malaysia. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 120, p. 219-229, 2017. DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.12.014
- FARRAG, K.; ACAR, Y. B.; JURAN, I. Pullout resistance of geogrid reinforcements. **Geotextiles and Geomembranes**, Philadelphia, v 12, p. 133-159. 1993. DOI: 10.1016/0266-1144(93)90003-7
- FARRAG, K.; MORVANT, M. Evaluation of interaction properties of geosynthetics in cohesive soils: Lab and field pullout tests. Technical Summary Report 380, LTRC, July.
- 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.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). **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.
- FERELLEC, J.-F.; MCDOWELL, G. R. A method to model realistic particle shape and inertia in DEM. **Granular Matter**, v 12, n 5, p.459–467, 2010. DOI:10.1007/s10035-010-0205-8
- FERREIRA, J. A. Z.; ZORNBERG, J. A transparente pullout testing device for 3D evaluation of soil-geogrid interaction. **Geotechnical Testing Journal**, v 38, n 5, 2015. DOI: 10.1520/GTJ20140198
- FLEURY, M. P. **Resistência de geogrelhas após danos mecânicos causados por resíduos de construção e demolição reciclados**. 2018. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2018.
- 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: IV Simpósio de*

Prática de Engenharia Geotécnica na Região Centro Oeste, 2017, Goiânia. **Anais de GEOCENTRO...** Goiânia, 2017.

FREITAS, L. R. Reaproveitamento de resíduos sólidos da construção civil no Brasil. **Revista: Dom Total**, Belo Horizonte, 05 jun. 2018.

GILBERT, P. A.; OLDHAM, J. C.; COFFING, L. R. Laboratory Measurement of Pullout Resistance of Geotextiles Against Cohesive Soils. Technical Report GL-92-6, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

GIRARDI, A. C. C. **Avaliação da Substituição total de areia natural por RCD em revestimentos de argamassa**. 2016. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

GOMES, A. C. **Monitoramento de uma estrutura de contenção em estacas espaçadas considerando perfil de sucção**. 2015. 192 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

HATAF, N.; SADR, A. Experimental, numerical and analytical study on conventional and innovative Grid-Anchor system in the pull-out test. **Geomechanics and Geoengineering**, v 10, n 3, p.182–193, 2014. DOI:10.1080/17486025.2014.933893

HUANG, W.L.; LIN, D.H.; CHANG, N.B.; LIN, K.S. Recycling of construction and demolition waste via a mechanical sorting process. **Resources, Conservation and Recycling**, v 37, n 1, p. 23–37, 2002. DOI:10.1016/s0921-3449(02)00053-8

INGOLD, T. S. A laboratory investigation of soil-geotextile friction. **Ground Engineering**, p. 21-28, 1984.

JEWELL, R. A. Reinforcement bond capacity. **Géotechnique**, v 40, n 3, p. 513–518, 1990. DOI:10.1680/geot.1990.40.3.513

JEWELL, R. A.; MILLIGAN, G. W. E.; SARSBY, R. W.; DUBOIS, D. Interaction between soil and geogrids. *In: Symposium on Polymer Grid Reinforcement in Civil Engineering*, 1985, London. Proceeding...London: Thomas Telford Ltda, 1984. p. 18-30, 1984.

JEWELL, R. A.; WROTH, C. P. Direct shear tests on reinforced sand. **Géotechnique**, v 37, n 1, p. 53–68, 1987. DOI:10.1680/geot.1987.37.1.53

JOHN, V. M.; AGOPYAN, J. Reciclagem de Resíduos da Construção. Seminário de reciclagem de resíduos sólidos domiciliares. São Paulo, 2000.

KAKUDA, F. M. **Estudo de ensaios de arrancamento de geogrelha com utilização de um equipamento reduzido**. 2005. 124 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

KAYADELEN, C.; ÖNAL, T. Ö.; ALTAY, G. Experimental study on pull-out response of geogrid embedded in sand. **Measurement**, v 117, p. 390–396, 2018. DOI:10.1016/j.measurement.2017.12.02

KOERNER, R. M. **Designing with Geosynthetics**. 2nd edn, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1990.

LAI, Y.-Y.; YEH, L.-H.; CHEN, P.-F.; SUNG, P.-H.; LEE, Y.-M. Management and Recycling of Construction Waste in Taiwan. **Procedia Environmental Sciences**, v 35, p. 723–730, 2016. DOI:10.1016/j.proenv.2016.07.077

