

UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO

PROGRAMA DE POS GRADUAÇÃO EM CIDADES INTELIGENTES E

SUSTENTÁVEIS

CLEYTON VICENTE ROCHA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE GABIÕES ELETROSSOLDADOS COM
DIFERENTES MATERIAIS DE PREENCHIMENTO PARA APLICAÇÕES EM
INFRAESTRUTURA SUSTENTÁVEL**

São Paulo

2025

CLEYTON VICENTE ROCHA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE GABIÕES ELETROSSOLDADOS COM
DIFERENTES MATERIAIS DE PREENCHIMENTO PARA APLICAÇÕES EM
INFRAESTRUTURA SUSTENTÁVEL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Cidades Inteligentes e Sustentáveis
da Universidade Nove – UNINOVE, como requisito
para obtenção do grau de **Mestre** em Cidades
Inteligentes e Sustentáveis

Orientador: Prof. Dr. João Alexandre Paschoalin Filho

São Paulo

2025

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE GABIÕES ELETROSSOLDADOS COM
DIFERENTES MATERIAIS DE PREENCHIMENTO PARA APLICAÇÕES EM
INFRAESTRUTURA SUSTENTÁVEL**

CLEYTON VICENTE ROCHA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Cidades Inteligentes e Sustentáveis
da Universidade Nove – UNINOVE, como requisito
para obtenção do grau de **Mestre** em Cidades
Inteligentes e Sustentáveis

Orientador: Prof. Dr. João Alexandre Paschoalin Filho

Prof. Dr. João Alexandre Paschoalin Filho – Universidade Nove de Julho – UNINOVE (Orientador)

Prof. Dr. Cristiano Capellani Quaresma – Universidade Nove de Julho

Prof. Dr. David de Carvalho – Universidade de Campinas - UNICAMP

São Paulo, 17 de março de 2025

À memória de Noêmia Nascimento Vicente, minha amada avó, cuja dedicação me motivou a alcançar este objetivo. Sua admiração pelo mundo acadêmico e compreensão da importância do estudo como transformador da consciência humana me inspiraram. Sua presença fará sempre parte da minha jornada.

AGRADECIMENTOS

"Expresso minha sincera gratidão ao meu orientador, Prof. Dr. João Alexandre Paschoalin Filho, pela sua orientação experiente, estímulo intelectual e paciência infinita ao longo desta pesquisa. Suas valiosas críticas e sugestões foram cruciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. Cristiano Capellani Quaresma e Prof. Dr. David de Carvalho pelas suas importantes contribuições e pela dedicação na avaliação desta dissertação. Sou grato à Universidade Nove de Julho pelo suporte institucional como também a Universidade de Medelin no âmbito de Módulo Internacional.

Aos meus colegas do Programa de Pós-Graduação em Cidades Inteligentes e Sustentáveis, agradeço pelas discussões produtivas e pelo ambiente colaborativo. Dentre eles destaco o incentivo e suporte emocional oferecido pelas amigas Leda Nelo e Ana Sofia, fiéis e incansáveis.

Ao Colega Flávio Fontes com quem dividi horas de trabalhos no laboratório da Unicamp para o enriquecimento deste trabalho.

Ao querido técnico de laboratório Paulo Nunes que nos orientou com dedicação nos ensaios de laboratório.

A E.M.B., T.A pela não concretização de certas expectativas, paradoxalmente, constituiu um vetor de crescimento e aprendizado em minha jornada.

Finalmente, e não menos importante, agradeço à minha mãe Edna, minha irmã Dominick, minha filha Gabriela, a família e aos meus amigos pelo amor, apoio incondicional e por me incentivarem a seguir em frente, mesmo nos momentos mais desafiadores. A todos, o meu muito obrigado."

