CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MUROS EM SOLOS REFORÇADOS COM GEOGRELHA E PARAMENTO EM BLOCOS SEGMENTAIS: INFLUÊNCIA DO MATERIAL GRANULAR NA RESISTÊNCIA DE CONEXÃO

AUGUSTO HENRIQUE DINIZ DO CARMO

VARGINHA
2024

AUGUSTO HENRIQUE DINIZ DO CARMO

MUROS EM SOLOS REFORÇADOS COM GEOGRELHA E PARAMENTO EM BLOCOS SEGMENTAIS: INFLUÊNCIA DO MATERIAL GRANULAR NA RESISTÊNCIA DE CONEXÃO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientadora: Prof.ª Drª. Denise de Carvalho Urashima
Coorientadora: Prof.ª Drª. Mag Geisielly Alves Guimarães

VARGINHA
2024

AUGUSTO HENRIQUE DINIZ DO CARMO

MUROS EM SOLOS REFORÇADOS COM GEOGRELHA E PARAMENTO EM BLOCOS SEGMENTAIS: INFLUÊNCIA DO MATERIAL GRANULAR NA RESISTÊNCIA DE CONEXÃO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Data de aprovação: 15/08/2024

Banca examinadora:

gov.br Documento assinado digitalmente
DENISE DE CARVALHO URASHIMA
Data: 26/08/2024 12:04:15-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____
Profa. Titular Denise de Carvalho Urashima, Dra.
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) - Unidade Varginha

gov.br Documento assinado digitalmente
MAG GEISIELLY ALVES GUIMARAES
Data: 26/08/2024 12:11:17-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____
Profa. Mag Geisielly Alves Guimarães, Dra.
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) - Unidade Varginha

gov.br Documento assinado digitalmente
PAULO CESAR MAPPA
Data: 09/09/2024 15:23:38-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____
Prof. Paulo César Mappa, Dr.
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) - Unidade Varginha

gov.br Documento assinado digitalmente
ELINE MORAIS
Data: 27/08/2024 08:49:30-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____
Eng. Especialista. Eline Morais
Geo Soluções

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à toda minha família, fonte inesgotável de amor, apoio e inspiração ao longo desta jornada acadêmica. Em especial, aos meus pais Patrícia e Renato, por estarem sempre presentes e com dedicação e cuidados incessantes comigo. Também dedico ao meu padrasto Marciel e minha madrasta Denise, que enriquecem minha vida com carinho e compreensão. Sou muito feliz em poder compartilhar minha caminhada com vocês.

Especialmente, dedico à minha tia Elaine (*in memoriam*), que certamente também compartilha da felicidade desta etapa vencida, do céu, assim como festejamos minha aprovação no CEFET.

Que tenham esta conquista também como suas, pois sem vocês nada disso seria possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por Sua intensa presença, por me sustentar diante de todas as adversidades dentro e fora do curso e por me apresentar pessoas boas, que Dele me fazem próximo.

Agradeço minha mãe e meu pai, meu padrasto e madrasta, pelo apoio e preocupação depositados em mim. À minha irmã, meus tios e tias, primos e aos meus avós pelo carinho e torcida.

À minha madrinha de oração, Irmã Margarida, que me proporciona imenso suporte em todas as intenções e decisões por meio de suas orações junto as demais irmãs do Carmelo São José.

Aos meus amigos e irmãos, que acompanharam e dividiram toda a caminhada desde o técnico até o final da graduação, e que com absoluta certeza continuarão para toda vida. À minha parceira Loriene, pelo incrível apoio e compreensão durante este período. Estar entre vocês me faz uma pessoa melhor.

Às professoras Denise de Carvalho Urashima e Mag Geisielly Alves Guimarães por toda paciência e confiança desde o início da minha caminhada no CEFET-MG. As suas presenças e orientações me deram mais do que oportunidades, uma nova visão para minha trajetória acadêmica e profissional.

Ao CEFET-MG por todos os bons professores e funcionários, que engrandeceram meu desenvolvimento desde o técnico em edificações, pela estrutura disponibilizada para a realização dos ensaios e por me oportunizar experiências inesquecíveis.

Às empresas Geofoco Geossintéticos, Pedreira Santo Antônio e Geo Soluções por possibilitarem a realização desta pesquisa por meio da doação dos materiais utilizados.

Agradeço a todos com quem pude trabalhar junto neste período, em especial ao Augusto Moreira, que fez parte da realização desta pesquisa e à engenheira Eline Morais pelo suporte.

Por fim, reforço meu agradecimento a todos que caminharam junto de mim até aqui. A conclusão do meu curso não seria possível sem vocês. Muito obrigado.

RESUMO

É primordial aos projetos de engenharia garantir a segurança das estruturas projetadas em sintonia com as diretrizes que norteiam o desenvolvimento sustentável. O emprego de geossintéticos contribui em distintos aspectos para mitigar impactos ambientais, além de reduzir custos. As contenções em solo reforçado com geossintéticos têm ganhado mercado nos últimos anos, devido à possibilidade de estruturas cada vez mais verticalizadas e com vantagens técnicas, econômicas e ambientais, desde que obedecidos critérios de projetos, qualidade de execução e realização de manutenções periódicas. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da granulometria do material de preenchimento dos blocos segmentais empregados como faceamento de estruturas reforçadas com geogrelha a partir de ensaios de resistência de conexão em equipamento que permite a aplicação de forças horizontais e de tensões normais. Foram empregados materiais granulares nas faixas granulométricas de 4,75/12,5 mm (brita 0) e 9,5/25,0 mm (brita 1) provenientes de rocha de gnaisse, blocos segmentais de concreto com encaixe a seco e geogrelha de poliéster de alta tenacidade. Ressalta-se que nesta pesquisa todos os ensaios foram realizados com camada dupla de geogrelha. Cinco tensões normais foram aplicadas para a obtenção das resistências de conexão em ambos os materiais granulares. Os resultados demostraram que maiores resistências foram obtidas para a brita 1 como material de preenchimento em níveis de tensões normais maiores (> 55 kN/m^2), enquanto para tensões menores os valores obtidos foram similares entre as britas 0 e 1, dentro do intervalo de variação do desvio padrão. Neste contexto, destaca-se a importância para a adequada seleção dos agregados graúdos e para possíveis quebras que possam ocorrer com maiores tensões normais. Os resultados alcançados contribuem para melhor compreensão sobre as resistências de conexão em muros de solo reforçados com geossintéticos, uma das soluções para os muitos desafios das obras de engenharia em relação ao compromisso para adoção de práticas sustentáveis, ou seja, em melhor sintonia com os Novos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS).

PALAVRAS-CHAVE: geossintéticos; estrutura de contenção; blocos segmentais; resistência de conexão; desenvolvimento sustentável.

ABSTRACT

Engineering projects must ensure the safety of designed structures in alignment with the guidelines that steer sustainable development. Using geosynthetics contributes to various aspects of mitigating environmental impacts and reducing costs. Geosynthetic reinforced soil containment has gained market traction in recent years due to the feasibility of increasingly vertical structures and technical, economic, and environmental advantages, as long as design criteria, quality of execution, and periodic maintenance are followed. This study aimed to evaluate the influence of the granulometry of the fill material used in segmental blocks employed as the facing of structures reinforced with geogrid through connection strengths tests in equipment that allows the application of horizontal forces and normal stresses. Granular materials from gneiss rock, dry-fit concrete segmental blocks, and high-tenacity polyester geogrid were used in the granulometric ranges of 4.75/12.5 mm (0) and 9.5/25.0 mm (1). Notably, in this research, all tests were conducted with a double layer of geogrid. Five normal stresses were applied to obtain the connection resistances in both granular materials. The results showed higher resistances were obtained for aggregate 1 as fill material at higher levels of normal stresses (> 55 kN/m²). In contrast, for lower stresses, the values obtained were similar between aggregates 0 and 1, within the range of standard deviation variation. Properly selection of coarse aggregates and potential fractures that may occur under higher normal stresses is highlighted in this context. The results achieved contribute to a better understanding of the connection strengths in reinforced soil walls with geosynthetics. This is one solution to the many challenges of engineering works about the commitment to adopting sustainable practices, that is, practices better aligned with the New Sustainable Development Goals (SDGs).

KEYWORDS: geosynthetics; containment structure; segmental blocks; connection strength; sustainable development.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: ODS da Agenda 2030. 2
Figura 2: ODS aplicados aos geossintéticos. 3
Figura 3: Desprendimento de face da estrutura de solo reforçado, primeira ocorrência em janeiro de 2022. 7
Figura 4: Desprendimento de face da estrutura, segunda ocorrência em abril de 2024. 7
Figura 5: Exemplo de geogrelha unidirecional. 10
Figura 6: Mecanismos para verificação das estabilidades externas e geral. 11
Figura 7: Mecanismos para verificação de estabilidade interna. 12
Figura 8: Elementos do sistema de muros em solo reforçado com paramento em blocos segmentais de concreto. 13
Figura 9: Disposição de geogrelha em camada simples. 14
Figura 10: Disposição de geogrelha em camada dupla. 14
Figura 11: Fluxograma das etapas do experimento. 16
Figura 12: Agregados graúdos de granulometria comerciais brita 0 (esquerda) e brita 1 (direita). 17
Figura 13: Geogrelha utilizada no ensaio. 18
Figura 14: Blocos segmentais de concreto. 18
Figura 15: Equipamento desenvolvido por Urashima e Martins (2004). 19
Figura 16: Conexão macho-fêmea. 20
Figura 17: Sistema de aplicação de tensão normal. 21
Figura 18: Detalhe de sistema de pressurização. 21
Figura 19: Detalhe do quadro geral. 22
Figura 20: Posicionamento e preenchimento da primeira fiada. 23
Figura 21: Fixação de geogrelha por meio de parafusos. 23
Figura 22: Elementos de proteção. 24
Figura 23: Curva granulométrica brita 0. 28
Figura 24: Curva granulométrica brita 1. 29
Figura 25: Geogrelhas pós ensaio - Tensão Normal 40 kN/m² - B0. 32
Figura 26: Geogrelha pós ensaio - Tensão Normal 50 kN/m² - B0. 33
Figura 27: Geogrelha pós ensaio - Tensão Normal 60 kN/m² - B0. 34
Figura 28: Geogrelha pós ensaio - Tensão Normal 70 kN/m² - B0. 35

Figura 29: Geogrelha pós ensaio - Tensão Normal 80 kN/m² - B0.....36
Figura 30: Geogrelha pós ensaio - Tensão Normal 40 kN/m² - B1.....40
Figura 31: Geogrelha pós ensaio - Tensão Normal 50 kN/m² - B1.....41
Figura 32: Geogrelha pós ensaio - Tensão Normal 60 kN/m² - B1.....42
Figura 33: Geogrelha pós ensaio - Tensão Normal 70 kN/m² - B1.....43
Figura 34: Geogrelha pós-ensaio - Tensão Normal 80 kN/m² - B1. 44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de geossintéticos. 9
Tabela 2: Fatores de segurança mínimos para métodos de fator de segurança global. 12
Tabela 3: Relação de tensão normal com número de fiadas e altura representada. 25
Tabela 4: Caracterização física dos agregados graúdos. 28
Tabela 5: Resultados de Resistência de Conexão Bloco-Geogrelha - Brita 0. 30
Tabela 6: Resultado de deformações e módulos de rigidez para resistências de conexão - Brita 0. 31
Tabela 7: Resultados de Resistência de Conexão Bloco-Geogrelha - Brita 1. 38
Tabela 8: Resultado de deformações e Módulo de Rigidez para resistências de conexão - Brita 1. 38
Tabela 9: Comparativo entre resistências de conexão para brita 0 e brita 1. 46

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Diagrama de caixas - Resistência de conexão em função da tensão normal - Brita 0. 31
Gráfico 2: Curva resistência de conexão (kN/m) por deformação (%) - Tensão Normal 40kN/m² - B0. 32
Gráfico 3: Curva resistência de conexão (kN/m) por deformação (%) - Tensão Normal 50 kN/m² - B0. 33
Gráfico 4: Curva resistência de conexão (kN/m) por deformação (%) - Tensão Normal 60 kN/m² - B0. 34
Gráfico 5: Curva resistência de conexão (kN/m) por deformação (%) - Tensão Normal 70 kN/m² - B0. 35
Gráfico 6: Curva resistência de conexão (kN/m) por deformação (%) - Tensão Normal 80 kN/m² - B0. 36
Gráfico 7: Relação linear da resistência de conexão em função das tensões normais para brita 0. 37
Gráfico 8: Diagrama de caixas resistência de conexão em função da tensão normal - Brita 1. 39
Gráfico 9: Curva resistência de conexão (kN/m) por deformação (%) - Tensão Normal 40 kN/m² - B1. 40
Gráfico 10: Curva resistência de conexão (kN/m) por deformação (%) - Tensão Normal 50 kN/m² - B1. 41
Gráfico 11: Curva resistência de conexão (kN/m) por deformação (%) - Tensão Normal 60 kN/m² - B1. 42
Gráfico 12: Curva resistência de conexão (kN/m) por deformação (%) - Tensão Normal 70 kN/m². 43
Gráfico 13: Curva resistência de conexão (kN/m) por deformação (%) - Tensão Normal 80 kN/m² - B1. 44
Gráfico 14: Relação linear de resistência de conexão em função das tensões normais aplicadas - Brita 1. 45
Gráfico 15: Diagrama de caixa de resistências de conexões obtidas em relação às tensões normais - agrupado. 46

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS 1
1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA 5
1.2.1. Objetivo geral 5
1.2.2. Objetivos específicos 5
1.3. JUSTIFICATIVA 5
2. REVISÃO DA LITERATURA 8
2.1. GEOSSINTÉTICOS 8
2.1.1. Geogrelhas 9
2.2. CONTENÇÕES EM SOLO REFORÇADO COM GEOSSINTÉTICO 10
2.2.1. Muros de solo reforçado com faceamento em blocos segmentais de concreto 12
3. MATERIAIS E MÉTODOS 16
3.1. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL 16
3.2. AGREGADO GRAÚDO DE PREENCHIMENTO 16
3.3. GEOGRELHA 17
3.4. BLOCOS SEGMENTAIS 18
3.5. EQUIPAMENTO 19
3.5.1. Sistema de aplicação de força horizontal (A) 19
3.5.2. Sistema de aplicação de tensão normal (B) 20
3.5.3. Mecanismo de leitura, aquisição e armazenamento de dados (C) 21
3.6. PROCEDIMENTO DE ENSAIODE DESEMPENHO DE CONEXÃO 22
3.6.1. Montagem e realização de ensaio 22
3.6.2. Obtenção e tratamento de dados 25
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 28
4.1. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL GRANULAR 28
4.2. RESISTÊNCIA DE CONEXÃO BLOCO-GEOGRELHA - BRITA 0 30
4.3. RESISTÊNCIA DE CONEXAO BLOCO-GEOGRELHA – BRITA 1 37
4.4. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE GRANULOMETRIAS 45
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 48
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS 48
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 49

REFERÊNCIAS.....50

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O crescimento contínuo da população mundial, embora a um ritmo mais lento do que em qualquer momento desde 1950, devido à redução dos níveis de fertilidade da última década, concomitante a intensificação do fenômeno da urbanização, fomentam vários impactos para a sociedade humana, bem como para o seu ambiente de vida (Li *et al*., 2022; United Nations, 2019).

Ressalta-se que as áreas urbanas são reconhecidas como expressivas contribuintes para as emissões de gases efeito estufa (GEE), tal como dióxido de carbono, que trazem distintos impactos sobre nosso planeta, tais com aquecimento global, desertificação, subida do nível do mar, eventos climáticos extremos, entre outros (Huang; Matsumoto, 2021).

Ao longo das últimas décadas, diversas conferências mundiais trataram de ações no sentido de refletir sobre a relação entre o ambiente e o desenvolvimento global, bem como para conscientizar a humanidade sobre a necessidade de mudanças de atitudes. Destacam-se como marcos iniciais a Conferência da Biosfera (Paris, 1968) e na sequência a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente, que ocorreu em Estocolmo em 1972. A definição do termo “desenvolvimento sustentável” se deu em 1987, com a divulgação do Relatório *Brundtland*, desenvolvido pela Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD), também conhecida como Comissão de *Brundtland* (Barbieri, 2020; Ipiranga; Godoy; Brunstein 2011).

Como resultado das recomendações do Relatório de *Brundtland* e da Conferência de Estocolmo, foram realizadas a Cúpula da Terra (Rio 92), que resultou no desenvolvimento da Agenda 21 (1992), a Cúpula da Terra + 5 (1997), a Cúpula do Milênio (2000) com a apresentação dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável do Milênio, a Rio +10 (2002) e a Rio +20 (2012), entre outras (Nações Unidas Brasil, 2020).

Em 2015, a Organização das Nações Unidas estabeleceu a Agenda 2030, um documento que preconiza 17 Novos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), conforme apresentado na Figura 1, bem como 169 metas de desenvolvimento sustentável e a contextualização de vários dos desafios mais prementes do mundo, desde a erradicação da pobreza até a proteção do meio ambiente (Nações Unidas Brasil, 2015).

Figura 1: ODS da Agenda 2030.



Fonte: Nações Unidas Brasil (https://brasil.un.org/pt-br/sdgs).

As diferentes ações antrópicas sobre o meio físico e geológico com a finalidade de atender as necessidades da humanidade demandam que a Engenharia Civil esteja atenta para distintos desafios, dentre esses fomentar soluções em sintonia com os Novos ODS para minimizar prejuízos socioambientais e econômicos às gerações atual e futura (Guimarães; Urashima, 2023).

As obras de Engenharia Civil devem ter como premissa a anuência com o desenvolvimento sustentável, desde seu planejamento e projeto até sua execução, de forma a visar medidas que previnem, mitigam e compensam impactos que podem ser provocados pelas obras (Gusmão Filho, 2006).

Geossintético é um termo genérico, no qual o prefixo “geo”, faz referência ao seu emprego para melhoria de desempenho de obras geotécnicas e o sufixo “sintético” refere-se ao fato desses materiais serem quase que exclusivamente provenientes de processos de fabricação humana (Koerner; Soong, 2001). São materiais poliméricos, geralmente derivados de petróleo, que representam diferentes produtos que fazem parte de projetos, estruturas ou sistemas da Engenharia Geotécnica/Civil (Shukla; Yin, 2006; ABNT NBR 10318-1, 2021). Os geossintéticos possibilitam melhoria na qualidade de vida por meio de projetos que vão ao encontro do desenvolvimento sustentável (Guimarães; Urashima, 2023).

A aplicação dos geossintéticos proporciona importante papel em práticas sustentáveis que se alinham aos ODS preconizados na Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), dos quais se destacam as atividades que agregam a universalização da alimentação, proteção ao meio ambiente, desenvolvimento

econômico, conexão entre pessoas, combate e tratamento de catástrofes naturais e qualidade de água, conforme exemplificado na Figura 2 (International Geosynthetics Society, 2021; Touze, 2021).

Figura 2: ODS aplicados aos geossintéticos.



Fonte: Touze, 2021, adaptado.

As obras com o uso de elementos de reforço de solo com material sintético se desenvolveram entre os anos 1960 e 1970, com o emprego de geotêxteis, um tipo de geossintético. No Brasil, o uso destes materiais teve início em 1970, entretanto a partir da década de 1990, o maior conhecimento sobre as distintas aplicações desse material fomentou a aceleração no emprego destes, principalmente pela reativação da Comissão de Geossintéticos da Associação Brasileira de Mecânica dos Solos (ABMS), com a realização do I Simpósio Brasileiro de Geossintéticos e a criação da

International Geosynthetics Society (IGS) – Brasil, que tem grande importância na propagação dos conhecimentos em geossintéticos (Palmeira, 2018).

Dentre as distintas aplicações dos geossintéticos, esta pesquisa traz em destaque a função de reforço, que visa a melhoria do comportamento mecânico do solo por meio de suas características de tensão-deformação (ABNT NBR ISO 10318-1, 2021). Conceitualmente, um solo reforçado se apresenta como um maciço terroso que tem suas características mecânicas melhoradas pela inclusão de distintos materiais, ou seja, fibras vegetais, elementos metálicos, poliméricos, entre outros. Este sistema é composto por solo, reforço e ainda podem apresentar elementos de face (paramento) (ABNT NBR 16920-1, 2021).

Estruturas em solos reforçados com geogrelhas podem apresentar diversos materiais em seu faceamento, um destes são os blocos segmentais de concreto preenchidos com material granular (ABNT NBR 16920-1, 2021; Paulino, 2022). A geogrelha, um tipo de geossintético, apresenta estrutura plana, de malha aberta e regular, assim como constituída por elementos de tração completamente conectados (ABNT NBR ISO 10318-1, 2021).