- LAJEVARDI, S. H.; BRIANÇON, L.; DIAS, D. Experimental studies of the geosynthetic anchorage – Effect of geometric parameters and efficiency of anchorages. **Geotextiles and Geomembranes**, v 42, n 5, p.505–514, 2014. DOI:10.1016/j.geotexmem.2014.07.010
- LI, L.-H.; CHEN, Y.-J.; FERREIRA, P. M. V.; LIU, Y.; XIAO, H.-L. Experimental Investigations on the Pull-Out Behavior of Tire Strips Reinforced Sands. **Materials**, v 10, n 7, 2017.
- LIMA, E. S.; CHENNA, S. I. M. Reciclagem de entulho. Viçosa, CPT, 90 f, 2000.
- LIU, H.; YANG, G.; LING, H. I. Seismic response of multi-tiered reinforced soil retaining walls. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v 61-62, p. 1–12, 2014. DOI:10.1016/j.soildyn.2014.01.012
- LOPES, M. L.; LADEIRA, M. Influence of the confinement, soil density and displacement rate on soil-geogrid interaction. **Geotextiles and Geomembranes**, v 14, n 10, p. 543–554, 1996. DOI:10.1016/s0266-1144(97)83184-6
- LOPES, M.J.; LOPES, M.L. Soil-Geosynthetic Interaction -- Influence of Soil Particle Size and Geosynthetic Structure. **Geosynthetics International**, v 6, n 4, p. 261-282, 1999.
- MAJLESSI, M.; ZAMANZADEH, M.; ALAVI, N.; AMANIDAZ, N.; BAKHSHOODEH, R. Generation rates and current management of municipal, construction and demolition wastes in Tehran. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v 21, p. 191-200, 2018. DOI: 10.1007/s10163-018-0772-z
- MASSIMINO, B. M. **Equipamento para realização de ensaios de tração confinada e aquecida em geossintéticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2014.
- MCDOWELL, G. R.; HARIRECHE, O.; KONIETZKY, H.; BROWN, S. F.; THOM, N. H. Discrete element modelling of geogrid-reinforced aggregates. **Geotechnical Engineering**, v 159, n 1, p.35–48, 2006. DOI:10.1680/geng.2006.159.1.35
- MCGOWN, A.; ANDREWS, K. Z.; KABIR, M. H. Load-extension testing of Geotextiles confined in-soil. *In*: Second International Conference on Geotextiles, 1982, Las Vegas, EUA, 3, p. 793-798. **Anais de SECOND...** Las Vegas, 1982.
- MENEZES, A. V. Proposta metodológica para estudo de perda de massa de solos situados em bordas de reservatório devido ao efeito de ondas por meio de um canal hidráulico. 2016. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.
- MIAO, C.; ZHENG, J.; ZHANG, R.; CUI, L. DEM modeling of pullout behavior of geogrid reinforced ballast: The effect of particle shape. **Computers and Geotechnics**, v 81, p. 249–261, 2017. DOI:10.1016/j.compgeo.2016.08.028
- MIRANDA, L. F. R.; ANGULO, S. C.; CARELI, E. D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v 9, n 1, p. 57-71, 2009.
- MOSALLANEZHAD, M.; SADAT TAGHAVI, S. H.; KHADIV SARVESTANI, M. Large-scale pullout testing of a new “rooted” geogrid. **International Journal of Physical Modelling in Geotechnics**, v 17, n 3, p.195–203, 2017. DOI:10.1680/jphmg.15.00029
- MOSALLANEZHAD, M.; TAGHAVI, S. H. S.; HATAF, N.; ALFARO, M. C. Experimental and numerical studies of the performance of the new reinforcement system under pull-out

conditions. **Geotextiles and Geomembranes**, v 44, n 1, p. 70–80, 2016.

DOI:10.1016/j.geotexmem.2015.07.006

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.

MOURA, C. A. M.; SILVA, R. B.; REZENDE, G. B. M.; NEVES JUNIOR, A. N. Caracterização de resíduos telha cerâmica vermelha de fontes distintas visando proposta coprocessamento como matéria-prima para clínquer Portland. **Scientia cum industria**, v 6, n 3, p31-37, 2018.

NAKAMURA, T.; MITACHI, T.; IKEURA, I. Estimating Method for the In-Soil Deformation Behavior of Geogrid Based on the Results of Direct Box Shear Test. **SOILS AND FOUNDATIONS**, v 43, n 1, p. 47–57, 2003. DOI:10.3208/sandf.43.47

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.

NORDI, G. H.; PALACIOS-BERECHÉ, R.; GALLEGO, A. G.; NEBRA, S. A. Electricity production from municipal solid waste in Brazil. **Waste Management & Research**, v 35, n 7, p. 709–720, 2017. DOI:10.1177/0734242x17705721

NUNES, K. R. A.; MAHLER, C. F.; VALLE, R. A. Reverse logistics in the Brazilian construction industry. **Journal of Environmental Management**, v 90, n 12, p.3717–3720, 2009. DOI:10.1016/j.jenvman.2008.05.026

OCHIAI, H.; OTANI, J.; HAYASHIC, S.; HIRAI, T. The pull-out resistance of geogrids in reinforced soil. **Geotextiles and Geomembranes**, Philadelphia, v. 14, p. 19-42. 1996. DOI: 10.1016/0266-1144(96)00027-1

OLIVEIRA, T. C. F.; DEZEN, B. G. S.; POSSAN, E. Use of concrete fine fraction waste as a replacement of portland cement. **Journal of Cleaner Production**, v 273, 2020. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.123126

OLIVEIRA NETO, G. C.; CORREIA, J. M. Environmental and economic advantages of adopting reverse logistics for recycling construction and demolition waste: A case study of Brazilian construction and recycling companies. **Waste Management & Research**, v 37, n 2, p. 176-185, 2019. DOI:10.1177/0734242x18816790

PALMEIRA, E.M. Bearing force mobilisation in pull-out tests on geogrids. **Geotextiles and Geomembranes**, v 22, n 6, p.481–509, 2004. DOI:10.1016/j.geotexmem.2004.03.007

_____. Equipamento para ensaios de tração confinada de geotêxteis em solos. Relatório de pesquisa. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, 1990.

_____. Execução e interpretação de ensaios de laboratório em geossintéticos. In: Simpósio Sul-Americano de Geossintéticos, Rio de Janeiro – RJ, p. 87-108, 1999. **Anais de SUL-AMERICANO...**Rio de Janeiro, 1999.

_____. Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.

_____. Soil–geosynthetic interaction: Modelling and analysis. **Geotextile and Geomembranes**, Philadelphia, v 27, p. 368-390, 2009. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2009.03.003

____. **The study of soil-reinforcement by means of large scale laboratory tests.** 1987. 238f. Thesis submitted for the Degree of Doctor of Philosophy. Magdalen College, University of Oxford, Oxford, 1987.

PALMEIRA, E.M.; MILLIGAN, G.W.E. Scale and other factors affecting the results of pullout tests of grids buried in sand. **Geotechnique**, Thomas Telford Ltd., London, v 39, n 3, p.511-524, 1989. DOI: 10.1680/geot.1989.39.3.511

PAZ, D. H.; LAFAYETTE, K. P. Forecasting of construction and demolition waste in Brazil. **Waste Management & Research**, v 34, n 8, p.708–716, 2016. DOI:10.1177/0734242x16644680

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. DOI: 10.1080/014461997373105

PENTEADO, C. S. G.; ROSADO, L. P. Comparison of scenarios for the integrated management of construction and demolition waste by life cycle assessment: A case study in Brazil. **Waste Management & Research**, v 34, n 10, p. 1026–1035, 2016. DOI:10.1177/0734242x16657605

PEREIRA, V. R. G. **Influência da pressão da água intersticial na resistência ao arrancamento de geogrelha em solo coesivo.** 2010. 122f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

PORTELINHA, F.; PEREIRA, V.; CORREIA, N. Small-Scale Pullout Test of a Geogrid-Reinforced Unsaturated Soil with Suction Monitoring. **Geotechnical Testing Journal**, v 41, n 4, p. 787-804, 2018. DOI: 10.1520/GTJ20150182

PRASHANTH, V.; KRISHNA, A. M.; DASH, S. K. Pullout tests using modified direct shear test setup for measuring soil-geosynthetic interaction parameters. **Int. J. of Geosynth. and Ground Eng.**, v 2, n 10, 2016.