RESUMO

Considerando à sua rigidez, praticidade e versatilidade no uso de materiais de enchimento, os gabiões eletrossoldados têm se tornado cada vez mais populares em projetos geotécnicos e urbanos. Entretanto, ainda há poucos estudos sobre seu desempenho mecânico, especialmente no contexto brasileiro. Diante disso, esta pesquisa analisou a viabilidade técnica e estrutural da utilização de diferentes materiais de preenchimento em módulos de gabiões eletrossoldados, comparando seus desempenhos sob compressão simples. Para isso, foram estudados gabiões preenchidos com areia média compactada, fofa e brita #2, previamente caracterizados quanto à granulometria e peso específico. Os ensaios foram conduzidos em módulos experimentais de $0,4 \times 0,4 \times 0,4$ m, nos quais foram analisados resistência à compressão, deformações horizontal e vertical, além dos módulos secante, tangente e de rigidez. Também foram realizadas análises estatísticas, incluindo teste para verificar diferenças significativas entre os preenchimentos e a determinação de correlação pelo método de Pearson para avaliar a relação entre os parâmetros mecânicos analisados. Os resultados mostraram que o preenchimento com brita #2 proporcionou maior estabilidade e menor deformabilidade, evidenciado pela menor variação das deformações verticais e horizontais ao longo do carregamento. O comportamento rígido da brita resultou em valores mais elevados de módulo secante e de rigidez, tornando este preenchimento mais adequado para estruturas que exigem maior capacidade de suporte à carga e menor deslocamento sob tensões elevadas. Já os gabiões preenchidos com areia média compactada apresentaram um comportamento mais deformável, com redução da rigidez ao longo do carregamento, refletindo maior sensibilidade às tensões aplicadas e maior variação nas deformações. As análises estatísticas indicaram que, para alguns parâmetros analisados, houve diferença estatisticamente significativa entre os diferentes preenchimentos, confirmando que a escolha do material impacta diretamente o desempenho estrutural dos gabiões. A correlação pelo método de Pearson demonstrou uma relação significativa entre a tensão máxima vertical e as deformações, evidenciando que o aumento da carga aplicada resulta em uma resposta diferenciada conforme o material de preenchimento. Os gabiões preenchidos com brita apresentaram correlação mais linear e previsível, enquanto aqueles preenchidos com areia demonstraram maior dispersão nos dados, reforçando a necessidade de um controle rigoroso na compactação desse material para garantir um desempenho mais estável. Além disso, são apresentadas as curvas tensão-deformação

obtidas nos ensaios de compressão, que podem ser utilizadas como ferramenta prática para estimativas de deformação em projetos básicos de contenções provisórias. Essas curvas permitem prever o comportamento dos gabiões sob diferentes cargas aplicadas, auxiliando na concepção de soluções temporárias para estabilização de taludes, contenção de detritos e reforço de infraestrutura emergencial. Esta pesquisa realça o potencial das estruturas de gabião em infraestruturas urbanas sustentáveis. As características intrínsecas dos gabiões, como permeabilidade, flexibilidade e resistência, contribuem para a redução da pressão hidrostática e promovem a integração ambiental. Adicionalmente, do ponto de vista da sustentabilidade, esta tecnologia se destaca por ser um método de construção a seco, eliminando a necessidade de cimento ou argamassa. Consequentemente, o consumo de recursos naturais é reduzido e a reutilização de materiais de baixo impacto ambiental é promovida. No entanto, a utilização de areia e brita como material de preenchimento somente é viável em gabiões de malha eletrosoldada, devido à rigidez da malha, que garante o confinamento adequado desses materiais granulares. Para evitar a perda de material pelos espaços da malha, recomenda-se a utilização de manta geotêxtil não tecida como revestimento interno. Os resultados desta pesquisa contribuem significativamente para a adoção de gabiões eletrossoldados em projetos de engenharia geotécnica e infraestrutura urbana, fornecendo subsídios técnicos para seu uso eficiente e sustentável. Além disso, abrem caminho para novas investigações sobre o comportamento estrutural dessas estruturas em diferentes condições de carregamento e confinamento, consolidando seu potencial como alternativa viável, econômica e ambientalmente responsável para estabilização de solos e contenção de encostas.