A interação entre a geogrelha e o bloco segmental de concreto no sistema de solo reforçado garante que as tensões de tração sofridas pela geogrelha sejam transferidas ao faceamento em blocos preenchidos por material granular, sem que haja ruptura do reforço ou escorregamento dos mesmos. Neste contexto, há a necessidade de ponderação do desempenho dos materiais utilizados e da interface entre esses materiais (Urashima; Martins, 2004).

A determinação do desempenho de conexão entre blocos segmentais e geogrelhas é avaliada por meio da correlação entre a força de conexão e a pressão de confinamento do sistema em ensaio preconizado pela ASTM D-6638-01 (2018). O parâmetro obtido (resistência de conexão) é utilizado para a verificação da estabilidade local de uma estrutura de contenção, com o objetivo de evitar deformações excessivas diante da aplicação das tensões de trabalho (Pinto, 2015).

Este trabalho apresenta uma contribuição à compreensão sobre solo reforçado com emprego de geogrelhas dispostas em camada dupla, por meio da análise das resistências de conexão do sistema bloco, material granular e geogrelha, obtidas em campanhas de ensaios de laboratório, de forma que a variável em análise é a influência da granulometria agregado graúdo de preenchimento do bloco segmental.

1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA

1.2.1. Objetivo geral

Avaliar as diferenças na resistência de conexão no sistema bloco-agregado-geogrelha, ao utilizar como material de preenchimento dos blocos segmentais, duas faixas granulometrias distintas, 4,75/12,5 mm e 9,5/25,0 mm, comercialmente conhecidas como brita 0 e brita 1, respectivamente.

1.2.2. Objetivos específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- caracterizar os agregados graúdos antes e após ensaios de resistência de conexão;
- realizar ensaios de resistência de conexão com preenchimento dos blocos com as duas granulometrias distintas de material granular;
- realizar ensaios de conexão em diferentes níveis de tensão normal;
- avaliar fatores de influência no desempenho da resistência de conexão;
- empregar ferramentas estatísticas para avaliar os resultados obtidos.

1.3. JUSTIFICATIVA

A crescente demanda em obras geotécnicas, bem como a necessidade de otimização de uso e ocupação de solo, tem exigido o desenvolvimento de novas tecnologias de materiais e processos executivos nas obras de engenharia.

Afiançar segurança as obras é um dos objetivos diretos da Engenharia Civil, que alinhada com economia e uso racional de recursos, influenciam diretamente na qualidade do produto final. As obras de solo reforçado com geossintéticos estão em expansão juntamente com a inovação em produtos e processos, visto que permitem maior qualidade, menor tempo de execução, mão-de-obra qualificada, maior versatilidade e melhor aderência aos Novos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável se comparados com estruturas convencionais de concreto armado, por exemplo, visto que permitem melhorias em relação ao ciclo de vida da estrutura, seja pelo aumento da longevidade ou diminuição de manutenções, redução nas emissões de gases do efeito estufa (GEE) e viabilizam obras com menores impactos ambientais, por meio da redução do emprego de recursos naturais (Koerner, 2019).

Neste contexto, muros de solos reforçados com geossintéticos têm sido empregados como uma solução que pode ser encontrada desde obras de pequeno porte, como residências, até obras de grande porte, como acessos em áreas de mineração, condomínios logísticos, ferrovias, rodovias, entre outras obras de infraestrutura (Brugger *et.al*., 2005; Christopher, 2014).

O conhecimento dos parâmetros de dimensionamento dos muros em solo reforçado se torna cada vez mais exigente diante da crescente demanda de soluções que alinhem alturas elevadas, custo atrativo, vantagens construtivas, estética e soluções que versam ao desenvolvimento sustentável e suas premissas.

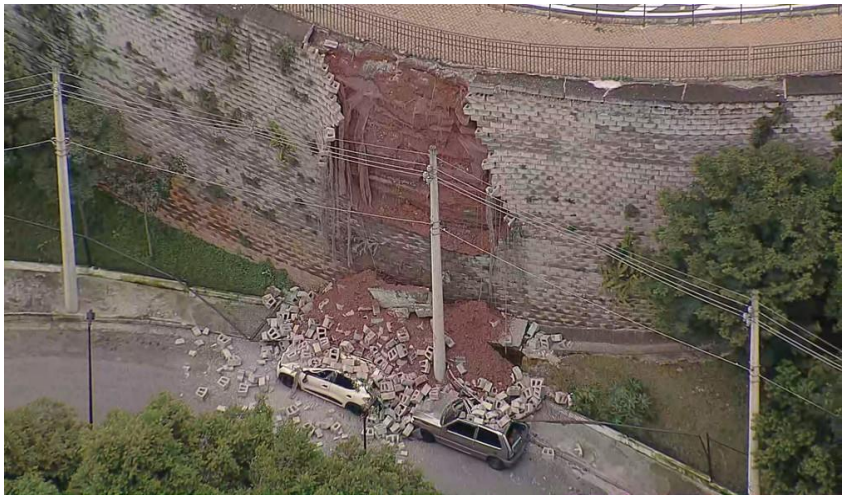
Um dos parâmetros que devem ser avaliados para garantir a segurança em projetos de engenharia ao se utilizar solo reforçado com geogrelha e faceamento em blocos segmentais de concreto é a resistência de conexão entre bloco e geogrelha. A resistência de conexão deve garantir a transferência de esforços de tração provenientes do reforço para a face (Ehrlich; Becker, 2009).

Falhas de dimensionamento destas estruturas de contenção em relação à resistência de conexão podem ocasionar deformações acima dos valores esperados no faceamento, bem como desprendimento do mesmo do maciço reforçado, de forma que a negligência deste parâmetro pode ocasionar em falhas na contenção.

A exemplo do desprendimento do faceamento, há a ocorrência de dois eventos em uma mesma estrutura de solo reforçado com face em blocos segmentais na Zona Sul da cidade de São Paulo – SP. O primeiro fato ocorreu em janeiro de 2022 (Figura 3), e atingiu dois carros estacionados abaixo da estrutura e, após realização de manutenção, a mesma apresentou novo desprendimento em abril de 2024. Na Figura 4, é possível identificar a área onde foi realizado reparo do primeiro evento de desprendimento da face da estrutura. As possíveis causas podem estar relacionadas com falhas no sistema de conexão e/ou de drenagem da estrutura, visto que os eventos ocorreram em períodos de chuva na região.

Embora o deslocamento e queda dos blocos de faceamento não tenham afetado a estrutura de solo reforçado, a situação notoriamente representa uma ameaça potencial à segurança do local.

Figura 3: Desprendimento de face da estrutura de solo reforçado, primeira ocorrência em janeiro de 2022.



Fonte: G1, 2022 (https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2022/01/13/muro-de-condominio-na-zona-sul-de-sp-desaba-e-esmaga-carros-estacionados-na-rua.ghtml).

Figura 4: Desprendimento de face da estrutura, segunda ocorrência em abril de 2024.



Fonte: G1, 2024 *(*https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2024/04/02/mur-na-zona-sul-de-sp-volta-a-cair-tres-meses-apos-desabar-e-esmagar-carros-estacionados.ghtml*).*

Os resultados obtidos neste trabalho deverão conduzir a uma melhor compreensão sobre a resistência de conexão, quando se empregam blocos segmentais no faceamento de estruturas de contenção, dentro dos limites impostos na campanha de ensaios, por meio do tratamento dos valores obtidos durante campanha experimental.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. GEOSSINTÉTICOS

Os geossintéticos são materiais produzidos a partir de um polímero sintético ou natural, constituem um conjunto de distintos produtos, tais como: geotêxteis, geogrelhas, georredes, geomembranas, geocompósitos, entre outros, e que são utilizados junto ao solo em obras de engenharia civil e geotécnica. Com formato variado, ou seja, tiras, mantas ou mesmo estruturas tridimensionais, estes materiais podem desempenhar diferentes funções como: reforço, filtração, drenagem, separação, controle de erosão superficial, barreira, alívio de tensões, proteção e estabilização. (ABNT NBR ISO 10318-1, 2021; Lopes; Barroso, 2024).

Apesar da possibilidade de emprego de materiais a base de fibras naturais como fibras de algodão e coco, os geossintéticos produzidos com polímeros sintéticos se destacam pela sua durabilidade, de forma que materiais de caráteres naturais se tornem opções complementares às soluções sintéticas, a fim de suprir necessidades de obras temporárias (Shukla; Yin, 2006).

Os geossintéticos são produzidos com distintos polímeros, tais como: policloreto de vinila (PVC), poliamida (PA), poliéster (PET), polietileno (PE), polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno de alta densidade (PEAD) e polipropileno (PP), entre outros. Os geossintéticos possuem ainda em sua constituição aditivos e estabilizantes para melhorar as características dos mesmos (Vertematti, 2015).

A Tabela 1, confeccionada por Sousa (2023), apresenta os quatro grupos de geossintéticos: geotêxteis (GTX), produtos correlatos aos geotêxteis (GTP), barreiras geossintéticas (GBR) e geocompostos (GCO). Para cada grupo, é apresentado os tipos de geossintéticos e suas respectivas descrições baseadas na literatura (ABNT NBR ISO 10318-1, 2021).

Neste trabalho, destaca-se a utilização das geogrelhas (GGR), que cumprem função de reforço e que faz uso do seu comportamento tensão-deformação para melhorar as características mecânicas do solo ou de outros materiais. Desempenham a mesma função os geotêxteis, geocélulas e geocompostos, os dois últimos produtos são menos utilizados em estruturas de contenção ou solo reforçado.

Tabela 1: Tipos de geossintéticos.

Grupos	Tipos	Descrição (ABNT NBR ISO 10318-1, 2021; Vertematti, 2015)
Geotêxteis (GTX)	Não tecidos (GTX-NW) Tecidos (GTX-W) Tricotados (GTX-K)	Material têxtil polimérico, plano, permeável, utilizados em controles de erosões, filtração, drenagem e proteção.
Produtos correlatos aos geotêxteis (GTP)	Geogrelhas (GGR)	Estrutura plana de malha aberta e retangular empregados como elementos de reforço
	Geomantas (GMA)	Material tridimensional permeável, polimérico sintético ou natural, com grande quantidade de vazios em sua estrutura. Sua principal função é o controle de erosão
	Geotira (GST)	Apresenta forma de uma tira de largura não superior a 20 cm. Utilizado em contato com solo ou outro material de construção
	Georredes (GNT)	Possui a estrutura semelhante à geogrelha, porém, sua principal função é de drenagem. Diferente das geogrelhas, a disposição de sua malha possui ângulos variados.
	Geoespaçadores (GSP)	Estrutura tridimensional com espaços de ar interconectados. Usados em contato com o solo e/ou outros materiais
	Geocélulas (GCE)	Estrutura tridimensional similar a favos de mel, as células podem ser preenchidas com areia, brita, concreto ou solo. As principais funções são controle de erosão, proteção de taludes e reforço de solos moles.
	Geoblanket (GBL)	Estrutura permeável de fibras soltas e elementos geossintéticos unidos para formar uma camada contínua
Barreiras geossintéticas (GBR)	Poliméricas (GBR-P)	Produzida em forma de lâmina com a função barreira desempenhada por polímeros
	Argilosas (GBR-C)	Produzida em forma de lâmina com a função barreira desempenhada por argila
	Betuminosas (GBR-B)	Produzida em forma de lâmina com a função barreira desempenhada por betume
Geocompostos (GCO)		São produtos formados por pelo menos dois materiais geossintéticos ou a união de algum material natural com um geossintético. São caracterizados de acordo com a função projetada

Fonte: Sousa (2023).

2.1.1. Geogrelhas

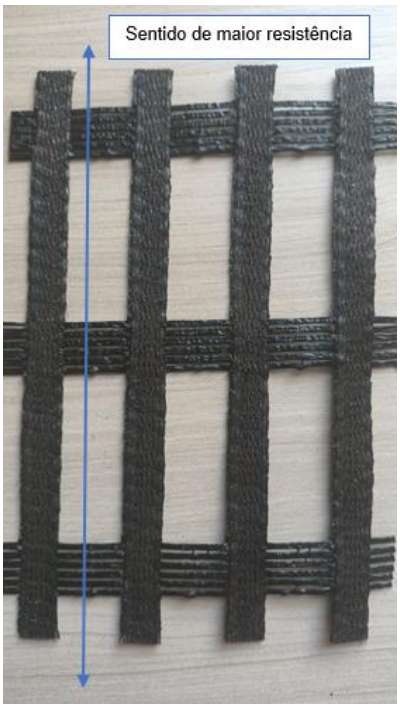
Essa pesquisa emprega um tipo de geossintético designado como geogrelhas (GGR), que são estruturas planares de malha aberta e regular, com elementos de tração completamente conectados que podem ser fabricados por meio de união por extrusão, solda ou entrelaçamento, cujas aberturas presentes são maiores que os elementos que o constituem (ABNT NBR ISO 10318-1, 2021).

Para utilização de geogrelhas em reforços, estas devem ser devidamente resistentes ao tipo de solo em que haverá sua aplicação, quanto ao seu pH, apresentar

resistência ao calor, aos raios ultravioletas (UV) e a ataques de bactérias e fungos presentes no solo (Kim *et al.,* 2019).

As geogrelhas podem ser unidirecionais, caso sua maior resistência à tração se apresente em um dos sentidos, ou bidirecionais, caso sua resistência à tração se apresente em ambos os sentidos. A geogrelha utilizada nos ensaios que serão apresentados neste trabalho é unidirecional, com sua resistência à tração maior no sentido longitudinal, conforme exemplificado na Figura 5.

Figura 5: Exemplo de geogrelha unidirecional.



Fonte: Do autor.

2.2. CONTENÇÕES EM SOLO REFORÇADO COM GEOSSINTÉTICO

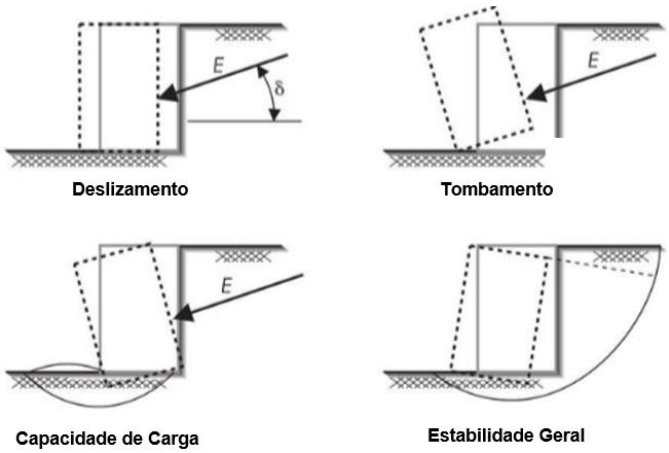
O solo, quando compactado de forma adequada, apresenta melhorias relativas as suas propriedades mecânicas, tais como resistência ao cisalhamento e à compressão, mas o mesmo não ocorre quanto a resistência à tração. A reduzida resistência à tração do solo pode ocasionar deformações devido a seu peso próprio ou a carregamentos externos. A inclusão de elementos geossintéticos, como as geogrelhas, possibilita o suprimento da carência de resistência à tração do solo, pois estes elementos passam a atuar como receptores da transferência dos carregamentos de tração por meio de sua interação com o solo (ABNT NBR 16920-1, 2021).

Historicamente, a melhoria das propriedades do solo é realizada desde os primórdios da civilização com o emprego de materiais naturais, como fibras vegetais, bambu, entre outros. O avanço das técnicas construtivas na área da geotecnia contou com importante fato na década de 60, com o desenvolvimento do sistema “Terra Armada” por Henry Vidal, cuja proposta consiste na inclusão de tiras metálicas em maciços terrosos, a fim de proporcionar resistência à tração em obras de terra. Desde então, o avanço tecnológico nos materiais e sistemas construtivos possibilitaram a utilização de novos materiais, em especial os geossintéticos (Benjamim, 2006; Vertematti, 2015).

A conceituação de solo reforçado, pela ABNT NBR 16920-1 (2021), passa pela inclusão do reforço resistente à tração ao conjunto formado por três elementos: solo, reforço e face. Como elementos de reforço, são considerados tanto os geossintéticos, quanto elementos metálicos, que visam limitar os deslocamentos e garantir estabilidade adequada (ABNT NBR 16920-1, 2021).

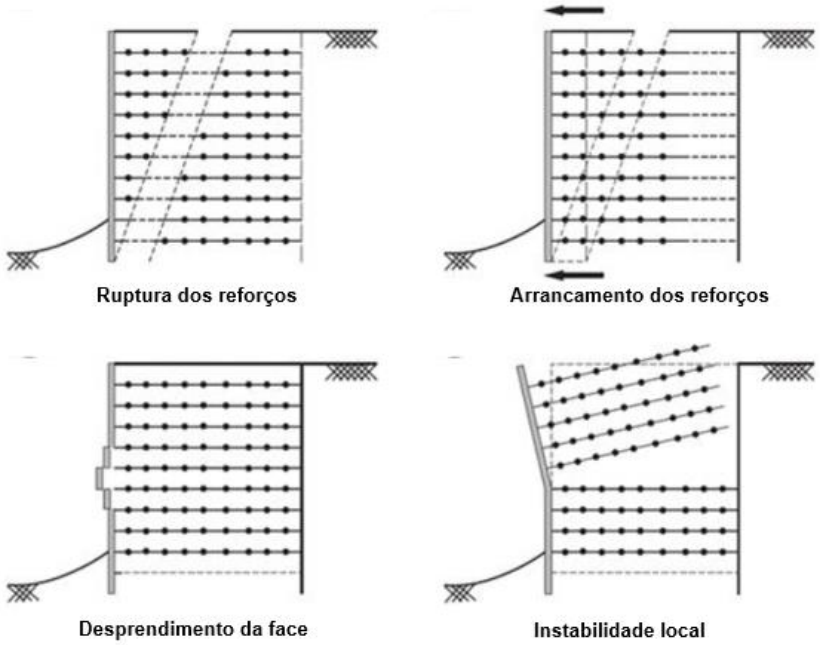
Neste contexto, para cumprir condições de segurança, são estabelecidas três verificações de estabilidade pela ABNT NBR 16920-1 (2021): estabilidade interna, externa e geral. A estabilidade interna é verificada por meio do arrancamento, desprendimento da face e ruptura dos reforços; a estabilidade externa trata da capacidade de carga de fundação, tombamento e deslizamento da base; já a estabilidade geral (ou global) considera a estrutura junto ao seu meio, e avalia possíveis superfícies de ruptura que podem ou não interceptar os reforços. Tais verificações são exemplificadas nas Figuras 6 e 7.

Figura 6: Mecanismos para verificação das estabilidades externas e geral.



Fonte: Vertematti, 2015. Adaptado pelo autor.

Figura 7: Mecanismos para verificação de estabilidade interna.



Fonte: Ehrlich; Becker, 2020. Adaptado pelo autor.

A ABNT NBR 16920-1 (2021) apresenta, também, os fatores de segurança mínimos para análises de estabilidade, que são dispostos na Tabela 2, os quais consideram os esforços solicitantes e níveis de segurança mínimos requeridos pela norma.

Tabela 2: Fatores de segurança mínimos para métodos de fator de segurança global.

Estabilidade	Mecanismo	Fator de segurança global mínimo
Externa	Tensão admissível na fundação	2,0 no bordo mais carregado
	Deslizamento	1,5
	Tombamento	2,0
Interna	Ruptura estrutural do reforço	1,5
	Arrancamento do reforço	1,5
Geral	***	Conforme nível de segurança requerido
Conexão com o paramento	***	1,5

Fonte: ABNT NBR 16920-1, 2021 (Adaptada pelo autor).

2.2.1. Muros de solo reforçado com faceamento em blocos segmentais de concreto

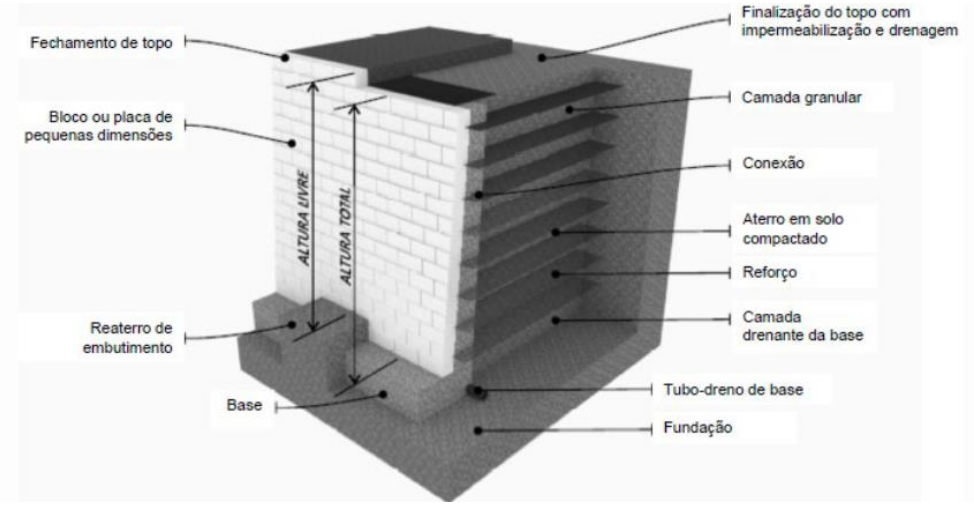
Parte das contenções em solo reforçado executadas no Brasil tem sua face envelopada, ou seja, a face do maciço se dá pela dobra do reforço em torno da camada de solo compactada, situação em que comumente são utilizados os

geotêxteis como elementos de reforço. Apesar do uso deste método construtivo, o solo envelopado, como é conhecido, vem sendo substituído pelo uso de muros de contenção com faceamento e reforçados com geogrelha, de forma a melhorar a estética e a qualidade final da obra, além de reduzir as deformações na face (Brugger *et al*., 2005).