RAJU, D. M. **Monotonic and cyclic pullout resistance of geosynthetic.** PhD. Thesis, University of British Columbia, Canada.

RODRIGUEZ, M. G. G. **Estudo da relação entre sucção, dilatância e resistência ao arrancamento de interfaces areia-geossintético.** 2018. 140 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

ROSADO, L. P.; VITALE, P.; PENTEADO, C. S. G.; ARENA, U. Life cycle assessment of construction and demolition waste management in a large area of São Paulo State, Brazil. **Waste Management**, v 85, p. 477–489, 2019. DOI:10.1016/j.wasman.2019.01.011

ROSHANZAMIR, M. A.; AGHAYARZADEH, M. Comprehensive study of geogrid-reinforced soil retaining walls with tilted face and reinforcements. **Australian Journal of Civil Engineering**, v 13, n 1, p. 48–63, 2015. DOI:10.1080/14488353.2015.109263

SADAT TAGHAVI, S. H.; MOSALLANEZHAD, M. Experimental analysis of large-scale pullout tests conducted on polyester anchored geogrid reinforcement systems. **Canadian Geotechnical Journal**, v 54, n 5, p. 621–630, 2017. DOI:10.1139/cgj-2016-0365

SADAT TAGHAVI, S. H.; MOSALLANEZHAD, M. Experimental analysis of large-scale pullout tests conducted on polyester anchored geogrid reinforcement systems. **Canadian Geotechnical Journal**, v 54, n 5, p. 621–630, 2017. DOI:10.1139/cgj-2016-0365

SAPUAY, S. E. Construction Waste – Potentials and Constraints. **Procedia Environmental Sciences**, v 35, p. 714–722, 2016. DOI:10.1016/j.proenv.2016.07.074

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. Método alternativo de intervenção em obras de edificações enfocando o sistema de movimentação e armazenamento de materiais: um estudo de caso. 1995. 140f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

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

_____. **Avaliação Experimental de Muros Reforçados Executados com Resíduos de Construção e 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.; PALMEIRA, E. M.; BATHURST, R. J. Behaviour of a geogrid reinforced wall built with recycled construction and demolition waste backfill on a collapsible foundation. **Geotextiles and Geomembranes**, v 39, p. 9–19, 2013. DOI:10.1016/j.geotexmem.2013.07.002

_____. 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, 2014. DOI:10.1680/gein.14.00013

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.

SIEIRA, A. C. C. F. **Estudo Experimental dos Mecanismos de Interação Solo-Geogrelha**. 2003. 363f. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2003.

SIEIRA, A. C. C. F.; SAYÃO, A. S. F. J. Estudo Experimental dos Mecanismos de Interação Solo-Geogrelha. *In: 8º Congresso Nacional de Geotecnia, 2002, Lisboa, Portugal, v 1, p.1569-1578. Anais de CONGRESSO...* Lisboa, 2002.

SIEL, B. D.; TZONG, W. H.; CHOU, N. N. S. In-soil stress-strain behavior of geotextile. *In: Geosynthetic' 87 Conference, 1987, New Orleans, EUA, p. 260-265. Anais de GEOSYNTHETIC...* Goiânia, 1987.

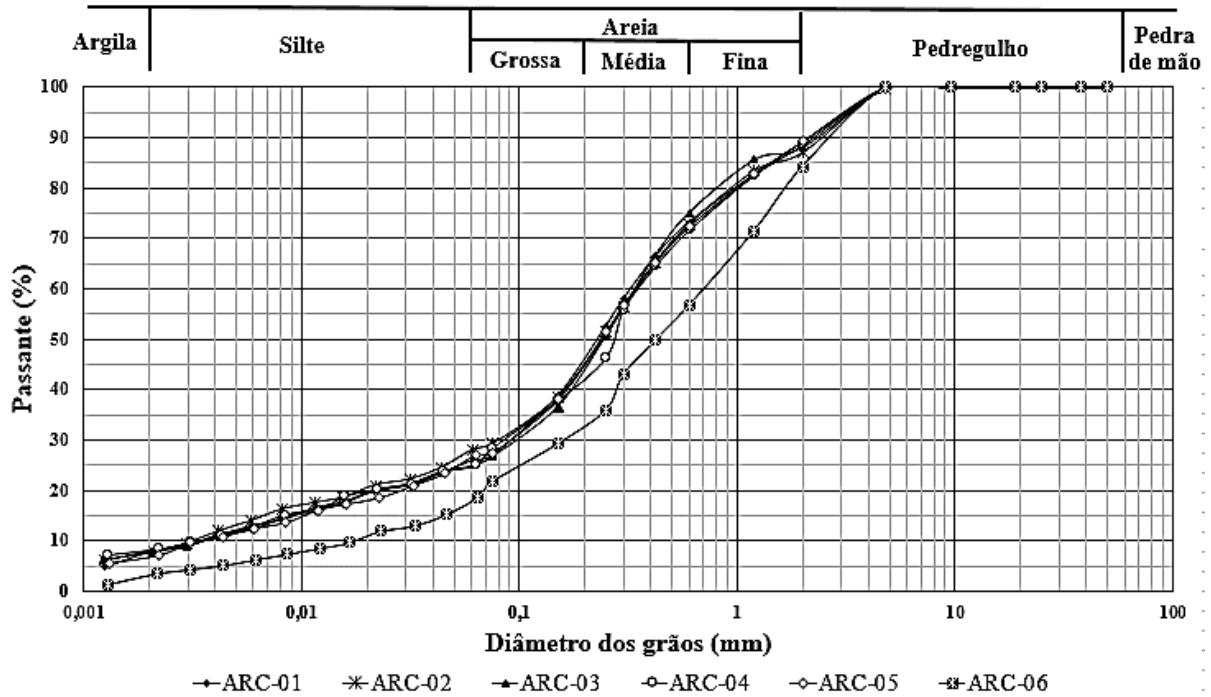
SILVA, R. V.; BRITO, J.; DHIR, R. K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction and Building Materials**, v 65, p. 201-207, 2014.