Palavras chaves: Gabiões eletrossoldados; contenções; gabiões caixa; estabilidade de encostas

ABSTRACT

Welded mesh gabions have been increasingly used in geotechnical and urban applications due to their structural rigidity, ease of assembly, and ability to accommodate different filling materials. Despite their growing adoption, studies on their mechanical behavior remain limited, particularly in Brazil. Therefore, this research analyzed the technical and structural feasibility of using different filling materials in welded mesh gabion modules, comparing their performance under simple compression. For this purpose, gabions filled with compacted medium sand and #2 gravel were studied, previously characterized in terms of particle size distribution and specific weight. The tests were conducted on experimental modules of $0.4 \times 0.4 \times 0.4$ m, in which compressive strength, horizontal and vertical deformations, as well as secant, tangent, and stiffness moduli were analyzed. Additionally, statistical analyses were performed, including the t-test to verify significant differences between the fillings and correlation determination using Pearson's method to evaluate the relationship between the analyzed mechanical parameters. The results showed that the #2 gravel filling provided greater stability and lower deformability, evidenced by the lower variation in vertical and horizontal deformations throughout the loading process. The rigid behavior of gravel resulted in higher secant modulus and stiffness values, making this filling more suitable for structures requiring greater load-bearing capacity and lower displacement under high stresses. Conversely, gabions filled with compacted medium sand exhibited a more deformable behavior, with reduced stiffness throughout loading, reflecting higher sensitivity to applied stresses and greater variation in deformations. The statistical analyses indicated that, for some of the analyzed parameters, there was a statistically significant difference between the different fillings, confirming that the choice of material directly impacts the structural performance of the gabions. The Pearson correlation method demonstrated a significant relationship between maximum vertical stress and deformations, showing that increasing applied loads results in a distinct response depending on the filling material. Gabions filled with gravel exhibited a more linear and predictable correlation, while those filled with sand showed greater data dispersion, reinforcing the need for strict compaction control of this material to ensure more stable performance. Additionally, the stress-strain curves obtained from the compression tests are presented, which can be used as a practical tool for deformation estimates in basic designs of temporary retaining structures. These curves allow for predicting the behavior of gabions under different applied loads, aiding in the design of

temporary solutions for slope stabilization, debris retention, and emergency infrastructure reinforcement. The research highlights the potential of these structures in sustainable urban infrastructure, as gabions are permeable, flexible, and resistant, characteristics that reduce hydrostatic pressure and promote environmental integration. From a sustainability perspective, this technology stands out as a dry construction method, eliminating the need for cement or mortar, reducing the consumption of natural resources, and promoting the reuse of low-impact materials. However, the use of sand and gravel as filling materials is only feasible in welded mesh gabions, due to the rigidity of the mesh, which ensures proper confinement of these granular materials. To prevent material loss through the mesh openings, the use of non-woven geotextile fabric as an internal lining is recommended. The findings of this research significantly contribute to the adoption of welded mesh gabions in geotechnical engineering and urban infrastructure projects, providing technical guidelines for their efficient and sustainable use. Furthermore, they pave the way for new investigations into the structural behavior of these structures under different loading and confinement conditions, consolidating their potential as a viable, cost-effective, and environmentally responsible alternative for soil stabilization and slope containment.

Keywords: Welded mesh gabions; retaining walls; box gabions; slope stability.

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

- ABMS - Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica ABNT –
Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AC – Antes de Cristo
- BTC - Baixo teor de carbono
- CNM - Confederação Nacional dos Municípios
- COBRAMSEG - Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
- DAE - Departamento de Água e Esgoto
- FS – Fatores de segurança
- IoT – “*Internet of Things*”
- MDR - Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional
- NBR – Norma Brasileira
- NIST – “*National Institute of Standards and Technology*”
- PRC - Rodovias Estaduais Coincidentes
- RCC - Resíduos de construção civil
- RCD - Resíduos de construções e demolição
- SBN – Soluções baseadas na natureza
- SIURB - Secretaria Municipal de Infraestrutura Urbana e Obras
- SP – São Paulo
- SINAPI - Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
- TIC - Tecnologias de informação e comunicação
- UNICAMP – Universidade de Campinas