Os blocos segmentais de concreto, estrutural ou não, são uma alternativa de faceamento de muros de contenção em solo reforçado, com o objetivo de evitar erosão do maciço terroso, e permitir a execução em grandes inclinações, que podem chegar próximas aos 90°. Os blocos são posicionados de maneira manual, com a intercalação de suas fiadas aos reforços, como pode ser observado na Figura 8 (ABNT NBR 16920-1, 2021).

Os blocos segmentais apresentam aberturas centrais e podem contar com pinos e ressaltos para o travamento entre blocos. Entretanto, a principal função das aberturas centrais nos blocos segmentais é a de drenagem da face. O preenchimento dos vazios dos blocos segmentais é realizado com material granular classificado como agregado graúdo, com dimensões máximas características entre a malha 75mm/4,75 mm e do tipo pedras britadas (ABNT NBR 7211, 2022; ABNT NBR 9935, 2011).

Figura 8: Elementos do sistema de muros em solo reforçado com paramento em blocos segmentais de concreto.



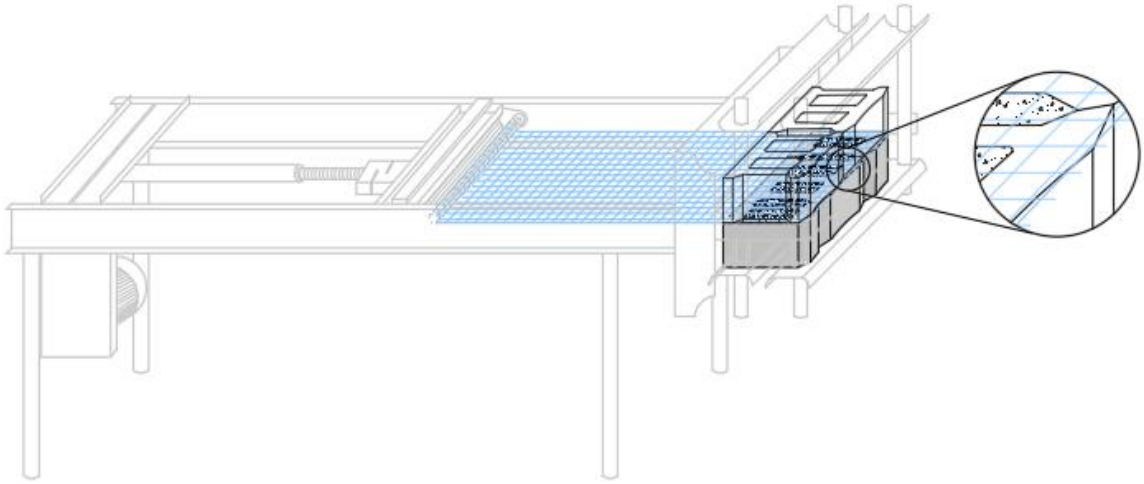
Fonte: ABNT NBR 16920-1 (2021).

Diversos modelos de blocos segmentais de concreto estão disponíveis no mercado, principalmente pelo destaque desta alternativa devido aos custos competitivos e à estética atrativa. É possível encontrar diferentes tamanhos e

acabamentos, que os tornam escolhas não só estruturais como também arquitetônicas.

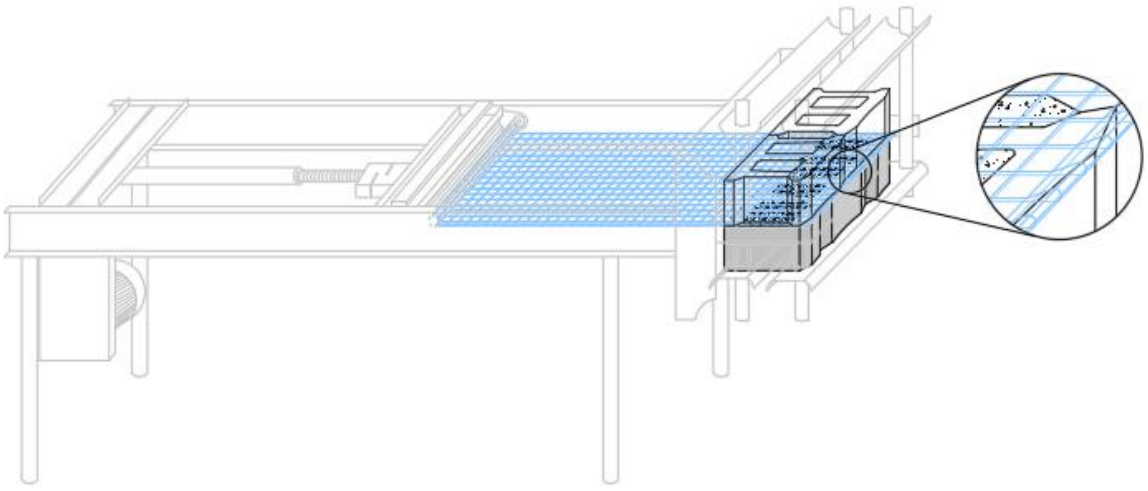
A integração entre os blocos segmentais de concreto e as geogrelhas é feita por meio da sobreposição dos blocos, que garante a conexão entre estes elementos. O posicionamento da geogrelha pode ser feito em camada simples ou dupla, respectivamente ilustradas nas Figuras 9 e 10.

Figura 9: Disposição de geogrelha em camada simples.



Fonte: Do autor.

Figura 10: Disposição de geogrelha em camada dupla.



Fonte: Do autor.

A sobrecarga ocasionada pela tensão normal exercida pelos blocos segmentais de concreto na geogrelha pode resultar em resistência de conexão menor que a resistência da geogrelha e, por este motivo, a dupla camada tem sido utilizada em

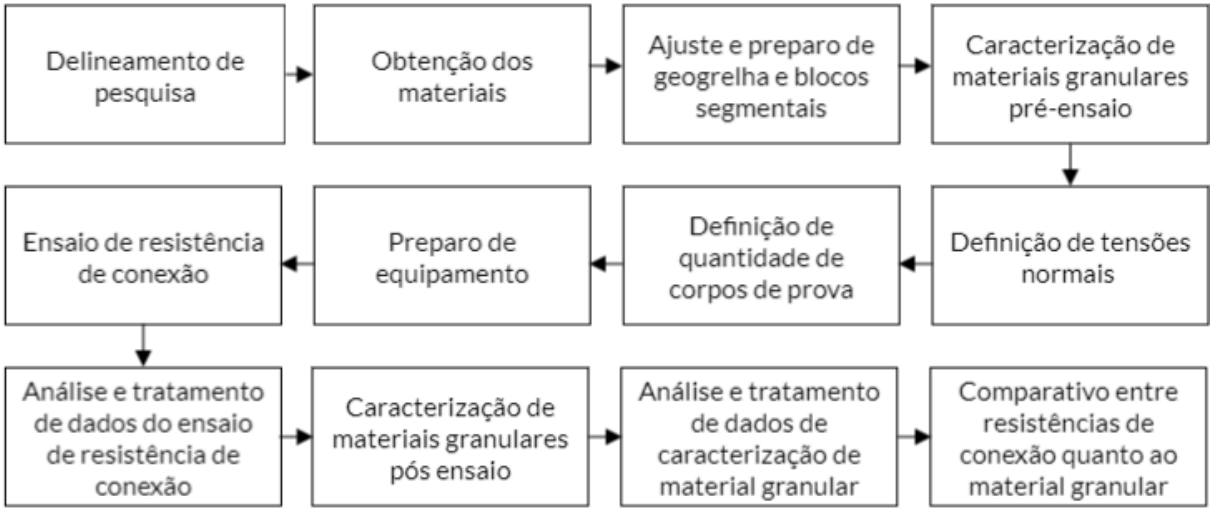
obras cuja altura é superior à 5,0 metros (Brugger *et al*., 2005). A disposição das geogrelhas em dupla camada proporciona ganhos de resistência de conexão que superam em 40% dos valores obtidos em avaliações realizadas com camada simples (Almeida; Toma, 2011; Pinto, 2015; Sousa, 2023).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios de resistência de conexão entre blocos segmentais, geogrelhas e agregados foram realizados no Complexo Laboratorial do curso de Engenharia Civil do CEFET-MG, Campus Varginha. Foram delimitados os materiais e métodos a fim de entender a influência do material granular no ganho de resistência de conexão por meio de ensaio preconizado pela ASTM D6638-1 (2018). A Figura 11 ilustra o fluxograma com as etapas do desenvolvimento da pesquisa, que serão detalhados posteriormente.

Figura 11: Fluxograma das etapas do experimento.



Fonte: Do autor.

3.2. AGREGADO GRAÚDO DE PREENCHIMENTO

Foram utilizados agregados graúdos (Figura 12) de rocha gnaisse nas faixas granulométricas de 4,75/12,5 mm e 9,25/25,0 mm (ABNT NBR 7211, 2022), comercialmente classificadas como brita 0 e brita 1, respectivamente (Quaresma, 2009).

As curvas granulométricas dos agregados graúdos foram obtidas de acordo com a norma ABNT NBR 17054 (2022), antes e após os ensaios de resistência de conexão de modo a ponderar possíveis alterações em seus parâmetros físicos devido as solicitações sofridas pelas tensões aplicadas. Além disso, demais ensaios de caracterização dos agregados foram realizados para fins de inferência dos resultados

mecânicos de resistência de conexão, tais como, massa específica e absorção de água (ABNT NBR 16917, 2021), massa unitária no estado solto (ABNT NBR 16972, 2021), dimensão máxima característica e módulo de finura (ABNT NBR 17054, 2022) e teor de material fino por lavagem (ABNT NBR 16973, 2021).

Figura 12: Agregados graúdos de granulometria comerciais brita 0 (esquerda) e brita 1 (direita).



Fonte: Do autor.

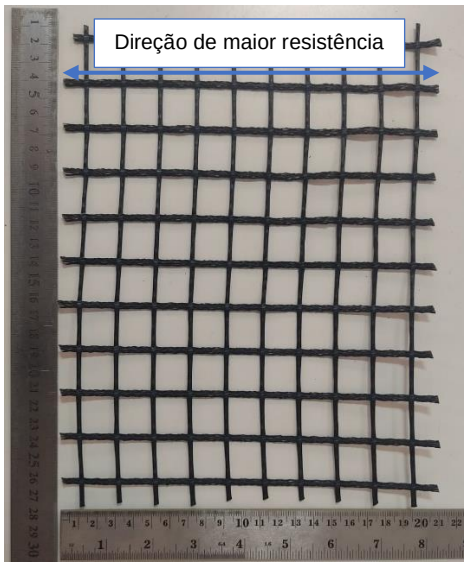
3.3. GEOGRELHA

A geogrelha (GGR) utilizada nos ensaios (Figura 13) tem resistência nominal à tração de 50 kN/m, deformação nominal de 11% à carga máxima e módulo de rigidez de 500 kN/m, conforme especificação do fabricante.

Com estrutura unidirecional, as fibras longitudinais possuem maiores dimensões que as fibras transversais, 4,0 mm e 2,5 mm, respectivamente, que indicam a direção principal do reforço. Suas aberturas nominais de malha são de 20,0 mm no sentido transversal e 21,0 mm no sentido longitudinal.

A produção deste material é feita com fios de poliéster de alta tenacidade e elevado peso molecular (MW > 25000 mmol/kg) e baixa degradação (CEG < 30 g/mol), revestida com proteção contra raios ultravioletas (UV) e resistência à degradação química e mecânica. Sua composição conta com *Styrene Butadiene Rubber (*SBR), caulim e aditivo negro de fumo, conforme informado pelo fabricante. As dimensões empregadas para os ensaios foram de 2,40 m de comprimento dobrado ao meio (1,20m) para atender a condição de camada dupla, por 0,70 m de largura.

Figura 13: Geogrelha utilizada no ensaio.

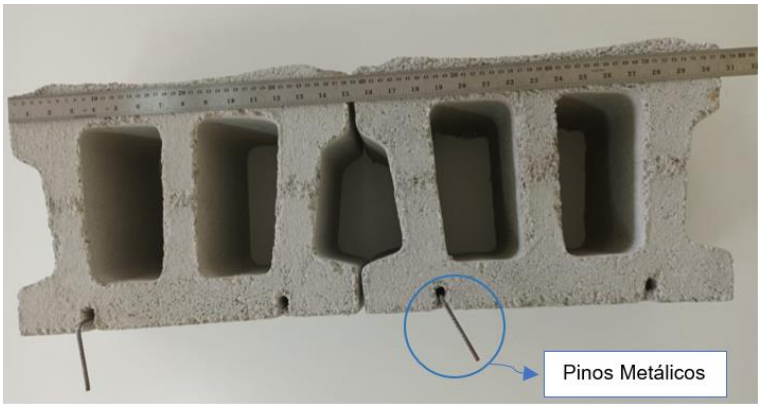


Fonte: Do autor.

3.4. BLOCOS SEGMENTAIS

Os blocos segmentais em concreto (Figura 14) utilizados nos ensaios de resistência de conexão apresentam dimensões nominais de 39 cm (comprimento) x 27 cm (largura) x 20 cm (espessura), massas em torno de 25 kg, duas seções de vazios centrais de 17 cm (comprimento) x 9 cm (largura) para o preenchimento com material granular graúdos. Os blocos são autoportantes e sistema de conexão por pinos metálicos de diâmetro de 5,0 mm e dimensões de 22 cm (altura) por 7 cm (dobra), em formato de L.

Figura 14: Blocos segmentais de concreto.

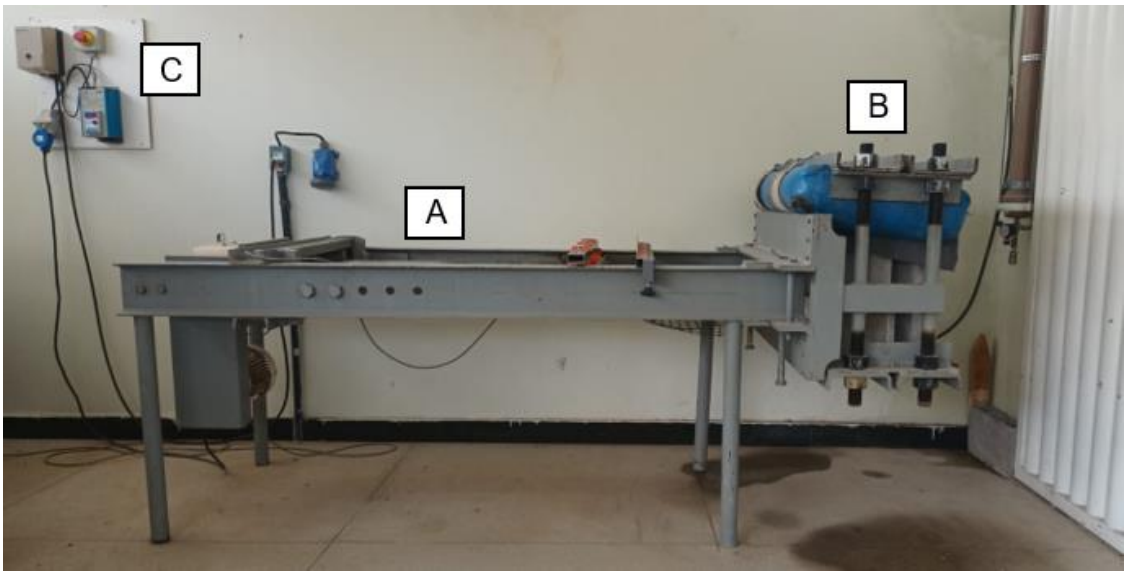


Fonte: Do autor.

3.5. EQUIPAMENTO

O equipamento utilizado na realização dos ensaios de resistência de conexão bloco-geogrelha-agregado foi desenvolvido por Urashima e Martins (2004) (Figura 15), que segue as preconizações da ASTM D6638-18 (ASTM, 2018), composto por um sistema de aplicação de força horizontal (A), um sistema de aplicação de tensão normal (B) e mecanismo de leitura, aquisição e armazenamento de dados (C).

Figura 15: Equipamento desenvolvido por Urashima e Martins (2004).



Fonte: Do autor.

3.5.1. Sistema de aplicação de força horizontal (A)

O sistema de aplicação de força horizontal do equipamento conta com um motor trifásico, de 1720 rpm de frequência e tensão 220V, conectado a um inversor de frequência de 0-240 Hz, que possibilita o controle de potência e velocidade de um pistão do tipo rosca infinita, que se encontra unido ao motor e a uma garra cilíndrica rígida de aço com abertura em cunha e outro cilindro de menor dimensão que se encaixa à abertura em cunha tipo macho-fêmea (Figura 16). A garra possui também um sistema de parafusos, que visa garantir a fixação da geogrelha durante o ensaio, de forma a evitar escorregamentos ou que a mesma se solte.

Figura 16: Conexão macho-fêmea.



Fonte: Do autor.

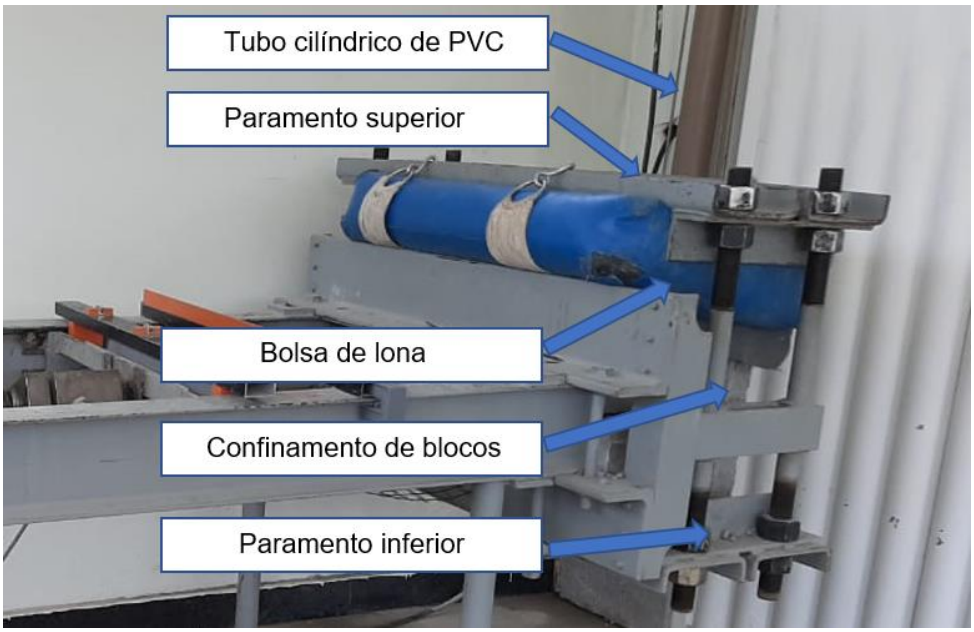
3.5.2. Sistema de aplicação de tensão normal (B)

O sistema de aplicação de tensão normal é compreendido pela caixa de confinamento e por sistema de pressurização (Figura 17).

A caixa de confinamento possui um paramento metálico inferior, responsável pela sustentação e nivelamento das fiadas de blocos segmentais, um espaçamento variável para comportar duas fiadas, de diferentes modelos de blocos segmentais e, acima dos blocos, é posicionado uma bolsa de lona de alta resistência, limitada por um paramento metálico superior responsável pelo travamento do sistema durante o ensaio, e que permite a transferência das tensões para os blocos segmentais.

O sistema de pressurização é composto pela bolsa de lona de alta resistência conectada por meio de um conjunto de válvulas a um tubo cilíndrico de policloreto de vinila (PVC), que apresenta conexão com um compressor. A bolsa de lona e o tubo cilíndricos são preenchidos com água e ar comprimido controlado com válvulas e manômetro presentes no sistema (Figura 18), de forma a possibilitar o alcance e manutenção das pressões requeridas para cada campanha de ensaios.