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.

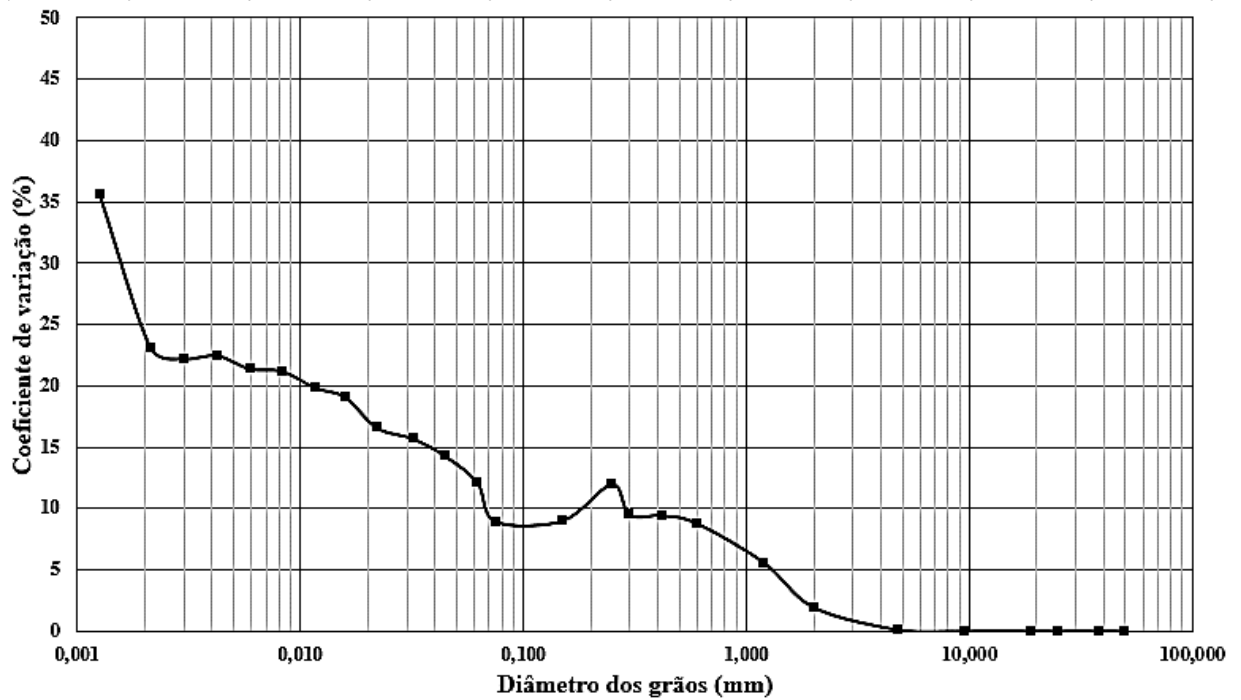
- SILVESTRE, G. R. **Redução da resistência de geogrelhas devido a danos químicos causados por resíduos de construção e demolição reciclados**. 2019. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019.
- SOIBELMAN, L. **As perdas de materiais na construção de edifícios: sua incidência e controle**. 1993. 127 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.
- 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.
- STAHL, M.; KONIETZKY, H.; TE KAMP, L.JAS, H. Discrete element simulation of geogrid-stabilised soil. *Acta Geotechnica*, v 9, n 6, p.1073–1084, 2013. DOI:10.1007/s11440-013-0265-0
- SUGIMOTO, M.; ALAGIYAWANNA, A. M.; KADOGUCHI, K. Influence of rigid and flexible face on geogrid pullout tests. *Geotextiles and Geomembranes*, v 19, n 5, p. 257–277, 2001. DOI: 10.1016/S0266-1144(01)00011-5
- TAM, V. W. Y.; KOTRAYOTHAR, D.; LOO, Y.-C. On the prevailing construction waste recycling practices: a South East Queensland study. *Waste Management & Research*, v 27, n 2, p. 167–174, 2009. DOI:10.1177/0734242x08091864
- TANG, X.; CHEHAB, G. R.; PALOMINO, A. Evaluation of geogrids for stabilising weak pavement subgrade. *International Journal of Pavement Engineering*, v 9, n 6, p. 413–429, 2008. DOI:10.1080/10298430802279827
- TEIXEIRA, S.H.C. **Construção e calibração de um equipamento de ensaios de arrancamento de geossintéticos**. 1999. 157 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999
- _____. Estudo da integração solo-geogrelha em testes de arrancamento e a sua aplicação na análise e dimensionamento de maciços reforçados. 2003. 218 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- TEIXEIRA, S. H. C.; BUENO, B. S.; ZORNBERG, J. G. Pullout Resistance of Individual Longitudinal and Transverse Geogrid Ribs. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, v 133, n 1, p. 37-44, 2007. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:1(37)
- VIEIRA, C. S.; PEREIRA, P. M. Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, v 103, p. 192-204, 2015. DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.07.02
- VIEIRA, C. S.; PEREIRA, P. M. 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, 2016. DOI:10.1680/jgein.15.00030
- WILSON-FAHMY R. F.; KOERNER, R. M.; HARPUR, W. A. Long-Term Pullout Behavior of Polymeric Geogrids. *Journal of Geotechnical Engineering*, v 121, n 10, p.723–728, 1995. DOI:10.1061/(asce)0733-9410(1995)121:10(723)