LISTA DE SIMBOLOS

δ – Deslocamento
d – Distância
E – Empuxo
e - Excentricidade
F – Coeficiente de segurança contrarruptura
FS – Fator de segurança
Fd – Coeficiente de segurança contra o deslizamento
Ft - Coeficiente de segurança contra o tombamento
 kgf/m^3 - Quilograma força por metro cúbico
 kg/m^3 - Quilograma por metro cúbico
kN – Quilonewton
kN/m – Quilonewton por metro
kp – Coeficiente de empuxo passivo
kPa – Quilopascal
 k° - Coeficiente de empuxo no repouso
MPa – Megapascal
N - Força normal
P – Peso próprio
 p - Tensão uniforme
Pa – Pressão ativa
 $p_{\text{crit.}}$ - Tensão crítica
Pp – Pressão passiva
Pu – Peso da caixa de gabião metálica
R\$ - Reais (moeda)
T - Força tangencial
tan - Tangente
 \tan^2 – Tangente ao quadrado
Td - Força tangencial de deslizamento
 tf/m^3 - Tonelada força por metro cúbico
 tf/m^2 - Tonelada força por metro quadrado
V1 e V2 – Forças verticais
 $\sigma_{\text{adm.}}$ – Tensão normal máxima admissível

$\sigma_{\text{máx.}}$ – Tensão máxima

$\sigma_{\text{mín.}}$ – Tensão mínima

γ - Peso específico do solo

γ' - Peso específico do solo de retro aterro

γg - Peso específico do gabião

w - Umidade gravimétrica

ϕ - Ângulo de atrito interno do solo

δ^* - Ângulo de atrito entre o solo da fundação e a base do muro

Σ - Somatória

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. INSTALAÇÃO DE TALUDE – RODOVIA MOGI-BERTIOGA. FONTE: G1 SANTOS, 2018.....	26
FIGURA 2. MAPA DE LOCALIZAÇÃO DE TRECHOS EM INTERVENÇÃO PARA ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES. FONTE: DER – PR.....	28
FIGURA 3. SEÇÃO TRANSVERSAL – OBRA EMERGENCIAL NA PRC-476. FONTE: DER – PR, 2024.	29
FIGURA 4. CÓRREGO VILA SAPO – JAÇANÃ/TREMEMBÉ, SP. FONTE: PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2024.....	30
FIGURA 5. TIPOS DE GABIÃO APLICADO. FONTE: LF AMBIENTAL, 2020	31
FIGURA 7. GABIÃO TIPO COLCHÃO. FONTE: WINIWER, 2009	34
FIGURA 8. GABIÃO TIPO CAIXA. FONTE: WINIWER, 2009	35
FIGURA 9. GABIÃO TIPO ELETROSOLDADO. FONTE: PRÓPRIO AUTOR, 2024	36
FIGURA 10. MALHA GABIÃO ELETROSOLDADO. FONTE: BELGO, 2024	38
FIGURA 11: BARRAGEM ROMPIDA, REPRESA DO CILO. FONTE: WESLEY JUSTINO/EPTV, 2022	40
FIGURA 12. BARRAGEM DE GABIÃO – REPRESA DE CILO. FONTE: NOVO MOMENTO, 2022	40
FIGURA 13. OBRA HIDRÁULICA – CÓRREGO ITAQUERA MIRIM 2022. FONTE: PREFEITURA DE SÃO PAULO (2023)	41
FIGURA 14. ILUSTRAÇÃO DE PROJETO DE REVESTIMENTO DE GABIÃO – RIO PINHEIROS. FONTE: MACCAFERRI, 2020.	41
FIGURA 15. REVESTIMENTO EM GABIÃO – RIO PINHEIROS, PARQUE BRUNO COVAS. FONTE: AUTORIA PRÓPRIA, 2024.....	42
FIGURA 16. REVESTIMENTO ACESSO EM GABIÃO - RIO PINHEIROS. FONTE: AUTORIA PRÓPRIA, 2024.....	42
FIGURA 17. OBRA RODOVIÁRIA - CONTENÇÃO DA ROD SP-131, BORRIFO -2023. FONTE: RADAR LITORAL, 2023.	43
FIGURA 18. TALUDES EM DECORAÇÃO E PAISAGISMO. FONTE: TOTAL CONSTRUÇÃO, 2024.	43
FIGURA 19. TIPOS DE RUPTURA DE MUROS DE GABIÕES. FONTE: MANUAL DE OBRAS DE CONTENÇÃO, MACCAFERRI, 2017	44
FIGURA 20. FORÇAS ATUANTES SOBRE ESTRUTURA DE ARRIMO. FONTE: MANUAL DE OBRAS, MACCAFERRI, 2017.	45
FIGURA 21. RUPTURA GLOBAL DO MACIÇO PELO MÉTODO DE CUNHAS. FONTE: BARROS, 2005. 45	
FIGURA 22. RUPTURA GLOBAL DO MACIÇO PELO MÉTODO DAS FATIAS. FONTE: BARROS, 2005.. 46	
FIGURA 23. CAPACIDADE DE CARGA DA FUNDAÇÃO. FONTE: GERSCOVICH, 2010.....	46
FIGURA 24. CAPACIDADE DE CARGA DA FUNDAÇÃO (RESULTANTE FORA DO NÚCLEO CENTRAL). FONTE: GERSCOVICH, 2010.....	48
FIGURA 25. ARRASTE DE UMA CONTENÇÃO EM GABIÃO. FONTE: (BARROS, 2010)	49
FIGURA 26. FORÇAS ATUANTES NO GABIÃO QUANTO AO DESLIZAMENTO. FONTE: (BARROS, 2010)	49
FIGURA 27. TOMBAMENTO DO ARRIMO EM MURO DE GABIÃO. FONTE: (BARROS, 2010)	50