Figura 17: Sistema de aplicação de tensão normal.



Fonte: Do autor.

Figura 18: Detalhe de sistema de pressurização.



Fonte: Do autor.

3.5.3. Mecanismo de leitura, aquisição e armazenamento de dados (C)

O sistema utilizado conta com célula de carga com capacidade de 20 toneladas, acoplada ao sistema de aplicação de força horizontal a fim de mensurar a força (kgf) aplicada na geogrelha durante os ensaios por unidade de tempo (segundos). Os dados são armazenados em um cartão do tipo *Secure Digital* (SD) presentes no quadro geral (Figura 19), que possui sistema de acionamento e possibilidade de configurações por meio de teclado numérico e visor digital.

O quadro geral possibilita, também, a leitura de deslocamentos com transdutor de deslocamento variável linear (LVDTs), entretanto, os mesmos não foram utilizados nesta pesquisa devido ao deslocamento alcançado nos ensaios, visto que estes eram superiores ao curso dos LVDTs.

Figura 19: Detalhe do quadro geral.



Fonte: Do autor.

3.6. PROCEDIMENTO DE ENSAIO DE DESEMPENHO DE CONEXÃO

3.6.1. Montagem e realização de ensaio

Para início do ensaio, a primeira fiada de blocos foi montada no equipamento com um bloco inteiro centralizado e dois blocos com dois terços de seus comprimentos posicionados nas laterais do bloco central. Ressalta-se que devido ao tipo de amarração e dimensões do faceamento utilizado, foi necessário ajuste com corte por disco de dois exemplares de blocos. Posicionados os blocos, os vazios dos mesmos foram preenchidos com material granular em três camadas compactadas com haste metálica com 25 golpes cada, a fim de reduzir o índice de vazios entre os agregados. A Figura 20 apresenta a disposição e o preenchimento dos blocos com material granular.

Figura 20: Posicionamento e preenchimento da primeira fiada.



Fonte: Do autor.

Disposta a primeira fiada, foi realizada a conexão da geogrelha no sistema de aplicação de força horizontal. Neste caso, a dobra da geogrelha se encontra junto ao faceamento e suas extremidades fixadas na garra cilíndrica com auxílio dos parafusos presentes na mesma (Figura 21). Em sequência, a segunda fiada de blocos, composta por dois blocos inteiros, foi posicionada acima da primeira fiada com a geogrelha e repetiu-se o procedimento de preenchimento dos vazios dos blocos com material granular com a mesma metodologia empregada na primeira fiada.

Figura 21: Fixação de geogrelha por meio de parafusos.



Fonte: Do autor.

Acima dos blocos e com o objetivo de proteger a bolsa de lona, que constitui parte do sistema de aplicação de tensão normal, em relação aos agregados e vértices dos blocos, posicionou-se uma camada de geotêxtil do tipo não tecido. Também, com

intuito de garantir a segurança durante a realização da montagem e desmontagem do ensaio, foi incluído ao sistema uma cinta de filamentos tecidos que envolve e fixa a bolsa de lona ao sistema. Destaca-se que, anteriormente, houve o preenchimento de aproximadamente um terço da bolsa com água, e os dois terços restantes receberam ar comprimido para juntamente com o paramento metálico, com altura regulada por conjunto de porcas, permitir a transferência de tensão normal ao sistema (Figura 22).

Figura 22: Elementos de proteção.



Fonte: Do autor.

Realizada a montagem dos elementos para o ensaio, efetuou-se o ajuste do sistema de pressurização por meio da conexão entre a bolsa de lona e o tubo cilíndrico de PVC e do mesmo com o compressor de ar, que permite ajustar a tensão a ser empregada em cada ensaio.

O sistema de aplicação de força horizontal foi ajustado por meio do inversor de frequência em 14 Hz, para obter velocidade constante de 20 mm/min. O painel de controle e o cartão *Security Digital* têm sua memória zerada para possibilitar a aquisição dos novos dados. Uma pré-tensão é aplicada na geogrelha para evitar a movimentação da garra e aquisição de dados incorretos nos primeiros segundos do ensaio.

As tensões normais aplicadas no ensaio foram determinadas com o objetivo de simular diferentes alturas de um muro de contenção em solo reforçado com faceamento em blocos segmentais de concreto. Valores de tensão normal acima de

70 kN/m² representam muros com mais de 5 metros de altura (Rocha; Urashima; Guimarães, 2023), conforme exemplificado na Tabela 3.

Tabela 3: Relação de tensão normal com número de fiadas e altura representada.

Tensão normal (kN/m²)	**40**	**50**	**60**	**70**	**80**
Número de fiadas	14	18	21	27	34
Altura correspondente	2,8	3,6	4,2	5,4	6,8

Fonte: Rocha; Urashima; Guimarães, 2023 (Adaptada pelo autor).

Antes do início do ensaio é realizado o preenchimento da bolsa de lona com ar aplicado por compressor, cuja pressão requerida é controlada por meio de válvulas e manômetro presentes no sistema de pressurização.

Alcançado o nível de tensão normal, o experimento é iniciado com acionamento da leitura no painel de controle e do sistema de aplicação de força horizontal. No painel de controle é possível acompanhar a carga aplicada. Após tempo suficiente para alcance do pico de tensão (cerca de 250 segundos), o sistema de aquisição de dados é encerrado, o sistema de aplicação de força horizontal desligado e a bolsa de lona despressurizada. O cartão *Security Digital* (SD) é retirado para que os dados sejam transferidos e analisados.

Após a finalização de cada ensaio, o paramento metálico, a bolsa de lona e a segunda fiada são retiradas para que a geogrelha utilizada possa ser removida do sistema, identificada e submetida a registro fotográfico. O material granular utilizado na primeira fiada é parcialmente substituído para a realização dos ensaios posteriores.

3.6.2. Obtenção e tratamento de dados

A célula de carga do equipamento realiza a aquisição de valores de força de tração a cada 0,1 segundo, armazenados no cartão *Security Digital (SD)* junto aos respectivos valores de tração horizontal (kN). A partir destes valores e da frequência adotada no motor, foram obtidos os resultados para resistência de conexão (kN/m), deformação (%) e módulo em tração (kN/m). Os resultados de resistência de conexão (T_{rc}) foram obtidos por meio da relação entre força máxima de tração e a largura do corpo de prova adotada no ensaio e preconizada pela ASTM D6638-18 (2018), conforme Equação 1.

$$T_{rc} = \frac{F_p}{L_{cp}} \quad (1)$$

Dado que:

T_{rc}: Resistência de conexão;

F_p: Força máxima de tração da conexão;

L_{cp}: Largura do corpo de prova de geossintético.

O motor responsável pelo tracionamento no sistema de aplicação de força horizontal tem sua frequência ajustada em 14 Hz, que proporciona velocidade constante ao sistema, de 20 mm/min. Por meio de comprimento inicial (L_i) de 430mm da extremidade dos blocos até a extremidade da garra cilíndrica, e comprimento final (L_f), obtido através dos dados de velocidade constante e tempo decorrido até a força máxima de tração, foi possível realizar o cálculo dos valores de deformação por meio da Equação 2.

$$\varepsilon_{rc} = \frac{\Delta L}{L_i} x100 \quad (2)$$

Dado que:

ε_{rc}: deformação à força máxima;

ΔL: diferença entre o comprimento final (L_f) pelo comprimento inicial (L_i);

L_i: comprimento inicial.

Em posse dos valores de resistência de conexão e deformação à força máxima, foi possível obter o módulo de tração à força máxima da geogrelha, conforme Equação 3.

$$J_{rc} = \frac{T_{rc}}{\varepsilon_{rc}} \quad (3)$$

Dado que:

J_{rc}: módulo de tração à força máxima;

T_{rc}: resistência de conexão à força máxima;

$\varepsilon_{máx}$: deformação à força máxima.

Ambos os agregados foram submetidos a três repetições para cada nível de tensão normal aplicada, para avaliar repetibilidade, característica em que os resultados são próximos quando aplicadas as mesmas condições de entrada com condições definidas, preconizada pela ASTM D6638-18 (2018), para tanto as variações observadas não deveriam ultrapassaram os limites de ± 10% dos valores médios de resistência de conexão obtidos. Os resultados foram analisados também graficamente, por meio de diagramas de caixas, que possibilita a verificação dos valores médios e atípicos dentre os dados obtidos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL GRANULAR

A Tabela 4 apresenta os parâmetros de caracterização física dos agregados graúdos de acordo com suas respectivas normas. Após cinco séries de ensaios de resistência de conexão bloco-geogrelha-agregado, foram realizadas nova análises de caracterização dos agregados com a finalidade de avaliar possíveis danos ocorridos durante os mesmos.

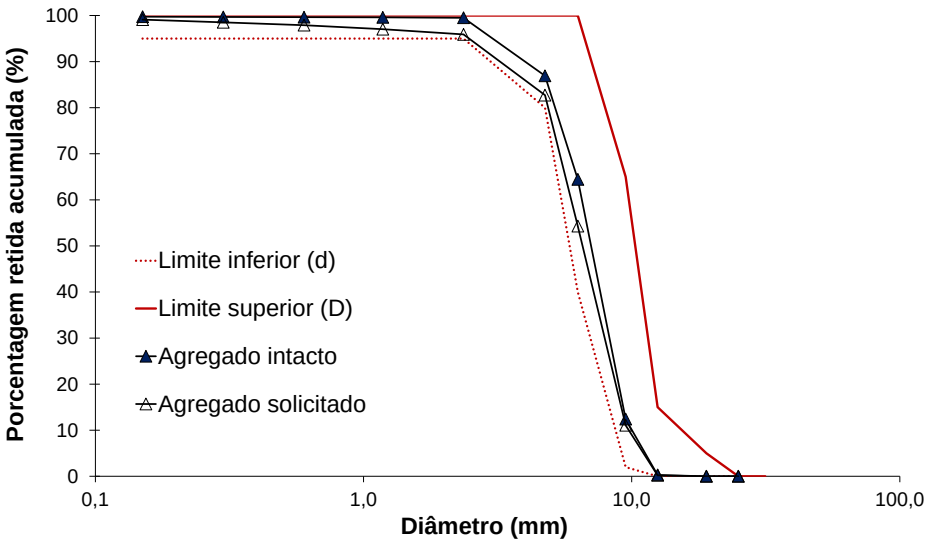
As Figuras 23 e 24 apresentam as curvas granulométricas dos agregados intactos e após ensaios de conexão. Os limites inferiores (d) e superiores (D), das zonas granulométricas 4,75/12,5mm (brita 0) e 9,5/25,0mm (brita 1), respectivamente, são definidas na ABNT NBR 7211 (2022).

Tabela 4: Caracterização física dos agregados graúdos.

Parâmetros	Norma	Brita 0	Brita 1
Massa específica	ABNT NBR 16917 (2021)	2880 kg/m³	2920 kg/m³
Absorção de água	ABNT NBR 16917 (2021)	0,4%	0,9%
Massa Unitária	ABNT NBR 16972 (2021)	1600 kg/m³	1580 kg/m³
Compacidade	***	55,6%	54,1%
Dimensão máxima característica	ABNT NBR 17054 (2022)	12,5 mm	19 mm
Módulo de finura	ABNT NBR 17054 (2022)	5,9	6,9
Teor de material fino por lavagem	ABNT NBR 16973 (2021)	0,2%	0,2%

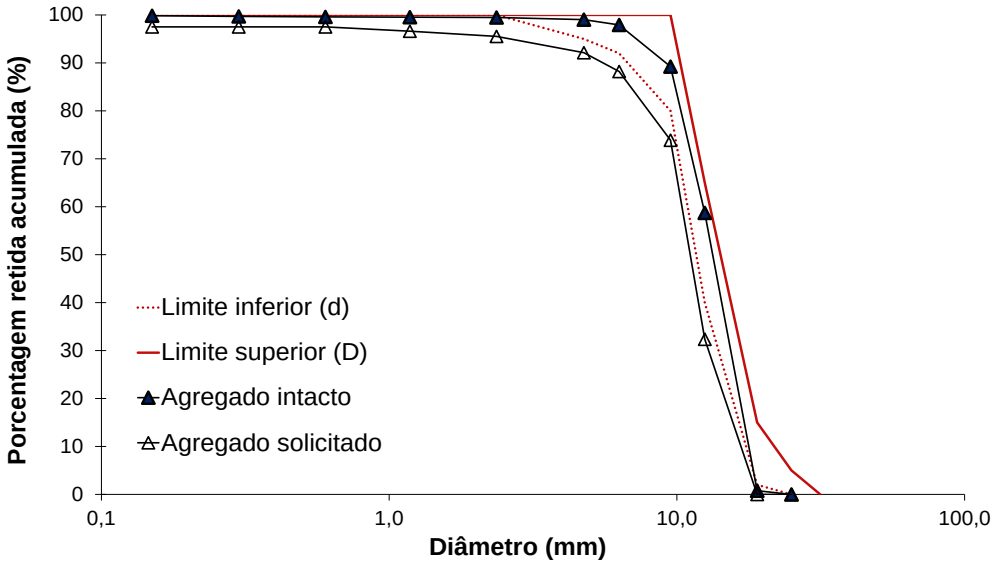
Fonte: Do autor.

Figura 23: Curva granulométrica brita 0.



Fonte: Do autor.

Figura 24: Curva granulométrica brita 1.



Fonte: Do autor.

Observa-se que ambas as curvas granulométricas dos agregados solicitados apresentam deslocamento à esquerda do intervalo das respectivas faixas granulométricas, com aproximação dos limites inferiores (d) das mesmas. Isto ocorreu devido às solicitações mecânicas impostas aos materiais granulares de preenchimento nos ensaios de conexão pelo reforço (geogrelha) e pelo maior contato entre o material granular e os demais elementos do sistema.

O deslocamento do intervalo nas curvas granulométricas indica o aumento do teor de finos, com consequente redução dos módulos de finura para 5,8 e 6,5 das granulometrias de brita 0 e brita 1, respectivamente, em comparação aos seus valores intactos (Tabela 4). Todavia, as dimensões máximas características de 12,5 mm para brita 0 e 19,0 mm para brita 1 foram mantidas. Apesar dos deslocamentos observados, não houve descaracterização dos agregados em suas respectivas classificações granulométricas.

Por meio da relação entre massa unitária e massa específica dos agregados, obtém-se a compacidade das britas, indicadas em percentuais de 55,6% para brita 0 e 54,1% para brita 1 (Tabela 4). Em consequência da compacidade, apresentam-se como percentuais de vazios das britas analisadas os valores de 44,4% para brita 0 e 45,9% para a brita 1. O adensamento do material granular, realizado de maneira manual por haste metálica proporcionou a redução dos vazios percentuais, fato este que interfere diretamente no comportamento mecânico do sistema devido ao arranjo

do material, com o imbricamento entre os grãos e a geogrelha. Ademais, tal adensamento influencia também nas características auto drenantes de um muro de contenção com faceamento em blocos de concreto preenchidos com material granular.

Em termos de material pulverulento, a Tabela 4 apresenta o valor de 0,2% para ambas as granulometrias. Este percentual obtido está abaixo do limite inferior de 1,0%, estabelecido pela ABNT NBR 7211 (2021) para agregados graúdos em dosagens de concretos estruturais. Este parâmetro com porcentagens reduzidas como a obtida não interfere na resistência de conexão bloco-geogrelha-agregado gerada pelo imbricamento e nem na capacidade de drenagem do sistema.

4.2. RESISTÊNCIA DE CONEXÃO BLOCO-GEOGRELHA - BRITA 0

A Tabela 5 apresenta os resultados dos ensaios de resistência de conexão geogrelha-bloco em função de cinco níveis de tensão normais aplicadas para três séries de ensaios com brita 0, e ainda a média dos valores obtidos nos ensaios de conexão para cada nível de tensão normal, utilizada para verificação da repetibilidade dos resultados, que não deve extrapolar limites de ± 10,0% da média (ASTM D6638-18, 2018), bem como os coeficientes de variação dentre os valores em relação à média.

Tabela 5: Resultados de Resistência de Conexão Bloco-Geogrelha - Brita 0.

Resistência de Conexão (kN/m) – Brita 0				
Tensão Normal (kN/m²)	**Série 01**	**Série 02**	**Série 03**	**Média**
40	13,5	13,4	13,1	13,3 (1,7%)
50	17,6	15,0	15,4	16,0 (8,7%)
60	23,9	20,5	22,9	22,5 (7,8%)
70	22,7	26,6	25,4	26,6 (4,2%)
80	30,8	30,1	29,8	30,2 (1,7%)

OBSERVAÇÃO: Entre parênteses, os coeficientes de variação.
Fonte: Do autor.

Os resultados apontam um acréscimo de resistência de conexão bloco-geogrelha-agregado, conforme a tensão normal (kN/m²) é incrementada. Foi observado maior acréscimo de resistência de conexão entre as tensões normais de 50 kN/m² e 60 kN/m², enquanto os demais incrementos de tensões normais (kN/m²) apresentaram acréscimos de resistência semelhantes entre si. A média dos valores de resistência de conexão estão acompanhadas do respectivo coeficiente de variação da

amostragem, que indicam maiores variações entre as tensões normais de 50 kN/m² a 70 kN/m². O coeficiente de variação está em conformidade com os limites de 10,0% do valor médio, como proposto na ASTM D6638 (2018), que indica a repetibilidade dos dados obtidos em ensaio.

Os resultados obtidos para deformação média e módulo de tração média estão indicados na Tabela 6. A relação entre resistência de conexão e deformação resulta nos valores de módulo de tração, com um acréscimo no valor deste parâmetro diante do incremento de tensão normal aplicada. A maior discrepância de valores médios está entre as tensões normais de 60 kN/m² e 70 kN/m², que indica maior exercício de força no material para as tensões normais superiores.

Tabela 6: Resultado de deformações e módulos de rigidez para resistências de conexão - Brita 0.

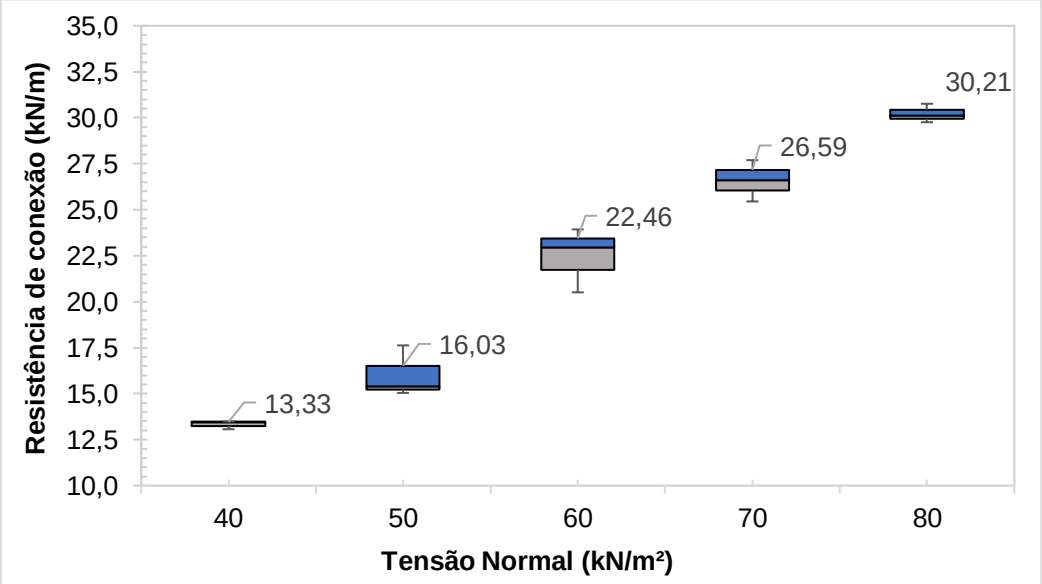
Tensão Normal (kN/m²)	Resistência de Conexão Média (kN/m)	Deformação, Ɛrc (%)	Módulo em Tração, J_{rc} (kN/m)
40	13,3 (1,7%)	20,0 (6,6%)	67,0 (6,1%)
50	16,0 (8,7%)	18,8 (1,1%)	85,3 (6,2%)
60	22,5 (7,8%)	24,0 (13,3%)	86,0 (7,6%)
70	26,6 (4,2%)	21,7 (3,3%)	116,9 (5,0%)
80	30,2 (1,7%)	25,9 (5,7%)	117,5 (2,9%)

OBSERVAÇÃO: Entre parênteses, os coeficientes de variação.

Fonte: Do autor.

O Gráfico 1, apresenta os resultados de resistências de conexão entre as réplicas do ensaio, avaliados em distribuição de caixas (*box-plot*).

Gráfico 1: Diagrama de caixas - Resistência de conexão em função da tensão normal - Brita 0.