- WU, H.; ZUO, J.; ZILLANTE, G.; WANG, J.; YUAN, H. Status quo and future directions of construction and demolition waste research: a critical review. **Journal of Cleaner Production**, v 240, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118163
- WANG, J.; YUAN, H.; KANG, X.; LU, W. Critical success factors for on-site sorting of construction waste: A china study. **Resources, Conservation and Recycling**, v 54, n 11, p. 931–936, 2010.
- XU, J.; SHI, Y.; ZHAO, S. Reverse Logistics Network-Based Multiperiod Optimization for Construction and Demolition Waste Disposal. **Journal of Construction Engineering and Management**, v 145, n 2, 2019. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001592
- XU, Y.; WILLIAMS, D. J.; SERATI, M. Measurement of shear strength and interface parameters by multi-stage large-scale direct/interface shear and pull-out tests. **Measurement Science and Technology**, v 29, n 8, 2018. DOI:10.1088/1361-6501/aac8a
- XU, Z.; ELOMRI, A.; POKHAREL, S.; ZHANG, Q.; MING, X. G.; LIU, W. Global reverse supply chain design for solid waste recycling under uncertainties and carbon emission constraint. **Waste Management**, v 64, p. 358-370, 2017. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.02.024
- YOGARAJAH, I.; YEO, K. C. Finite element modelling of pull-out tests with load and strain measurements. **Geotextiles and Geomembranes**, v 13, n 1, p.43–54, 1994. DOI:10.1016/0266-1144(94)9005
- YUAN, H.; SHEN, L. Trend of the research on construction and demolition waste management. **Waste Management**, v 31, n 4, p. 670–679, 2011.
- YUAN, Z.; SWAN, R. H.; BACHUS, R. C.; ELIAS, V. Soil confinement effect on stress-strain properties on geosynthetics. *In: Sixth International Conference on Geosynthetics*, 1998, Atlanta, EUA, p. 523-528. **Anais de INTERNATIONAL...Atlanta**, 1998.
- ZHENG, L.; WU, H.; ZHANG, H.; DUAN, H.; WANG, J.; JIANG, W.; JIANG, W.; DONG, B.; LIU, G.; ZUO, J.; SONG, Q. Characterizing the generation and flows of construction and demolition waste in China. **Construction and Building Materials**, v 136, p. 405–413, 2017. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2017.01.055

APÊNDICE A - CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS AMOSTRAS DE ARC (COM DEFLOCULANTE)

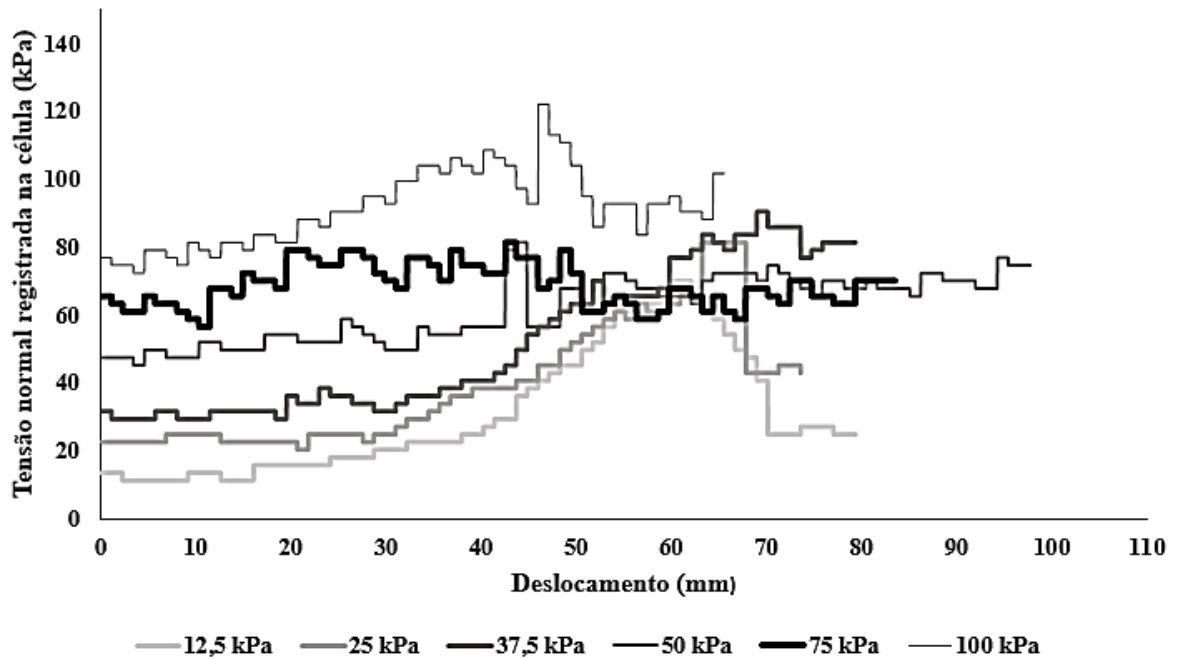


**APÊNDICE B - COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DO
MATERIAL PASSANTE VERSUS DIÂMETRO DOS GRÃOS –
ARC (01 A 06) COM DEFLOCULANTE.**