FIGURA 28. FORÇAS ATUANTES NO GABIÃO QUANTO AO TOMBAMENTO. FONTE: (BARROS, 2010)	51
FIGURA 29. RUPTURA INTERNA DO MURO DE GABIÃO. FONTE: (BARROS, 2010)	51
FIGURA 30. DISPOSIÇÃO DO EMISSOR, COM POSICIONAMENTO DECIBELÍMETROS. FONTE: SOUZA JUNIOR, 2023.	56
FIGURA 31. (A) GABIÃO VAZIO, (B) INÍCIO DE MONTAGEM, (C) GABIÃO COM RCD. FONTE: RAMOS, 2022.....	57
FIGURA 32. LOCAÇÃO E PREENCHIMENTO DOS GABIÕES CAIXA. FONTE: PASCHOALIN FILHO ET AL., 2020.....	58
FIGURA 33. PAINÉIS E CONEXÕES EM ESPIRAL DO GABIÃO ELETROSSOLDADO. FONTE: DADOS DA PESQUISA	63
FIGURA 34. CHAPAS DE AÇO COM GABARITO PARA APOIO DOS GABIÕES. FONTE: DADOS DA PESQUISA	64
FIGURA 35. PREENCHIMENTO DO CORPO DE PROVA COM AREIA. FONTE: DADOS DA PESQUISA	66
FIGURA 38. ENSAIO DE COMPRESSÃO EM EXECUÇÃO. FONTE: DADOS DA PESQUISA.....	67
FIGURA 39. AFERIÇÃO DA DEFORMAÇÃO HORIZONTAL NO EIXO DO GABIÃO COM TRENA. FONTE: DADOS DA PESQUISA	67
FIGURA 40. CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA OBTIDA. FONTE: DADOS DA PESQUISA	70
FIGURA 41. CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA OBTIDA. FONTE: DADOS DA PESQUISA	73
FIGURA 42. CURVA CARGA VERSUS DESLOCAMENTO AREIA COMPACTA CP01. FONTE: DADOS DA PESQUISA	78
FIGURA 43. CURVA CARGA VERSUS DESLOCAMENTO AREIA COMPACTA CP02. FONTE: DADOS DA PESQUISA	79
FIGURA 44. CURVA CARGA VERSUS DESLOCAMENTO AREIA COMPACTA CP03. FONTE: DADOS DA PESQUISA	81
FIGURA 45. CURVA CARGA VERSUS DESLOCAMENTO AREIA FOFA CP01. FONTE: DADOS DA PESQUISA	83
FIGURA 46. CURVA CARGA VERSUS DESLOCAMENTO AREIA COMPACTA CP01. FONTE: DADOS DA PESQUISA	86
FIGURA 47. CURVA CARGA VERSUS DESLOCAMENTO AREIA COMPACTA CP02. FONTE: DADOS DA PESQUISA	87
FIGURA 48. CURVA VERSUS DESLOCAMENTO AREIA COMPACTA CP 03. FONTE: DADOS DA PESQUISA	87
FIGURA 49. CURVA CARGA VERSUS DESLOCAMENTO AREIA FOFA CP01. FONTE: DADOS DA PESQUISA	89
FIGURA 50. CURVA CARGA VERSUS DESLOCAMENTO BRITA CP01. FONTE: DADOS DA PESQUISA	93
FIGURA 51. CURVA CARGA VERSUS DESLOCAMENTO BRITA CP02. FONTE: DADOS DA PESQUISA	93