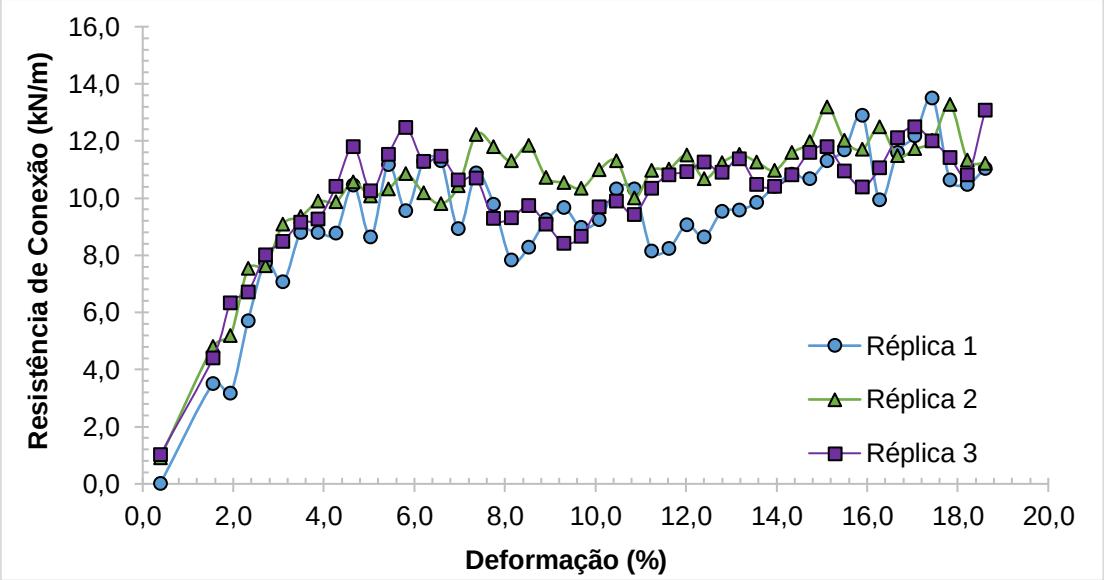


Fonte: Do autor.

Com a verificação do Gráfico 1, observa-se os valores de resistência de conexão (kN/m) para os cinco níveis de tensão normal (kN/m²) por meio dos intervalos interquartis, e com os limites superiores e inferiores apresentados graficamente, tem-se a visualização dos maiores coeficientes de variação para as tensões entre 50 kN/m² e 70 kN/m², bem como ausência de valores atípicos nos experimentos.

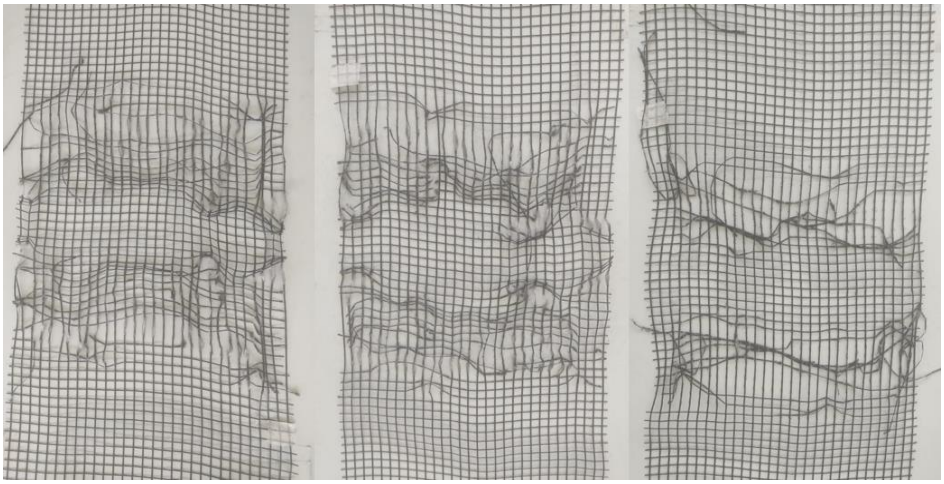
Os Gráficos 2 ao 6 apresentam as curvas de resistência de conexão (kN/m) *versus* deformação (%) para cada tensão normal (kN/m²) aplicada. Junto a cada Gráfico, se encontram as Figuras 25 a 29 que apresentam os corpos de prova das geogrelhas após cada ensaio de conexão, respectivamente.

Gráfico 2: Curva resistência de conexão (kN/m) por deformação (%) - Tensão Normal 40kN/m² - B0.



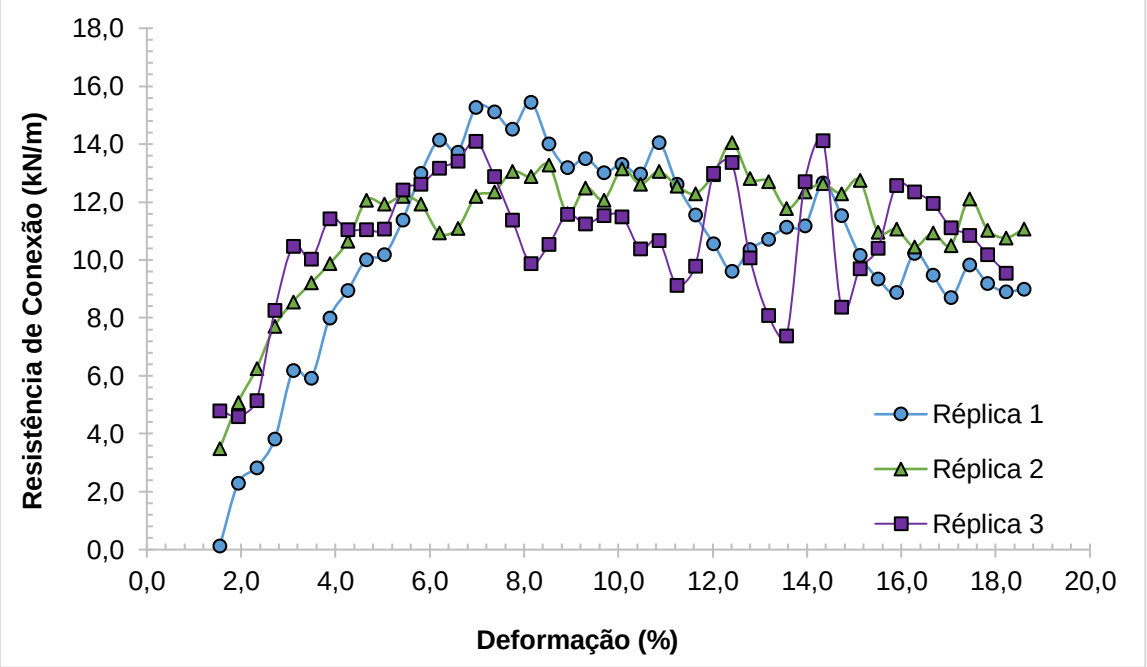
Fonte: Do autor.

Figura 25: Geogrelhas pós ensaio - Tensão Normal 40 kN/m² - B0.



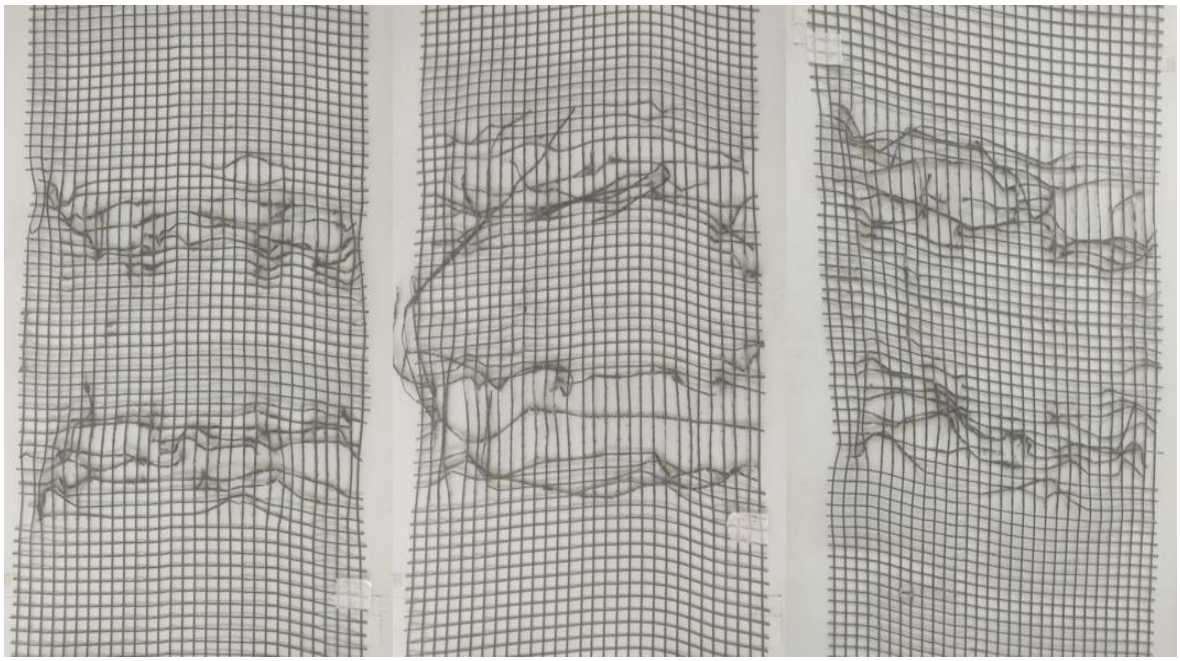
Fonte: Do autor.

Gráfico 3: Curva resistência de conexão (kN/m) por deformação (%) - Tensão Normal 50 kN/m² - B0.



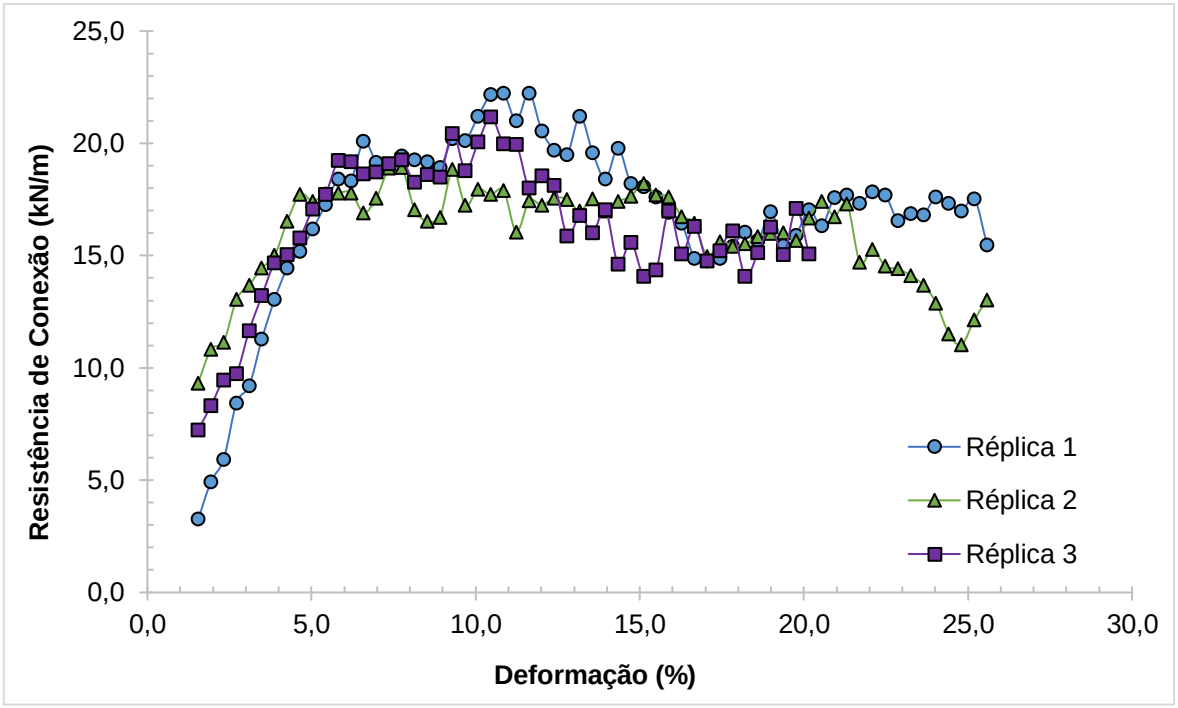
Fonte: Do autor.

Figura 26: Geogrelha pós ensaio - Tensão Normal 50 kN/m² - B0.



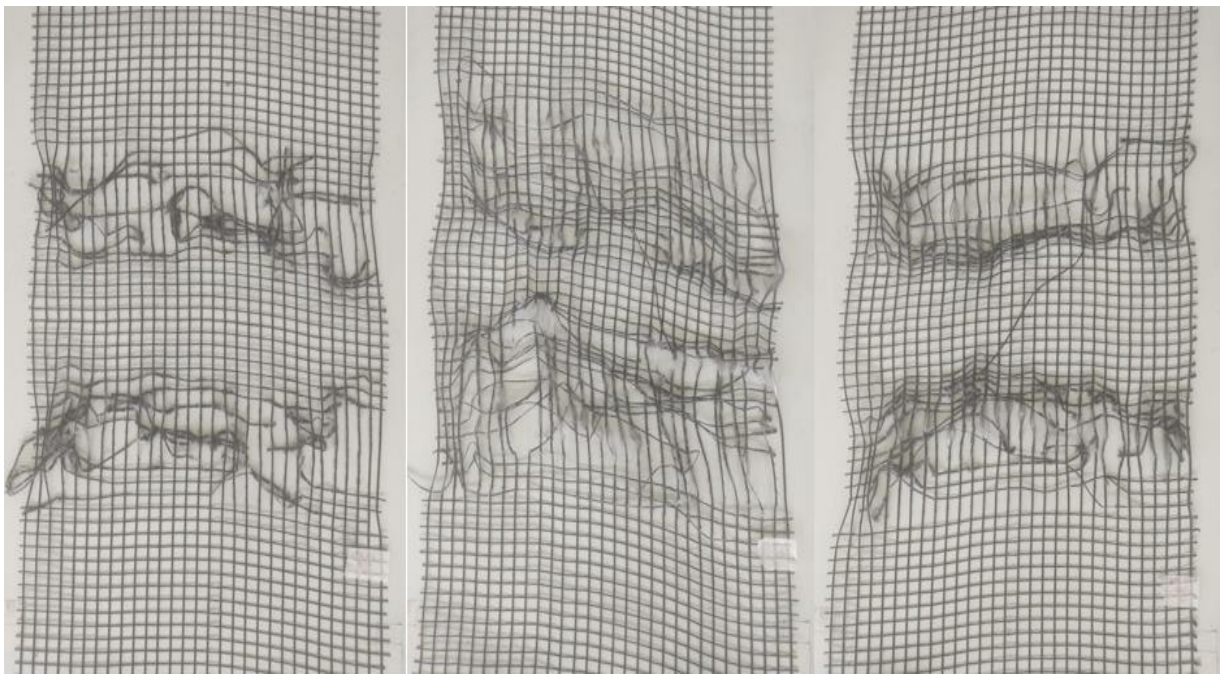
Fonte: Do autor.

Gráfico 4: Curva resistência de conexão (kN/m) por deformação (%) - Tensão Normal 60 kN/m² - B0.



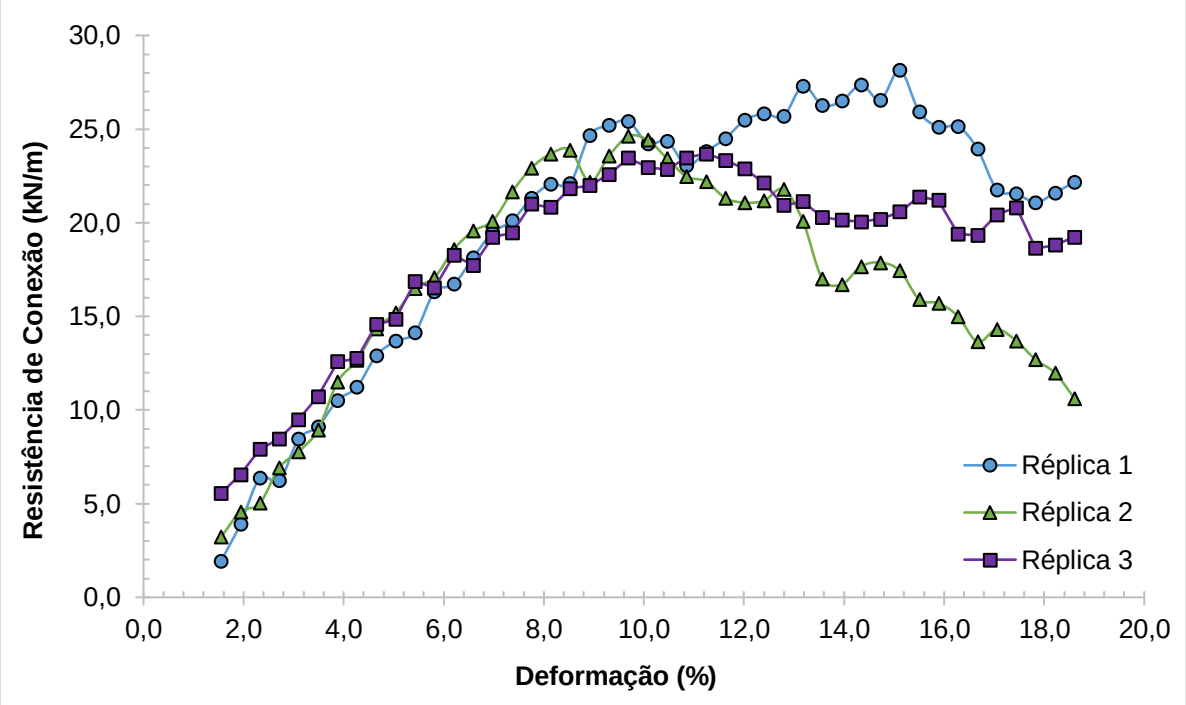
Fonte: Do autor.

Figura 27: Geogrelha pós ensaio - Tensão Normal 60 kN/m² - B0.



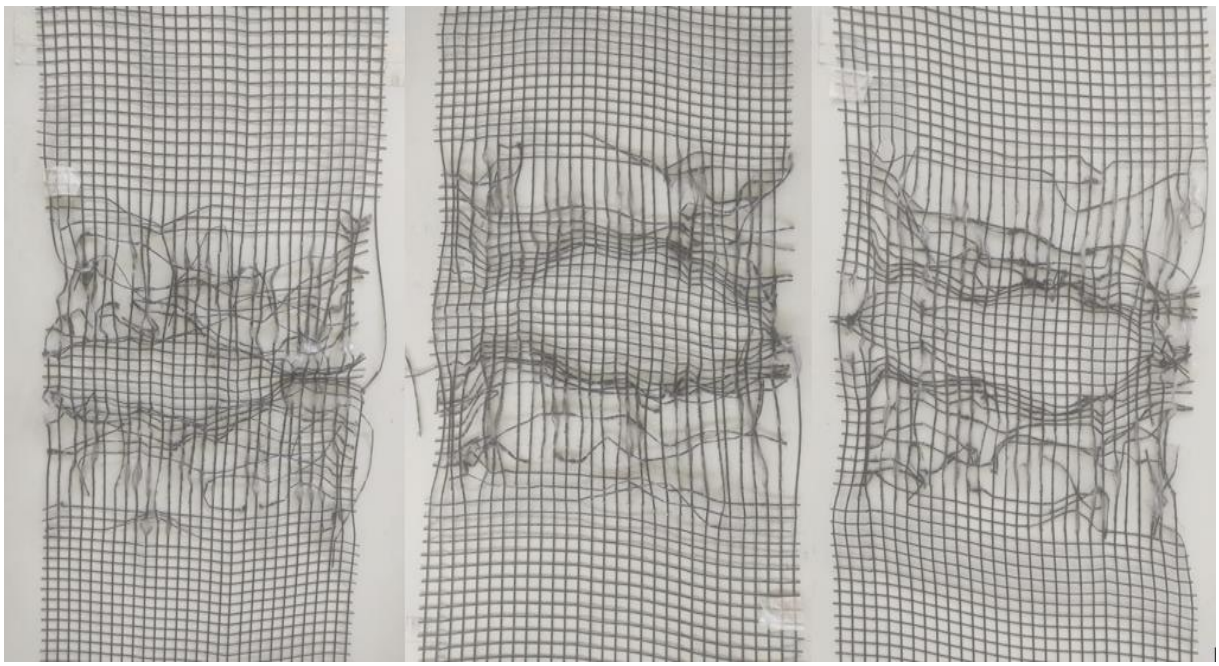
Fonte: Do autor.