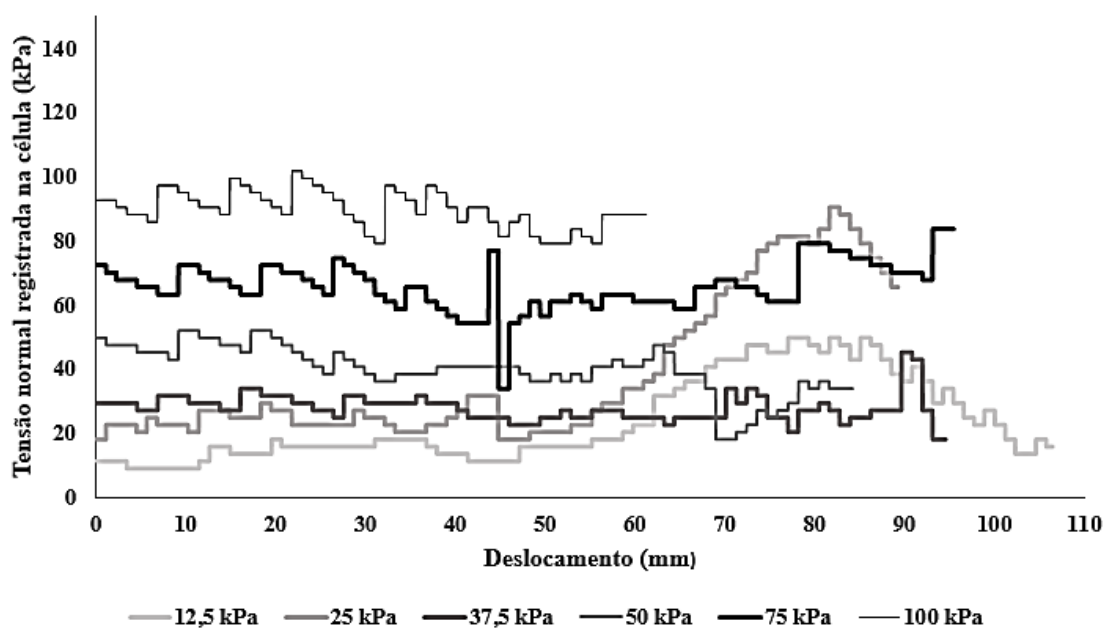


APÊNDICE C – LEITURAS DE TENSÃO NORMAL OBTIDAS COM A UTILIZAÇÃO DA CÉLULA DE TENSÃO TOTAL

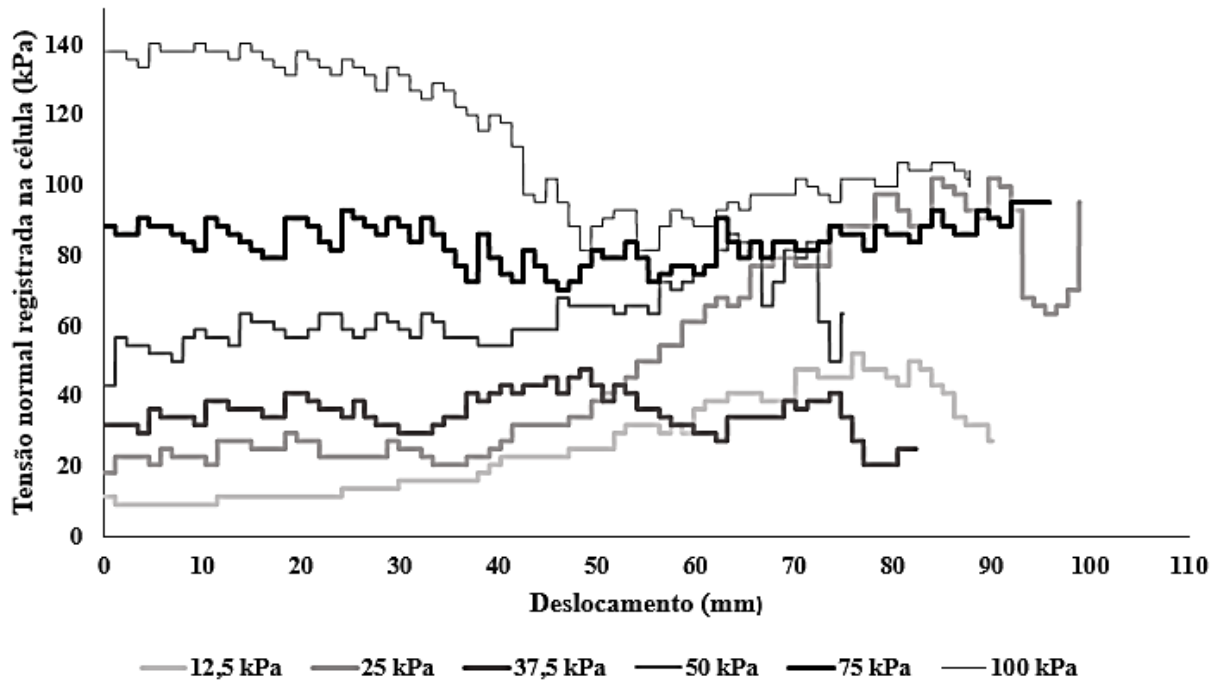
a) Ensaios realizados com AN-200-S



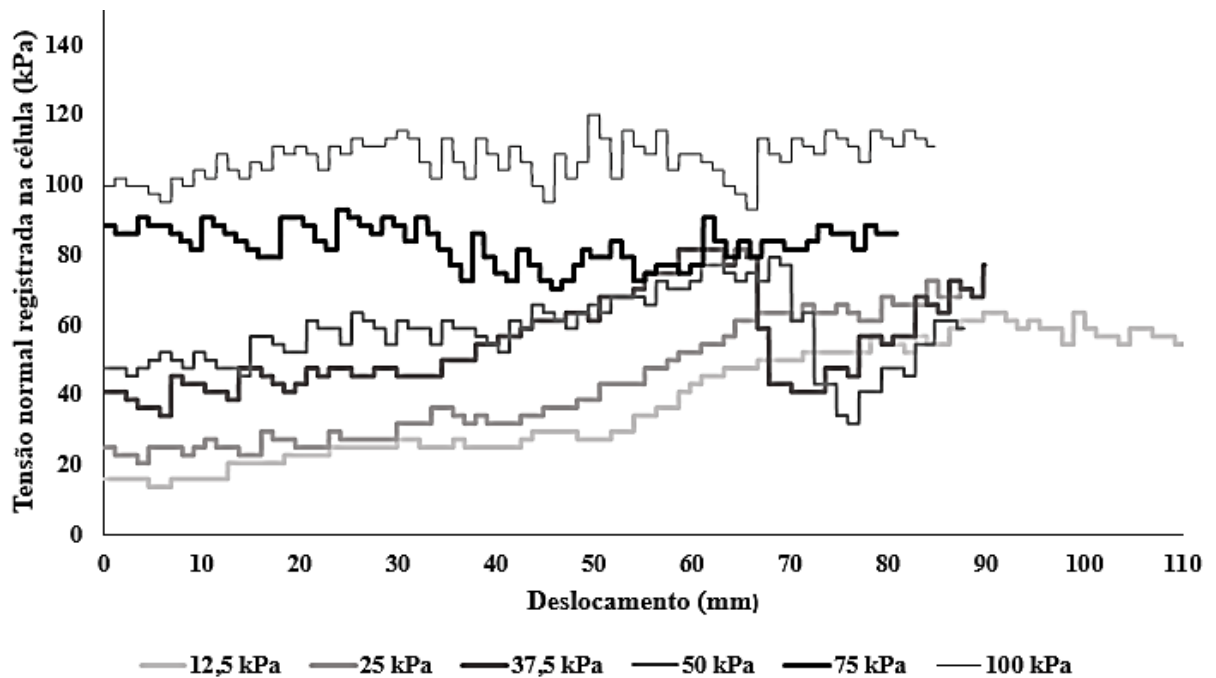
b) Ensaios realizados com ARC-C-200-S



c) Ensaio realizados com ARC-200-S

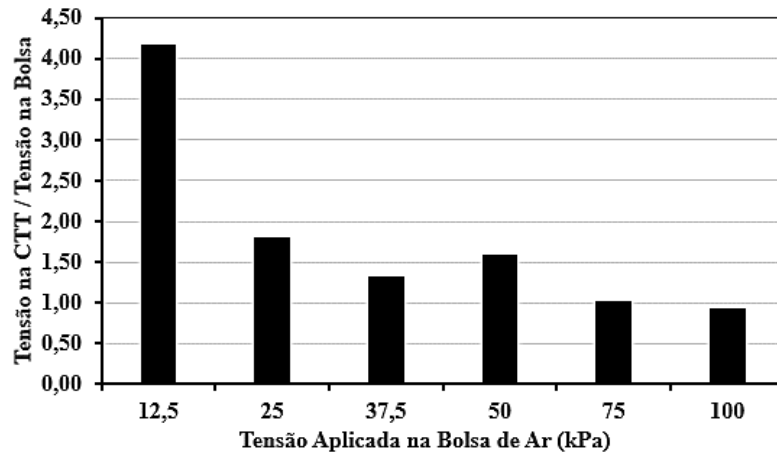


d) Ensaio realizados com ARC-C-200-U