FIGURA 52. CURVA CARGA VERSUS DESLOCAMENTO BRITA CP03. FONTE: DADOS DA PESQUISA94	
FIGURA 53. CURVA CARGA VERSUS DESLOCAMENTO BRITA 2 CP01. FONTE: DADOS DA PESQUISA	97
FIGURA 54. CURVA CARGA VERSUS DESLOCAMENTO BRITA 2 CP02. FONTE: DADOS DA PESQUISA	98
FIGURA 55. CURVA CARGA VERSUS DESLOCAMENTO BRITA 2 CP03. FONTE: DADOS DA PESQUISA	98
FIGURA 56. CURVA VERSUS DEFORMAÇÃO VERTICAL - AREIA COMPACTA. FONTE: DADOS DA PESQUISA	110
FIGURA 57. CURVA TENSÃO VERSUS DEFORMAÇÃO VERTICAL – BRITA #2. FONTE: DADOS DA PESQUISA	110

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. FATORES DE CAPACIDADE DE CARGA (VESIC, 1975).....	48
TABELA 2. NÍVEL DE SEGURANÇA DESEJADO CONTRA DANOS A VIDAS HUMANAS.....	54
TABELA 3. DADOS OBTIDOS A PARTIR DO ENSAIO DE PENEIRAMENTO DA AMOSTRA DE AREIA	69
TABELA 4. DADOS OBTIDOS A PARTIR DOS ENSAIOS DE PERMEABILIDADE A CARGA CONSTANTE	71
TABELA 5. DADOS OBTIDOS A PARTIR DO ENSAIO DE PENEIRAMENTO DA AMOSTRA DE BRITA	73
TABELA 6. DADOS BRUTOS PARA CÁLCULO DO PESO ESPECÍFICO REAL DA BRITA.....	74
TABELA 7. DADOS OBTIDOS A PARTIR DOS ENSAIOS DE PERMEABILIDADE A CARGA CONSTANTE	74
TABELA 8. PARÂMETROS DIMENSIONAIS E VOLUMÉTRICOS DOS CORPOS DE PROVA – AREIA FOFA	76
TABELA 9. PARÂMETROS DIMENSIONAIS E VOLUMÉTRICOS DOS CORPOS DE PROVA – AREIA COMPACTA	76
TABELA 10. COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS OBTIDAS POR MEIO DO TESTE T DE STUDENT	77
TABELA 11. PARÂMETROS OBTIDOS A PARTIR DAS CURVAS DETERMINADAS.....	84
TABELA 12. PARÂMETROS OBTIDOS A PARTIR DAS CURVAS DETERMINADAS.....	84
TABELA 13. ANÁLISE ESTATÍSTICA TENSÃO MÁXIMA ATINGIDA PARA GABIÃO COM AREIA COMPACTA	85
TABELA 14. PARÂMETROS OBTIDOS A PARTIR DAS CURVAS DETERMINADAS.....	90
TABELA 15. PARÂMETROS OBTIDOS A PARTIR DAS CURVAS DETERMINADAS.....	90
TABELA 16. ANÁLISE ESTATÍSTICA TENSÃO MÁXIMA ATINGIDA PARA GABIÃO COM AREIA COMPACTA	90
TABELA 17. ANÁLISE ESTATÍSTICA DEFORMAÇÃO MÁXIMA ATINGIDA PARA GABIÃO COM AREIA COMPACTA	90
TABELA 18. PARÂMETROS DIMENSIONAIS E VOLUMÉTRICOS DOS CORPOS DE PROVA	92
TABELA 19. PARÂMETROS OBTIDOS A PARTIR DAS CURVAS DETERMINADAS.....	95
TABELA 20. PARÂMETROS OBTIDOS A PARTIR DAS CURVAS DETERMINADAS.....	95