Gráfico 5: Curva resistência de conexão (kN/m) por deformação (%) - Tensão Normal 70 kN/m² - B0.



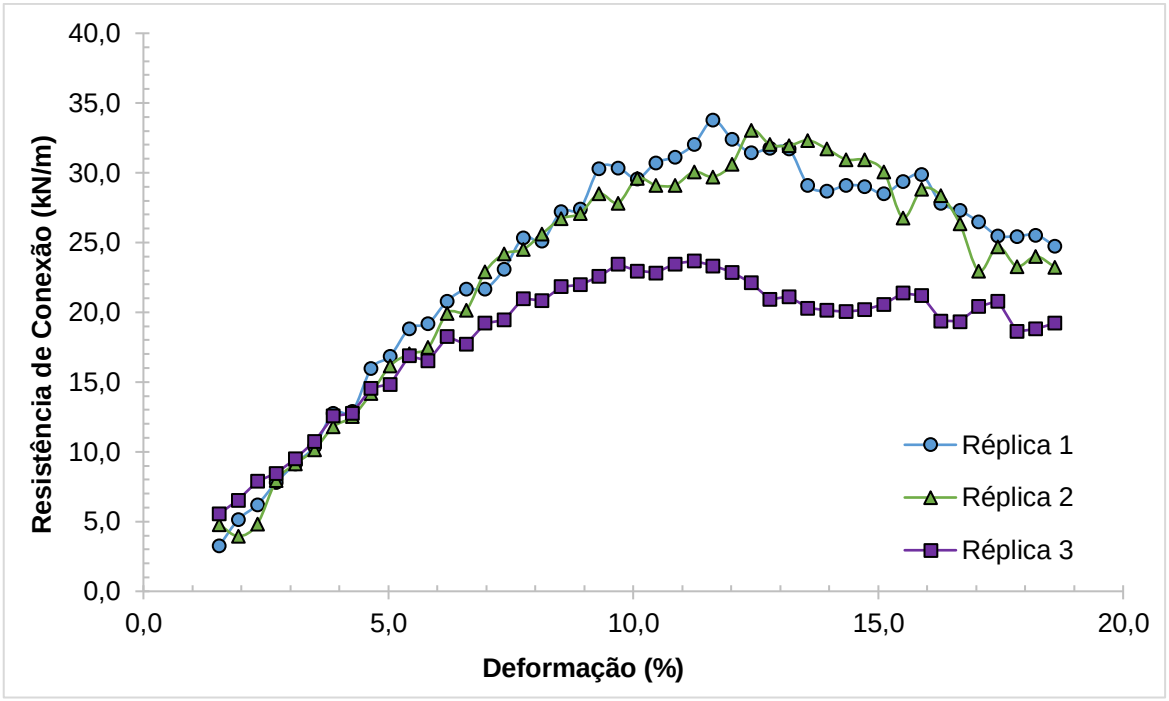
Fonte: Do autor.

Figura 28: Geogrelha pós ensaio - Tensão Normal 70 kN/m² - B0.



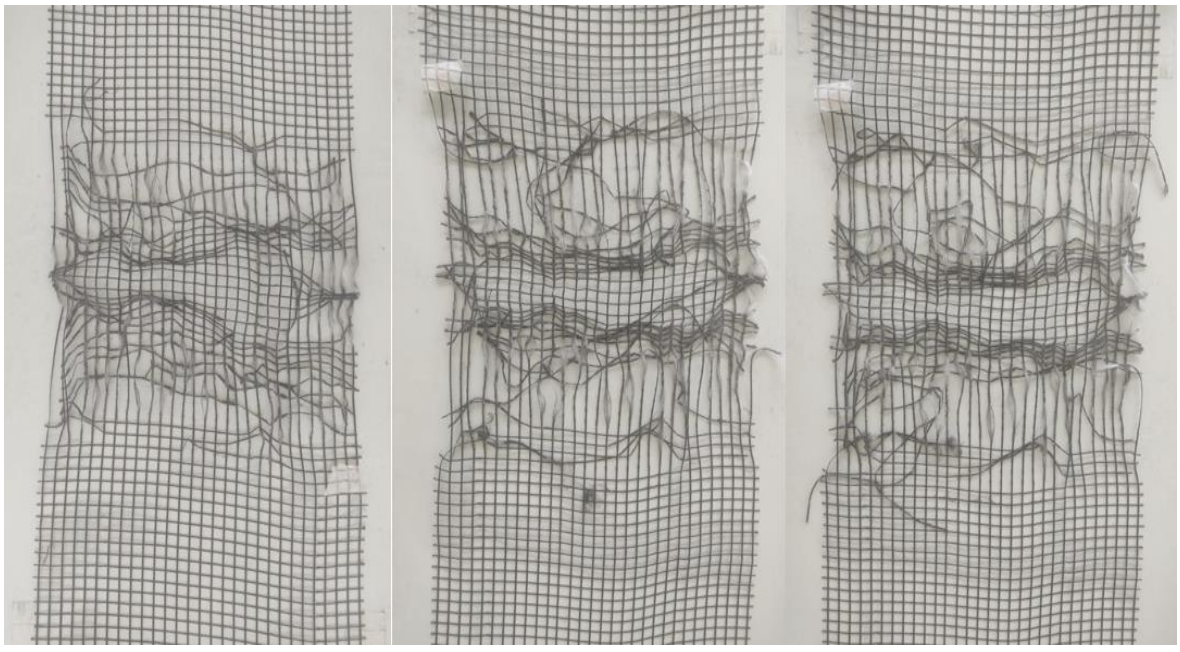
Fonte: Do autor.

Gráfico 6: Curva resistência de conexão (kN/m) por deformação (%) - Tensão Normal 80 kN/m² - B0.



Fonte: Do autor.

Figura 29: Geogrelha pós ensaio - Tensão Normal 80 kN/m² - B0.

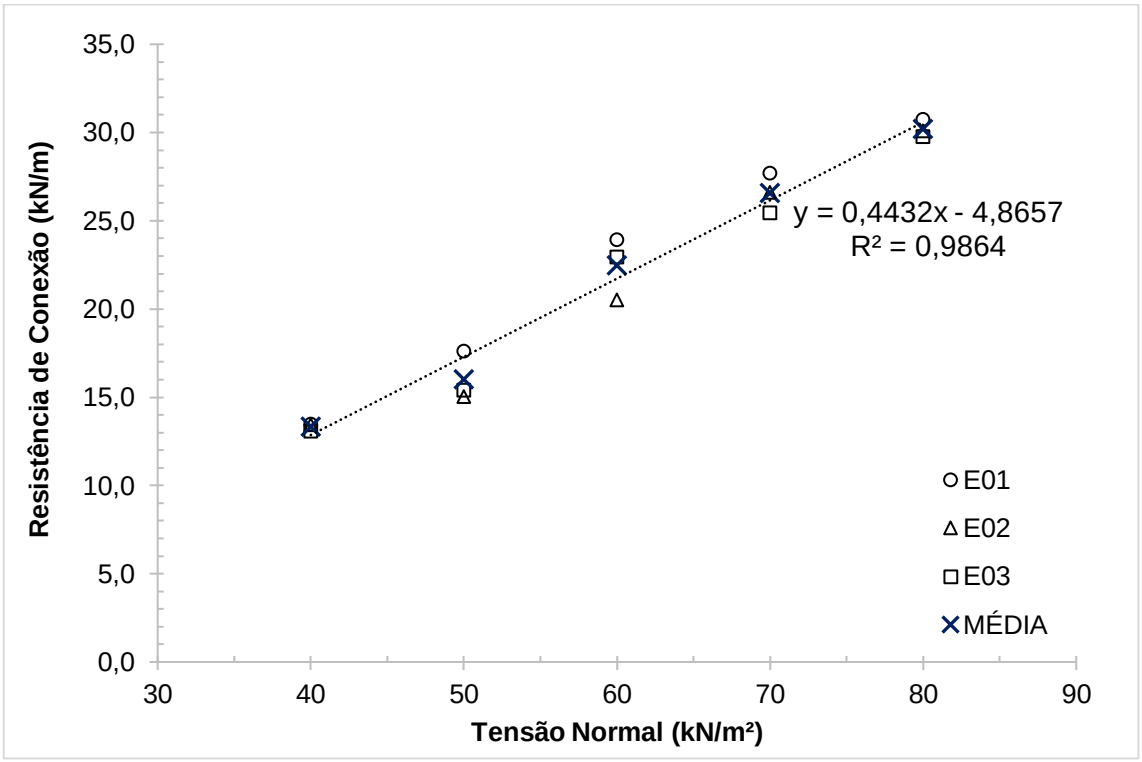


Fonte: Do autor.

Ao analisar os Gráficos de 2 a 6 e Figuras de 25 a 29, é possível observar que os maiores danos a geogrelhas estão nas aplicações de tensão normal de maior magnitude, comportamento este de acordo com os resultados de módulo em tração apresentados na Tabela 6.

No Gráfico 7, faz-se a representação gráfica dos valores apresentados na Tabela 5, de forma a possibilitar a verificação da relação linear entre a resistência de conexão (kN/m) e a tensão normal (kN/m^2) aplicada, cuja equação matemática é apresentada no Gráfico, bem como com coeficiente de determinação do modelo, R^2 igual a 0,9864, destaca-se que quão mais próximo de 1, melhor é a correlação dos dados ao modelo matemático.

Gráfico 7: Relação linear da resistência de conexão em função das tensões normais para brita 0.



Fonte: Do autor.

4.3. RESISTÊNCIA DE CONEXAO BLOCO-GEOGRELHA – BRITA 1

A Tabela 7 apresenta os resultados de resistência de conexão geogrelha-bloco-agregado em função de cinco níveis de tensão normais aplicadas (kN/m) para três séries de ensaios com brita 1. Também é apresentada a média dos valores obtidos nos ensaios de conexão para cada nível de tensão normal, que não extrapolaram os limites de ± 10,0% da média, conforme preconizado na norma ASTM D6638-18 (2018).

Tabela 7: Resultados de Resistência de Conexão Bloco-Geogrelha - Brita 1.

Resistência de Conexão (kN/m) – Brita 1				
Tensão Normal (kN/m²)	**Série 01**	**Série 02**	**Série 03**	**Média**
40	17,5	19,4	16,2	17,7 (9,1%)
50	20,8	22,5	24,0	22,5 (7,0%)
60	25,8	26,2	24,1	25,4 (4,5%)
70	29,3	26,9	30,2	28,8 (5,9%)
80	27,8	32,1	31,8	30,6 (7,8%)

OBSERVAÇÃO: Entre parênteses, os coeficientes de variação.

Fonte: Do autor.

Os resultados para brita 1 também apontam um acréscimo de resistência de conexão bloco-geogrelha conforme a tensão normal (kN/m²) é incrementada. O maior acréscimo de resistência de conexão está entre as tensões normais de 40 kN/m² e 50 kN/m², enquanto os demais incrementos de tensões normais (kN/m²) apresentaram acréscimos de resistência semelhantes entre si. A média dos valores de resistência de conexão estão acompanhadas do respectivo coeficiente de variação da amostragem, que aponta maiores variações nas tensões de 40 kN/m² e 80 kN/m². A menor variação está na tensão de 60 kN/m². O coeficiente de variação também está em conformidade com os limites de 10% como proposto na ASTM D6638-18.

Os resultados obtidos para deformação média e módulo de tração média estão indicados na Tabela 8.

Tabela 8: Resultado de deformações e Módulo de Rigidez para resistências de conexão - Brita 1.

Tensão Normal (kN/m²)	**Resistência de Conexão Média (kN/m)**	**Deformação, ε_{rc} (%)**	**Módulo em Tração, J_{rc} (kN/m)**
40	17,7 (9,1%)	20,6 (7,4%)	81,8 (1,1%)
50	22,5 (7,0%)	13,5 (15,0%)	206,7 (9,6%)
60	25,4 (4,5%)	11,9 (10,7%)	219,6 (8,4%)
70	28,8 (5,9%)	12,1 (5,5%)	238,9 (2,6%)
80	30,6 (7,8%)	12,4 (1,9%)	241,0 (5,8%)

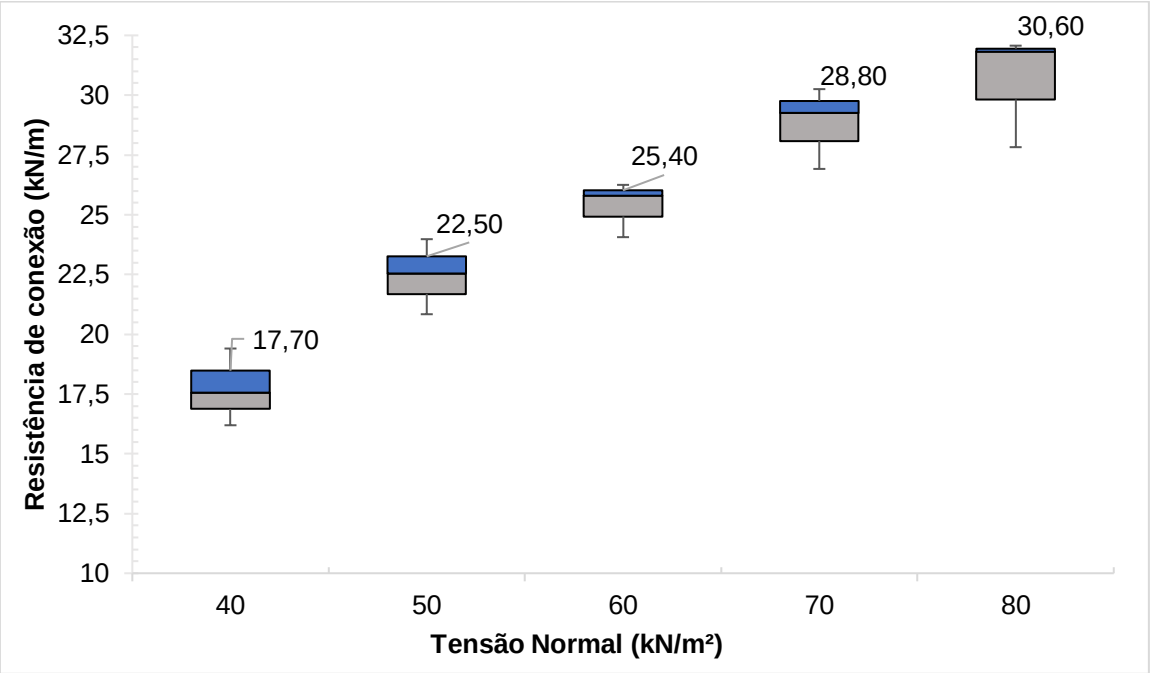
OBSERVAÇÃO: Entre parênteses, os coeficientes de variação.

Fonte: Do autor.

Os resultados de módulo de tração para ensaios em brita 1 apresentam acréscimo de valores a cada incremento de tensão normal aplicada. A maior discrepância de valores médios está entre as tensões normais de 40 kN/m² e 50 kN/m², para tensões normais acima de 50 kN/m os valores de módulo em tração não têm grandes variações.

No Gráfico 8, tem-se os resultados de resistências de conexão entre as réplicas do ensaio, avaliados em distribuição de caixas (*box-plot*).

Gráfico 8: Diagrama de caixas resistência de conexão em função da tensão normal - Brita 1.

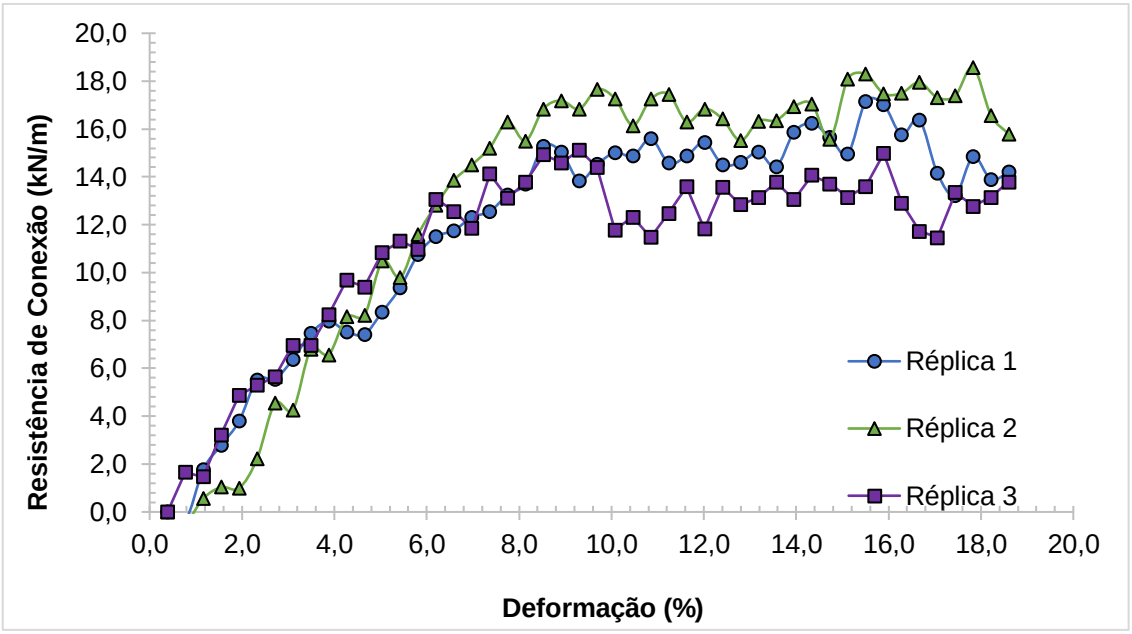


Fonte: Do autor.

O Gráfico 8 indica os valores de resistência de conexão (kN/m) para os cinco níveis de tensão normal (kN/m²) por meio dos intervalos interquartis. É possível verificar graficamente que o maior valor de coeficiente de variação para resistência de conexão médio ocorreu para a tensão normal de 80 kN/m. Não há presença de valores atípicos no experimento.

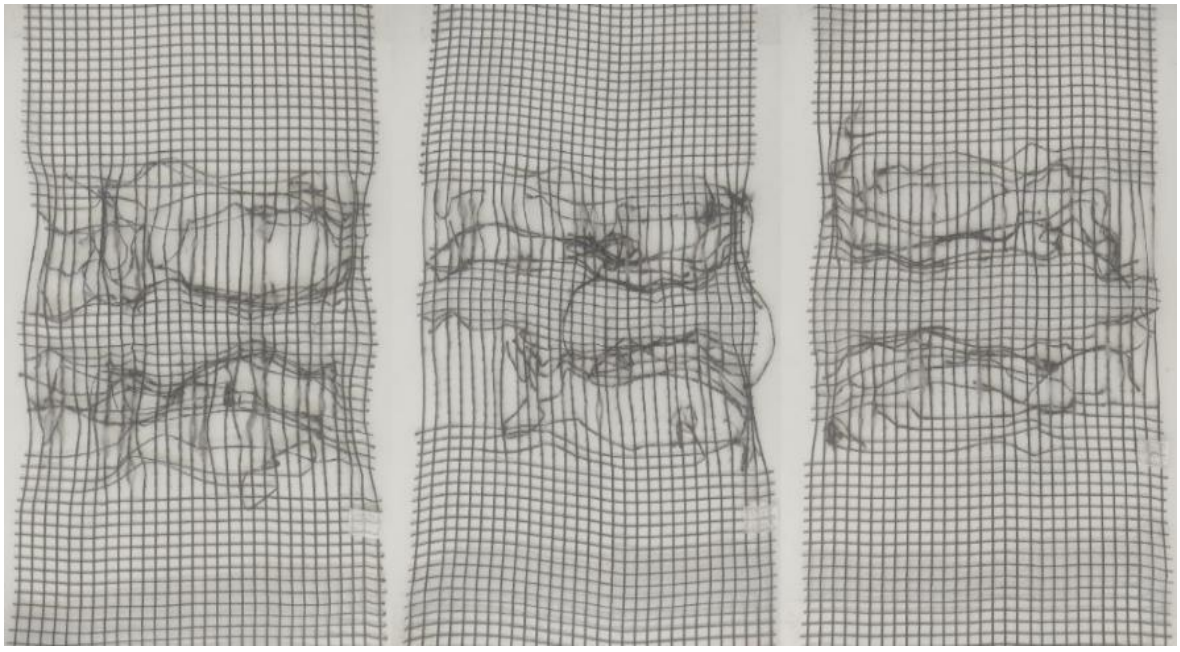
Dos Gráficos 9 ao 13 há a curva de resistência de conexão (kN/m) *versus* deformação (%) para cada nível de tensão normal. Junto a cada gráfico, se encontram as Figuras 30 a 34 que apresentam os corpos de prova das geogrelhas para cada ensaio de conexão com brita 1, respectivamente.