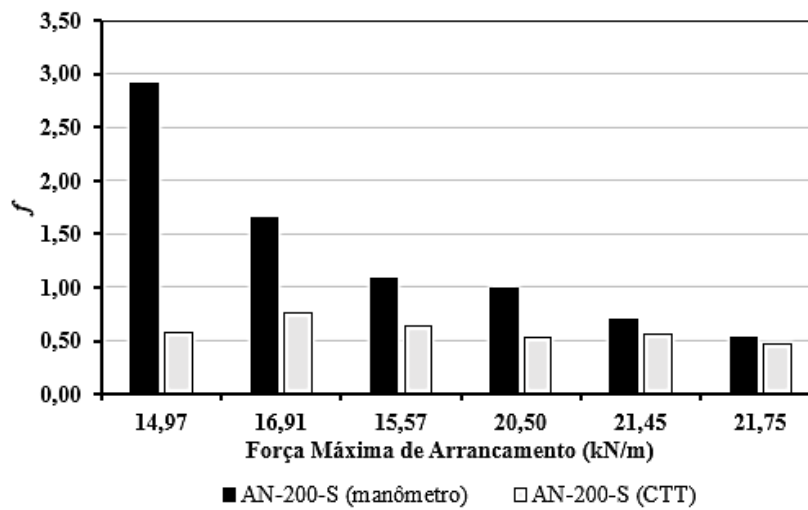


APÊNDICE D – DIFERENÇA ENTRE OS VALORES APLICADOS NA BOLSA DE AR E OS OBTIDOS PELA CTT

a) Ensaios realizados com AN-200-S: a) Tensão normal e b) Coeficiente de Interação

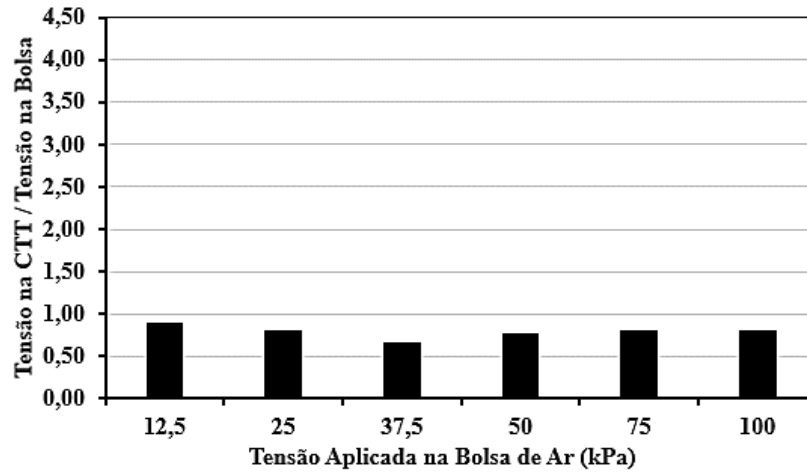


(a)

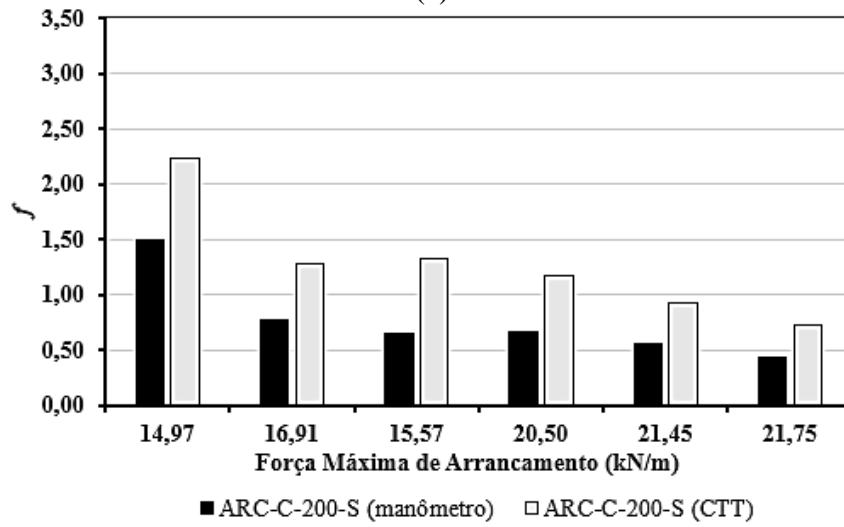


(b)

b) Ensaios realizados com ARC-C-200-S: a) Tensão normal e b) Coeficiente de Interação