Gráfico 9: Curva resistência de conexão (kN/m) por deformação (%) - Tensão Normal 40 kN/m² - B1.



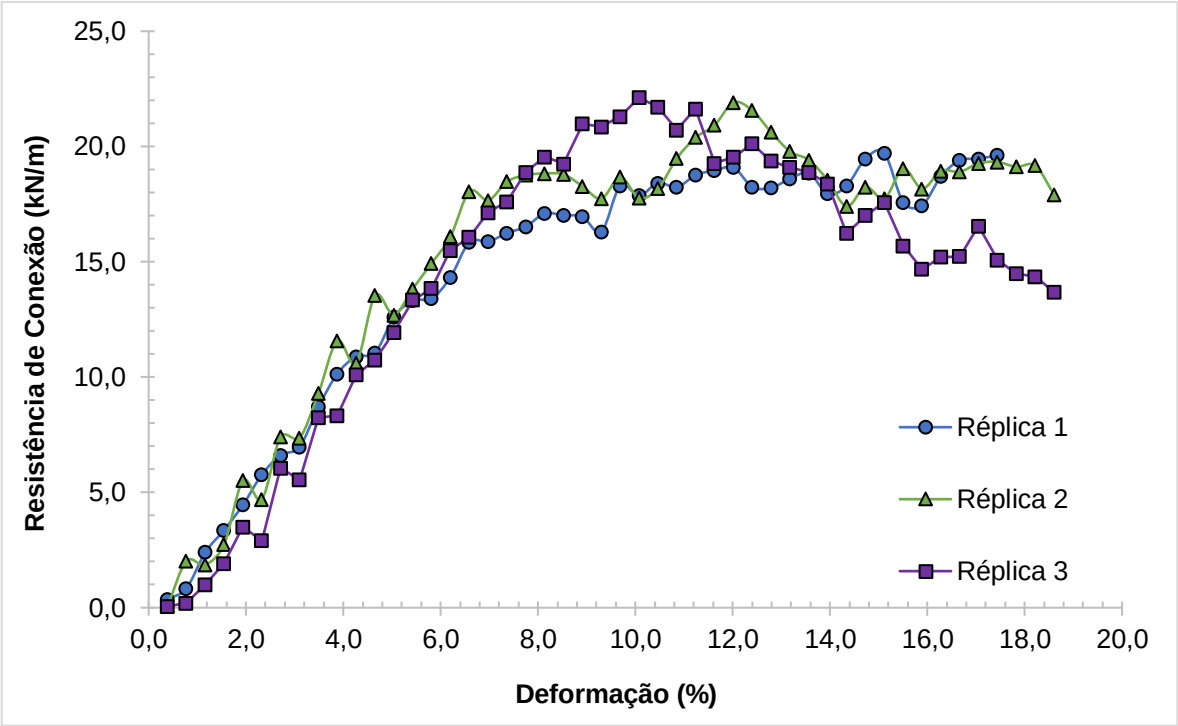
Fonte: Do autor.

Figura 30: Geogrelha pós ensaio - Tensão Normal 40 kN/m² - B1.



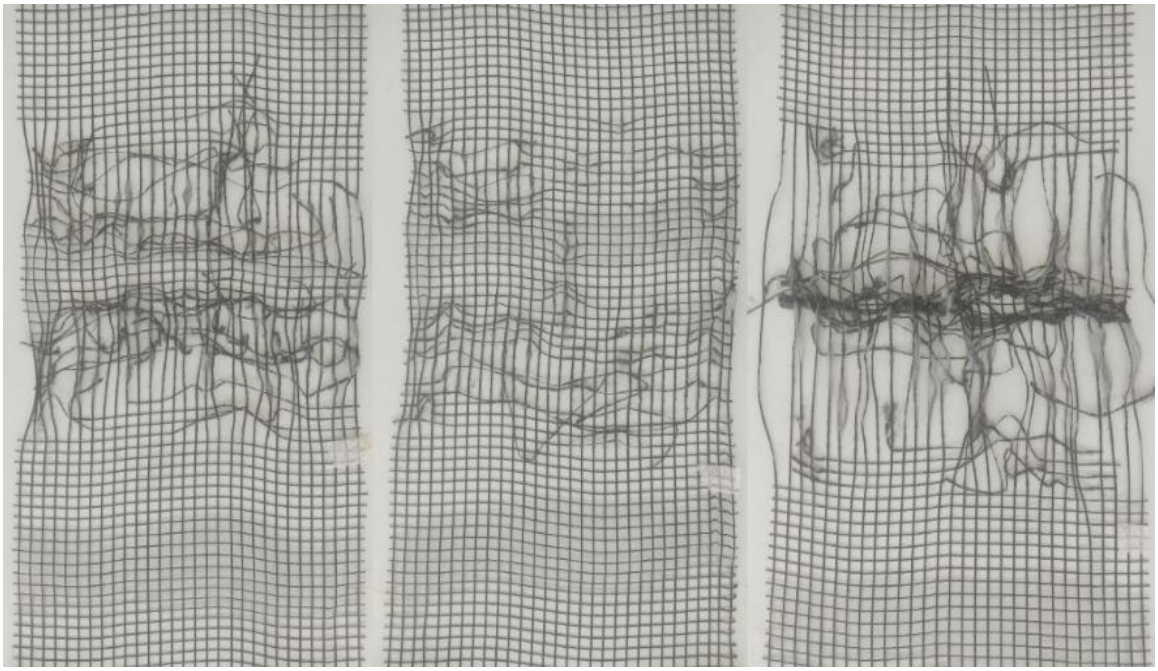
Fonte: Do autor.

Gráfico 10: Curva resistência de conexão (kN/m) por deformação (%) - Tensão Normal 50 kN/m² - B1.



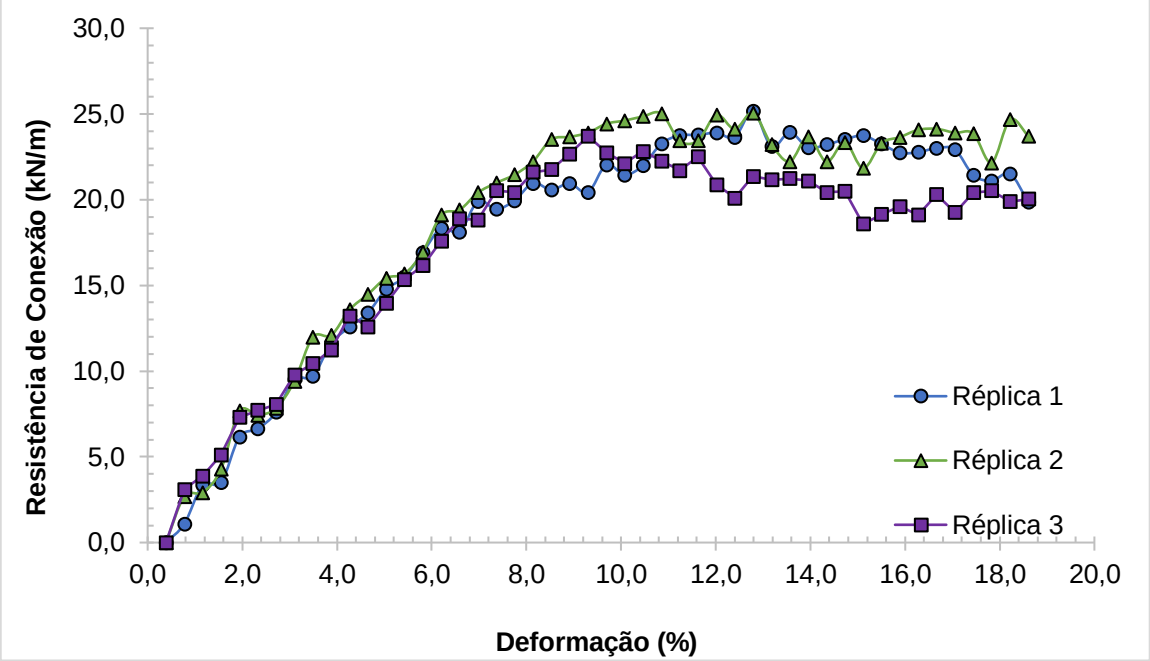
Fonte: Do autor.

Figura 31: Geogrelha pós ensaio - Tensão Normal 50 kN/m² - B1.



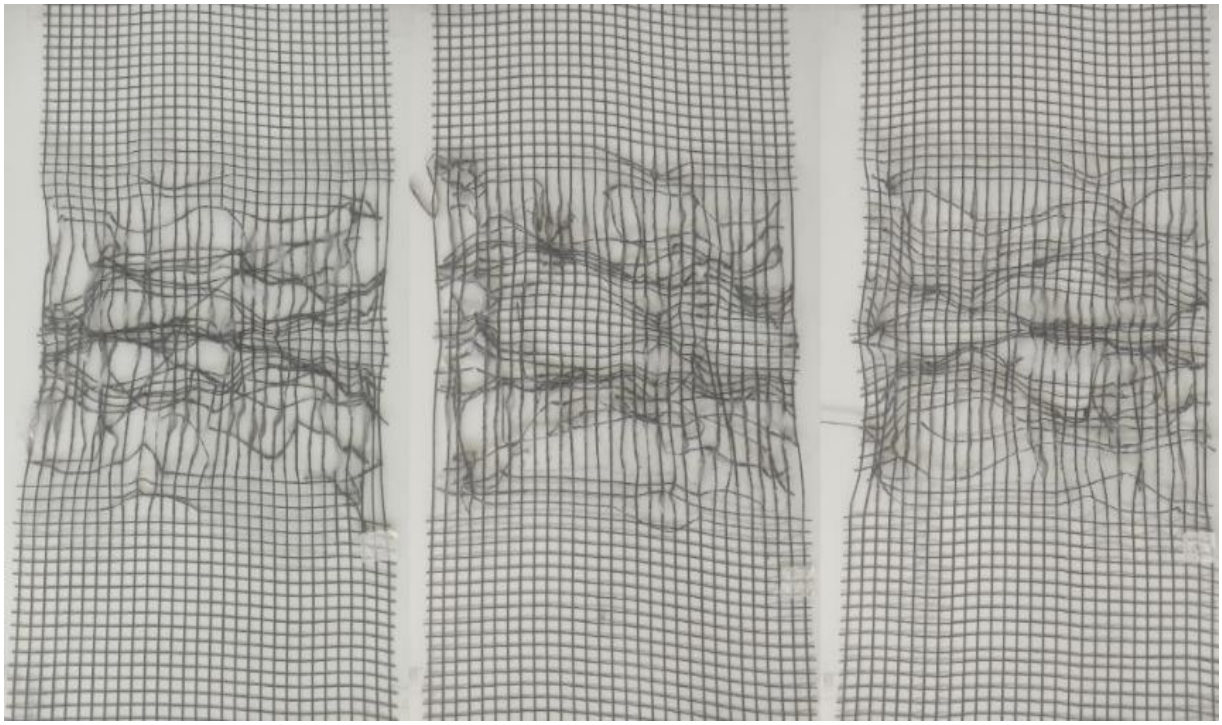
Fonte: Do autor.

Gráfico 11: Curva resistência de conexão (kN/m) por deformação (%) - Tensão Normal 60 kN/m² - B1.



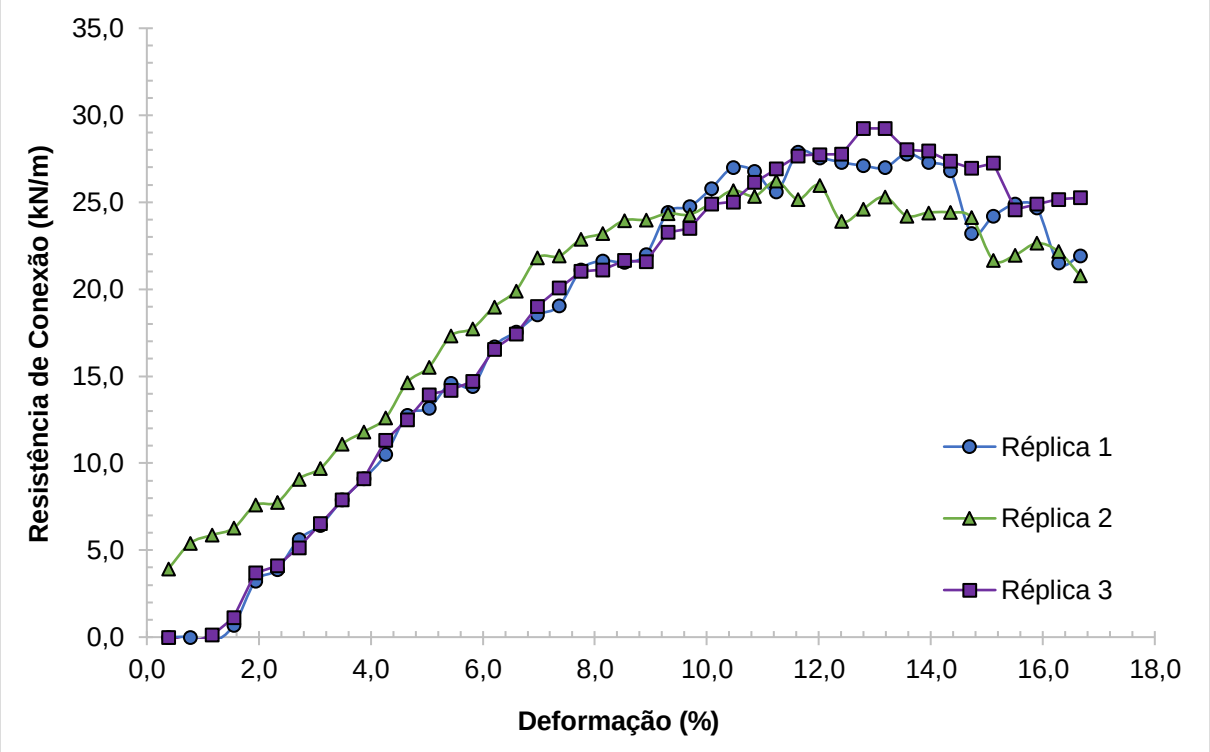
Fonte: Do autor.

Figura 32: Geogrelha pós ensaio - Tensão Normal 60 kN/m² - B1.



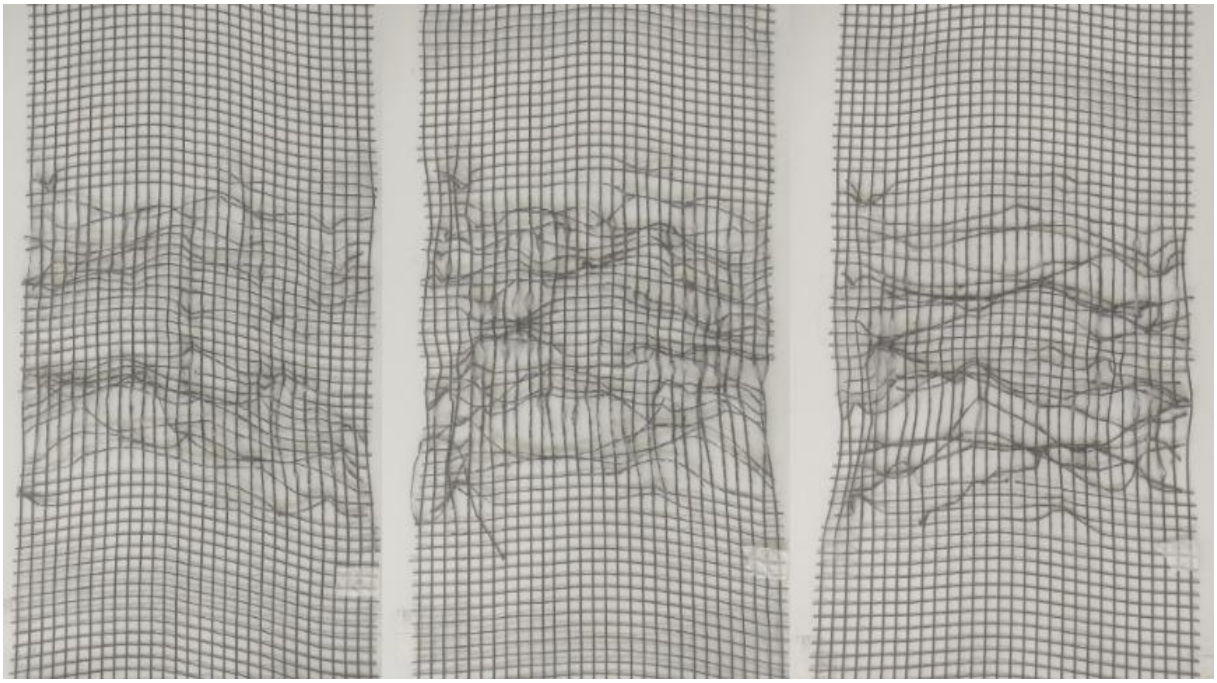
Fonte: Do autor.

Gráfico 12: Curva resistência de conexão (kN/m) por deformação (%) - Tensão Normal 70 kN/m².



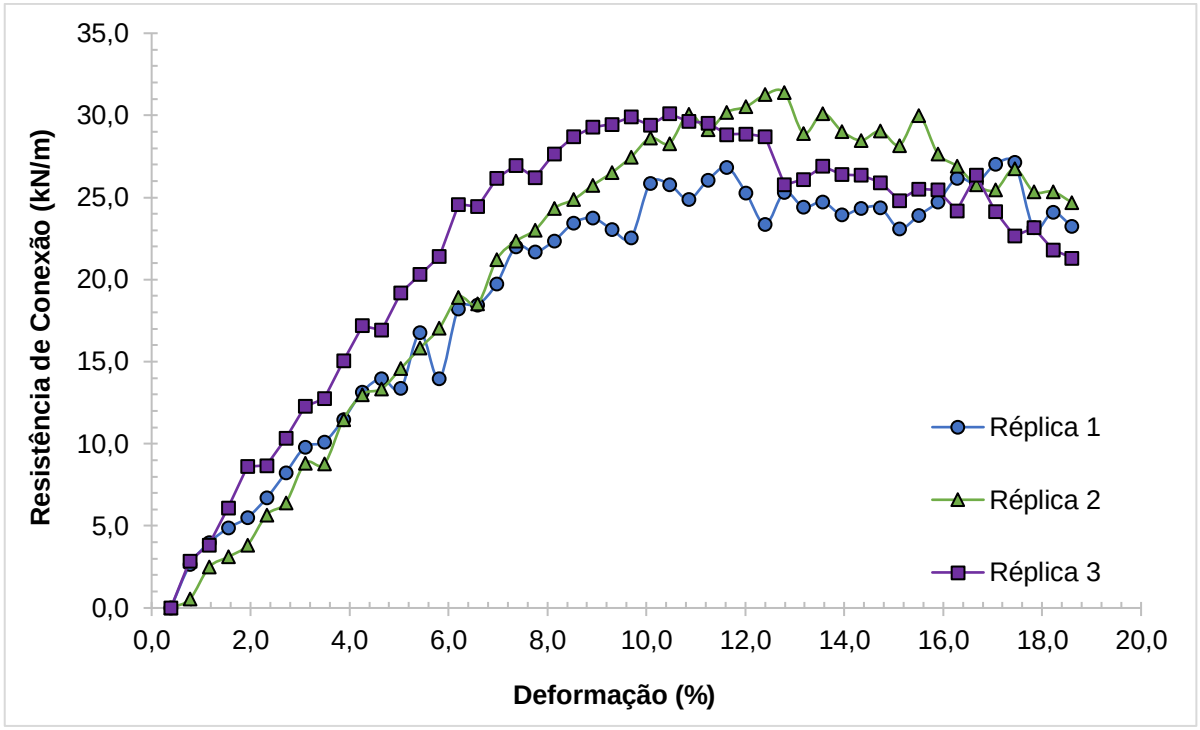
Fonte: Do autor.

Figura 33: Geogrelha pós ensaio - Tensão Normal 70 kN/m² - B1.



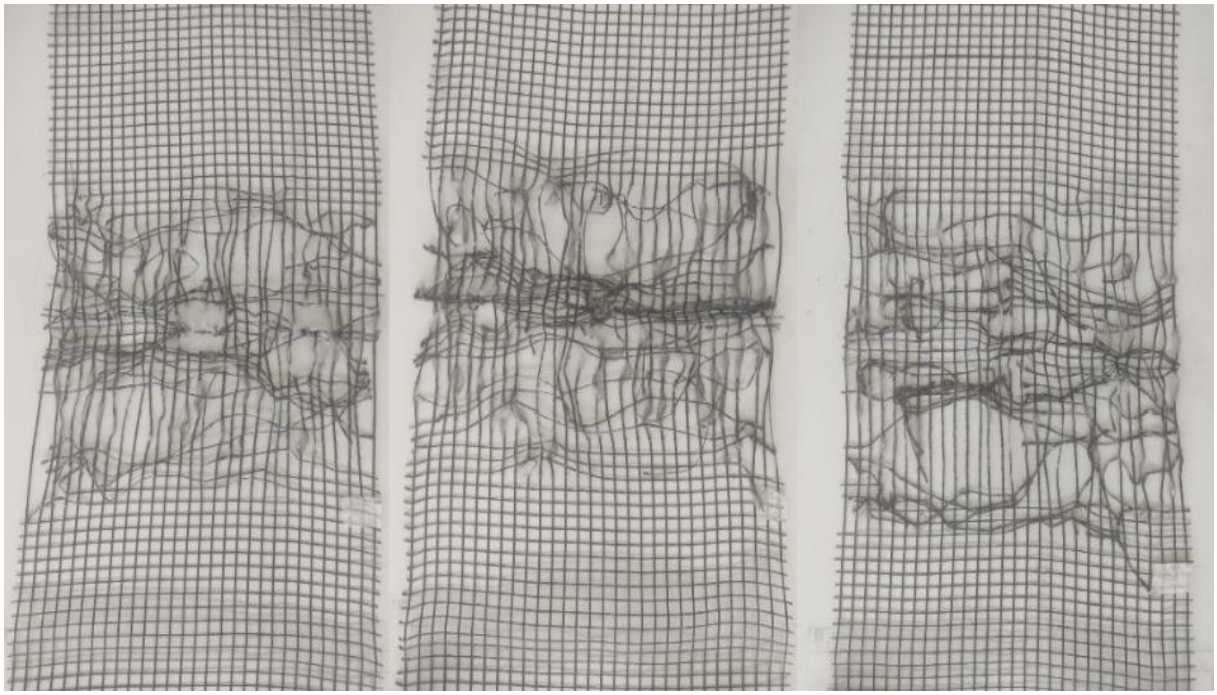
Fonte: Do autor.

Gráfico 13: Curva resistência de conexão (kN/m) por deformação (%) - Tensão Normal 80 kN/m² - B1.



Fonte: Do autor.

Figura 34: Geogrelha pós-ensaio - Tensão Normal 80 kN/m² - B1.

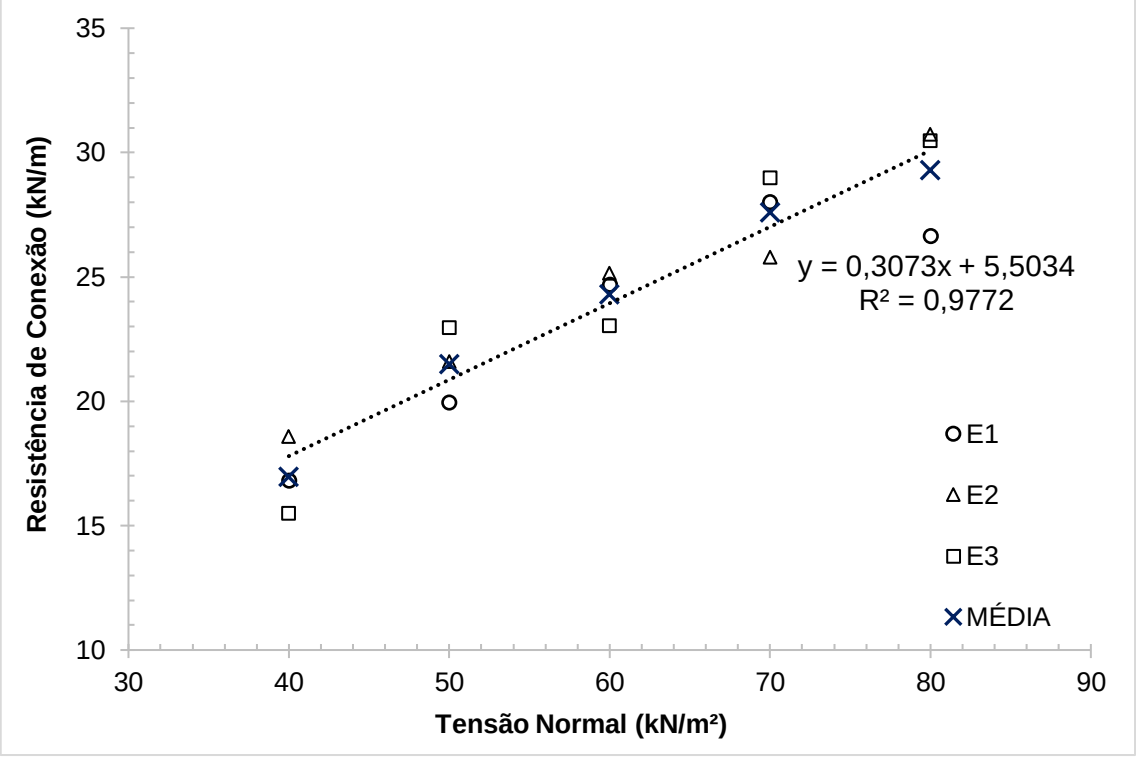


Fonte: Do autor.

Por meio dos Gráficos de 9 a 13 e Figuras de 30 a 34, há a confirmação visual dos maiores danos às geogrelhas, que ocorreram quando submetidas às maiores tensões normais.

No Gráfico 14 há a representação gráfica dos valores apresentados na Tabela 7, que possibilita observar novamente a relação linear entre a resistência de conexão (kN/m) e a tensão normal (kN/m²) aplicada. O modelo matemático linear apresenta boa adesão aos resultados, dado que o coeficiente de determinação (R^2) apresentou valor igual à 0,9772.

Gráfico 14: Relação linear de resistência de conexão em função das tensões normais aplicadas - Brita 1.



Fonte: Do autor.

4.4. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE GRANULOMETRIAS

A Tabela 9 sumariza os resultados de resistência de conexão (kN/m) em função dos cinco níveis de tensão normais aplicadas (kN/m²), bem como a diferença de resistência entre brita 0 e brita 1 e o acréscimo percentual de resistência para cada um dos níveis de tensão normal. No Gráfico 15, tem-se os resultados amostrais avaliados em termos de distribuição de caixas (*box-plot*) para brita 0 e brita 1.

Tabela 9: Comparativo entre resistências de conexão para brita 0 e brita 1.

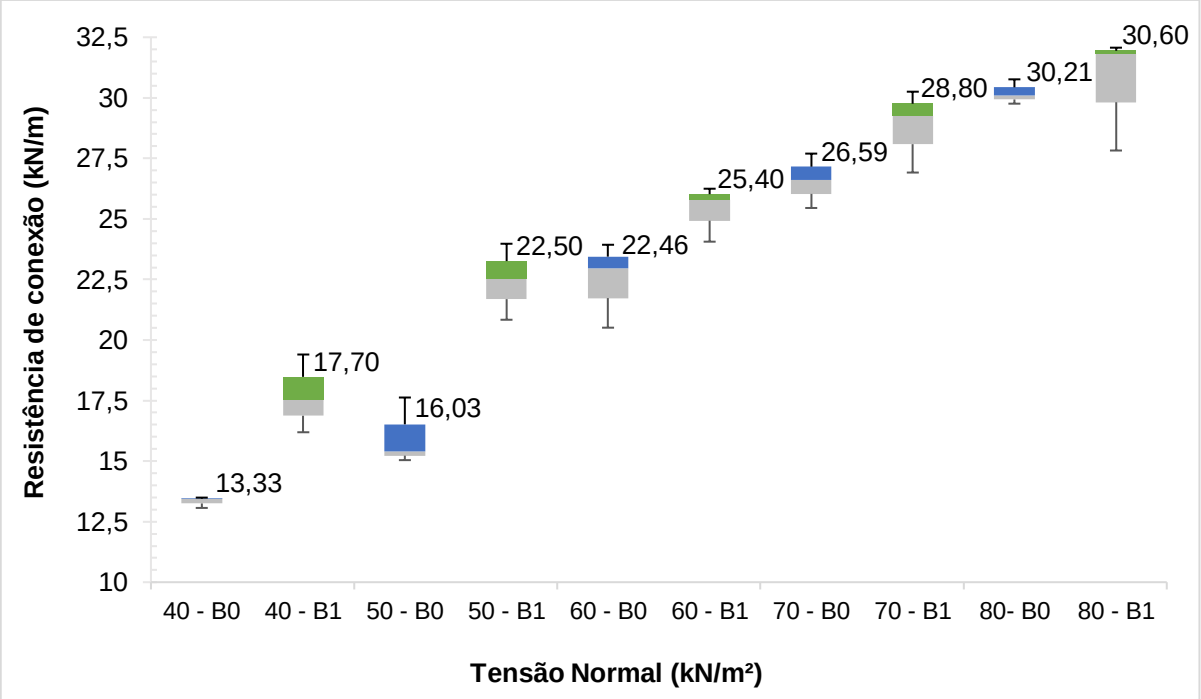
Tensão Normal (kN/m²)	Resistência de Conexão (kN/m)³		Diferença média de resistência (kN/m)	Acréscimo de resistência de conexão (%)
	Brita 0¹	Brita 1²		
40	13,3 ± 0,2	17,7 ± 1,1	4,4	24,9
50	16,0 ± 1,1	22,5 ± 1,1	6,5	28,9
60	22,5 ± 1,3	25,4 ± 0,9	2,9	11,4
70	27,1 ± 1,3	28,8 ± 1,3	1,7	5,9
80	30,2 ± 0,3	30,6 ± 1,9	0,4	1,3

OBSERVAÇÕES: ¹ 4,75/12,5 mm; ² 9,5/25,0 mm; ³ Desvio padrão (±)

Fonte: Do autor.

Maiores valores de resistência de conexão foram obtidos com emprego da brita 1 no preenchimento dos blocos de concreto. Os resultados indicam maiores acréscimos de resistência de conexão para as tensões normais aplicadas de 40 kN/m² e 50 kN/m², ou seja, 24,9% e 28,9%, respectivamente. Entretanto, há uma aproximação dos valores de resistência de conexão entre brita 0 e brita 1 a partir da tensão normal de 70 kN/m², cujo acréscimo foi de 1,3% para a tensão normal de 80 kN/m² e de 5,9% para 70kN/m².

Gráfico 15: Diagrama de caixa de resistências de conexões obtidas em relação às tensões normais - agrupado.



Fonte: Do autor.

A representação gráfica por diagrama de caixas possibilita visualizar a aproximação entre as resistências de conexão a partir da tensão normal aplicada de 70 kN/m².

Para ambos os agregados, há valores de resistência de conexão em razão da tensão normal em um comportamento linear, com o coeficiente de determinação (R^2) para os ensaios de conexão próximos de 1, brita 0 (Gráfico 7- brita 0) (R^2) 98,64% e para brita 1 (Gráfico 14 – brita 1), 97,72%.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os muros em solo reforçado com geogrelhas, faceados com blocos segmentais de concreto têm se mostrado como solução eficiente em termos de custo, inovação e conformidade com os Novos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Compostos pelo paramento (face), solo e reforço (geogrelha), é importante que o sistema seja dimensionado corretamente, com a devida consideração dos parâmetros e características dos materiais e da interação entre eles.

A caracterização dos agregados realizada demonstrou o comportamento dos materiais granulares após serem submetidos às cargas do ensaio. Apesar de não descaracterizados, ressalta-se a adequada seleção dos mesmos a fim de não comprometer as funções destes materiais quando submetidos a maiores tensões, como a drenagem, que, diante da redução dos vazios, pode comprometer a característica auto drenante deste tipo de faceamento.

Os ensaios de conexão entre blocos segmentais de concreto e geogrelha em dupla camada, realizados nesta pesquisa, demonstraram que os valores de resistência de conexão quando utilizada a brita 1 são superiores em comparação aos resultados obtidos para brita 0. Para tensões normais de 40 kN/m² e 50 kN/m², os acréscimos de resistência são superiores a 20%. Para tensões normais de 60 kN/m², 70 kN/m² e 80 kN/m², os resultados para resistência de conexão apresentam certa similaridade.

Dado que para maiores tensões normais, que representam maiores alturas de muros, a resistência de conexão teve resultados aproximados, há a viabilidade inicial para qualquer uma das granulometrias utilizadas. Entretanto, é crucial considerar fatores como o imbricamento, que depende diretamente da abertura da malha, índices de forma e processos de fabricação dos agregados.

O delineamento experimental apresentado foi orientado ao uso das granulometrias comercialmente conhecidas como brita 0 e brita 1 junto a uma tipologia de blocos segmentais e geogrelha com características particulares. Fatores como compactação do solo, tipo de bloco utilizado, escolha por camada simples ou dupla de geogrelha e suas resistências à tração, dentre outros, são determinantes para o desempenho da resistência de conexão.

O entendimento do comportamento da resistência de conexão é relevante para que os projetos de muros em solo reforçado possam ser realizados com maior segurança e viabilidade técnica-econômica. No Brasil, os ensaios de resistência de conexão ainda não têm preconização em norma, desta forma é necessário o uso de normativa norte americana (ASTM).

O conhecimento do comportamento dos sistemas de contenção possibilita maior difusão das técnicas existentes, que resulta na geração de oportunidades e desenvolvimento de estudos, projetos e obras que empreguem solo reforçado com faceamento em blocos segmentais.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O ensaio de resistência de conexão possibilita a avaliação do parâmetro de resistência por meio de diversas condições de contorno. O potencial exploratório se apresenta nas seguintes sugestões:

- avaliar o ganho de resistência de conexão em geogrelhas com diferentes resistências à tração e com matrizes poliméricas distintas;
- avaliar e comparar a resistência de conexão com as faixas granulométricas de 4,75/12,5mm e 9,25/25,0mm, comercialmente conhecidas, respectivamente, como brita 0 e brita 1, para camada simples de geogrelha;
- comparar os efeitos de diferentes tipos de faceamento nos resultados de resistência de conexão;
- avaliar o parâmetro de resistência de conexão para maiores valores de tensão normal.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A.A.F.; TOMA, B.H. **Análise Experimental da Conexão entre Blocos Segmentais e Geogrelhas de PVA**. Novembro de 2011. 105 páginas. Trabalho de Graduação – Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **ASTM D6638-18**: Standard Test Method for Determining Connection Strength Between Geosynthetic Reinforcement and Segmental Concrete Units (Modular Concrete Blocks). ASTM, West Conshohocken, PA, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**: Agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9935**: Agregados: terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16917:** Agregado graúdo: determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16920-1:** Muros e taludes em solos reforçados: parte 1: solos reforçados em aterros. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16972:** Agregados: determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16973:** Agregados: determinação do material fino que passa pela peneira de 75μm por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17054:** Agregados: determinação da composição granulométrica: método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10318-1:** Geossintéticos: parte 1: termos e definições. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

BARBIERI, J. C. **Desenvolvimento sustentável: das origens à Agenda 2030**. Editora Vozes, 2020.

BENJAMIM, C. V. S. **Avaliação experimental de protótipos de estruturas de contenção em solo reforçado com geotêxtil**. 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BRUGGER, P.J.; SILVA, A.E.F.; RODRIGUES, V.J.; SARAMAGO, R.P. Muro Reforçado em Geogrelhas e Blocos Segmentais – Um Caso de Obra com Altura de

13,50 metros. *In:* 4ª Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas - IV COBRAE. Salvador, **Anais [...]**. Salvador, 2005

CHRISTOPHER, B. R. Cost savings by using geosynthetics in the construction of civil works projects. In: **Proceedings of the 10th International Conference on Geosynthetics.** Essen, Germany: German Geotechnical Society, 2014.

EHRLICH, M.; BECKER, L. **Muros e taludes de solo reforçado: projeto e execução**. São Paulo: Oficina de textos. 126 p. 2009.

EHRLICH, M.; BECKER, L. **Muros e taludes de solo reforçado: projeto e execução**. 2. Ed. São Paulo: Oficina de textos. 2020.

G1 SP. **Muro na Zona Sul de SP desaba e 'esmaga' carros estacionados na rua. São Paulo: G1 SP**. Disponível em: https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2022/01/13/muro-de-condominio-na-zona-sul-de-sp-desaba-e-esmaga-carros-estacionados-na-rua.ghtml. 13 de janeiro de 2022. Acesso em: 21 abr. 2024.

G1 SP. **Muro na Zona Sul de SP desaba pela 2ª vez; em janeiro de 2022 estrutura ruiu e esmagou carros estacionados na via: G1 SP**. Disponível em: https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2024/04/02/muro-na-zona-sul-de-sp-volta-a-cair-tres-meses-apos-desabar-e-esmagar-carros-estacionados.ghtml. 02 de abril de 2024. Acesso em: 21 abr. 2024.

GUIMARÃES, M.G.A.; URASHIMA, D.C. Holistic engineering with geosynthetics in the pursuit of sustainable development: The 2030 Agenda and indicators of sustainable cities and communities. **Electronic Journal Envoronmental Forum of Alta Paulista**, v. 19, n. 4, p. 143-158, 2023.

GUSMÃO FILHO, J. **Desempenho de Obras Geotécnicas**. Recife: Editora Universitária/UFPE, 2006.

HUANG, Y.; MATSUMOTO, K. Drivers of the change in carbon dioxide emissions under the progress of urbanization in 30 provinces in China: A decomposition analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 322, 2021.

INTERNATIONAL GEOSYNTHETICS SOCIETY. **Preparar o terreno para um futuro promissor**. Como é que os geossintéticos servem a socidade após meio século. 2021. Disponível em: https://www.geosyntheticssociety.org/wp-content/uploads/2021/10/IGS_Ebook_Portuguese_V4.pdf. Acesso em: 23 abr. 2023.

IPIRANGA, R.; SILVIA, A.; GODOY, A.S.; BRUNSTEIN, J. Introdução. **Revista de Administração Mackenzie**, São Paulo, v. 12, n. 3, p. 13-20, junho, 2011.

KIM, Y.; KOTWAL, A.R.; CHO, B.; WILDE, J.; YOU, B.H. Geosynthetic Reinforced Steep Slopes: Current Technology in the United States. **Applied Sciences**, v. 9, n. 10, 2019.

KOERNER, R.M.; KOERNER, J.R.; KOERNER, G.R. Relative Sustainability (i.e., Embodied Carbon) Calculations With Respect to Applications Using Traditional Materials Versus Geosynthetics. **Geosynthetic Institute, GSI White Paper #41**, 16p.

KOERNER, R.M.; SOONG, T.-Y. Geosynthetic reinforced segmental retaining walls. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 19, n. 6, p. 359–386, 2001.

LI, G.; FANG C.; LI, Y., WANG Z.; SUN S.; *et al.* Global impacts of future urban expansion on terrestrial vertebrate diversity. **Nature communications**, v. 13, n. 1, p. 1628, 2022.

LOPES, M.G.; BARROSO M. A durabilidade dos geossintéticos: estigma ou fator de sustentabilidade. **Geotecnia**, n. Extra, p. 9-19, 2024.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. 15 de setembro 2015. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustentavel. Acesso em: 19 abr. 2024.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **A ONU e o meio ambiente**. A ONU e o meio ambiente. 16 de setembro 2020. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/91223-onu-e-o-meio-ambiente. Acesso em: 19 abr. 2024.

PALMEIRA, E. M. **Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente**. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.

PAULINO, G.R. **Parâmetro de desempenho em muros de contenção em solo reforçado: Resistência de conexão geogrelha-blocos segmentais.** 2022. 66 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2022.

PINTO, F.M. **Ensaios laboratoriais para a determinação da resistência de conexão entre geogrelhas de PVA e blocos segmentais.** 2014. 323 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014.

QUARESMA, L.F. Relatório técnico 30: Perfil de brita para construção civil. **Belo Horizonte: J. Mendo Consultoria**, 2009.

ROCHA, P.A.S.; URASHIMA, D.C.; GUIMARÃES, M.G.A. Desempenho de agregados reciclados de concreto no preenchimento de blocos segmentais em muros de solo reforçado com geogrelhas. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 28, n. 1, p. e20220251, 2023.

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

SOUSA, A. M. **Desempenho da resistência de conexão entre geogrelhas e blocos segmentais com emprego de camadas simples e dupla em muros de solo reforçado.** 2023. 71 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2023.

TOUZE, N. Healing the world: a geosynthetics solution. **Geosynthetics International,** v. 28, n. 1, p. 1-31, 2021.

UNITED NATIONS. **World Population Prospects 2019: Highlights**. Department of Economic and Social Affairs, Population Division.**,** 2019.

URASHIMA, D.C.; MARTINS, C.H. Ensaio para determinação dos parâmetros de interface bloco-geogrelha em estruturas de contenção de taludes por blocos intertravados. *In*: XXXI Jornadas SudAmericanas de Ingenieria Estrutuctural. Mendoza. **Anais[...]**. Mendoza, 2004

VERTEMATTI, C.J. **Manual Brasileiro de Geossintéticos.** São Paulo: Blucher, 2015.