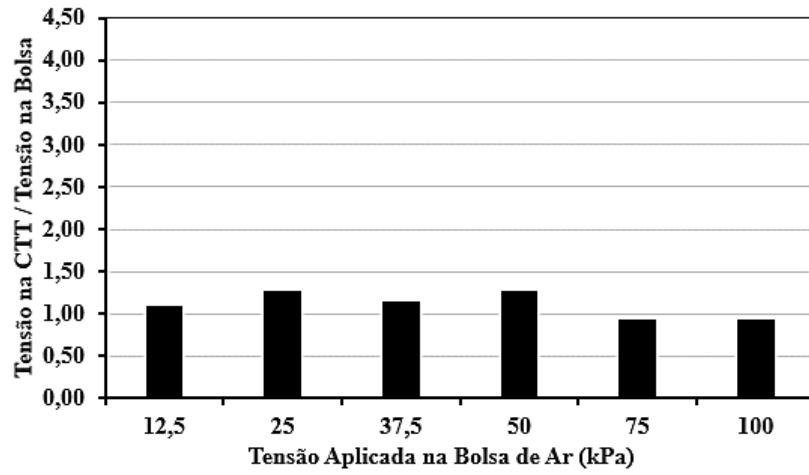


(a)

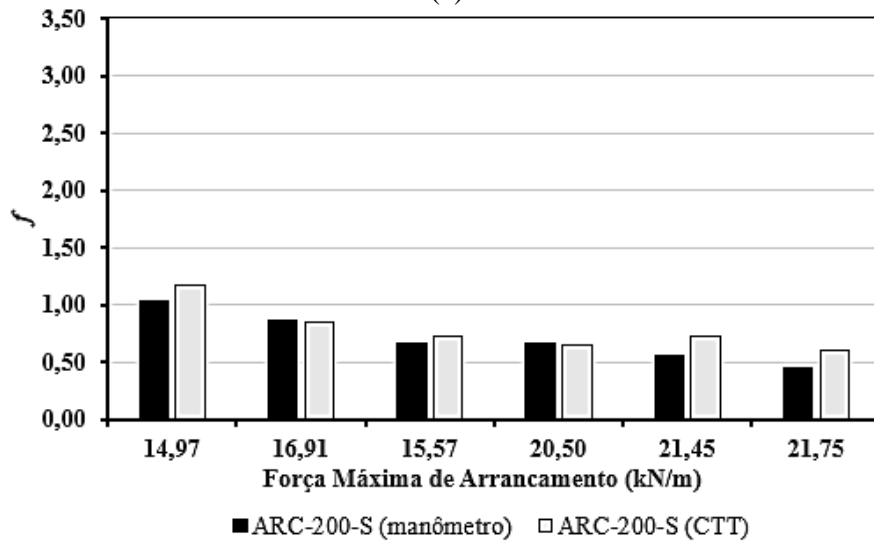


(b)

c) Ensaios realizados com ARC-200-S: a) Tensão normal e b) Coeficiente de Interação

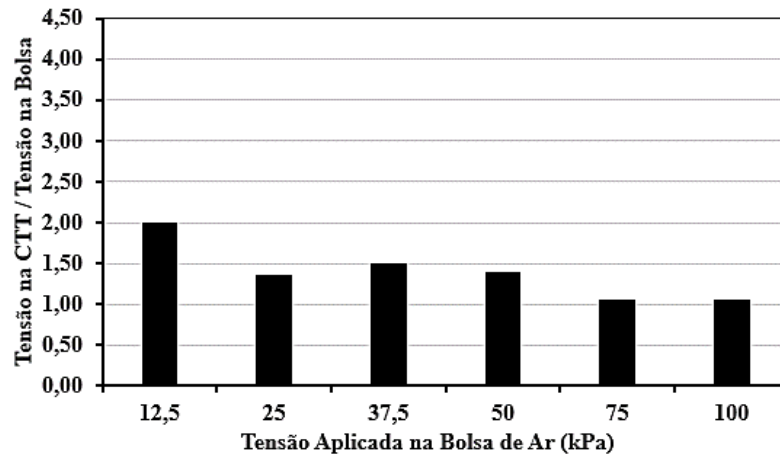


(a)

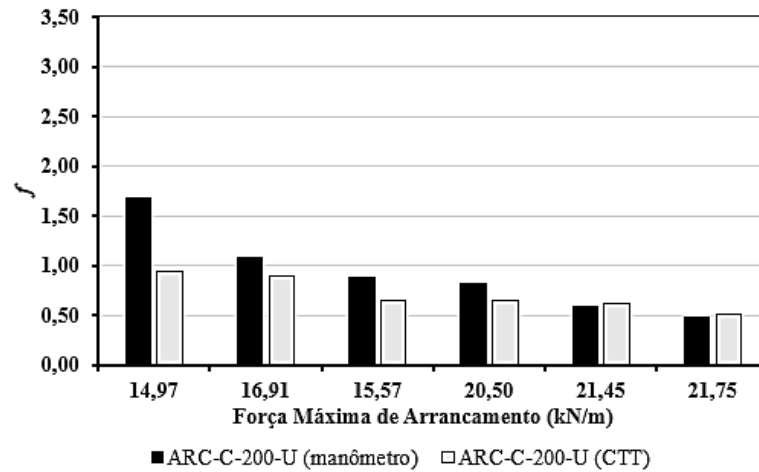


(b)

d) Ensaios realizados com ARC-C-200-U: a) Tensão normal e b) Coeficiente de Interação



(a)



(b)