TABELA 21. ANÁLISE ESTATÍSTICA TENSÃO MÁXIMA ATINGIDA PARA GABIÃO COM BRITA 2	95
TABELA 22. ANÁLISE ESTATÍSTICA DEFORMAÇÃO VERTICAL MÁXIMA ATINGIDA PARA GABIÃO COM BRITA 2.....	96
TABELA 23. PARÂMETROS OBTIDOS A PARTIR DAS CURVAS DETERMINADAS.....	99
TABELA 24. PARÂMETROS OBTIDOS A PARTIR DAS CURVAS DETERMINADAS.....	100
TABELA 25. ANÁLISE ESTATÍSTICA TENSÃO MÁXIMA ATINGIDA PARA GABIÃO COM BRITA 2.....	100
TABELA 26. ANÁLISE ESTATÍSTICA DEFORMAÇÃO VERTICAL MÁXIMA ATINGIDA PARA GABIÃO COM BRITA 2.....	100
TABELA 27. VALORES DE DEFORMAÇÃO MÁXIMA E TENSÃO MÁXIMA OBTIDOS PARA GABIÕES COM AREIA COMPACTADA	102
TABELA 28. VALORES DE DEFORMAÇÃO MÁXIMA E TENSÃO MÁXIMA OBTIDOS PARA GABIÕES COM BRITA 2.....	103
TABELA 29. TESTE T – TENSÃO VERTICAL MÁXIMA AREIA X TENSÃO VERTICAL MÁXIMA BRITA	103
TABELA 30. TESTE T – TENSÃO HORIZONTAL MÁXIMA AREIA X TENSÃO HORIZONTAL MÁXIMA BRITA	103
TABELA 31. TESTE T – TENSÃO VERTICAL MÁXIMA AREIA X TENSÃO HORIZONTAL MÁXIMA AREIA	103
TABELA 32. TESTE T – TENSÃO VERTICAL MÁXIMA BRITA X TENSÃO HORIZONTAL MÁXIMA BRITA	103
TABELA 33. TESTE T – DEFORMAÇÃO VERTICAL MÁXIMA AREIA X DEFORMAÇÃO VERTICAL MÁXIMA AREIA.....	103
TABELA 34. TESTE T – DEFORMAÇÃO HORIZONTAL MÁXIMA AREIA X DEFORMAÇÃO HORIZONTAL MÁXIMA BRITA	103
TABELA 35. TESTE T – DEFORMAÇÃO VERTICAL MÁXIMA AREIA X DEFORMAÇÃO HORIZONTAL MÁXIMA AREIA.....	103
TABELA 36. TESTE T – DEFORMAÇÃO HORIZONTAL MÁXIMA BRITA X DEFORMAÇÃO HORIZONTAL MÁXIMA BRITA	104
TABELA 37. CORRELAÇÃO DE PEARSON – TENSÃO MÁXIMA VERTICAL BRITA X DEFORMAÇÃO MÁXIMA VERTICAL BRITA.....	107
TABELA 38. CORRELAÇÃO DE PEARSON – TENSÃO MÁXIMA VERTICAL BRITA X DEFORMAÇÃO MÁXIMA HORIZONTAL BRITA	107
TABELA 39. CORRELAÇÃO DE PEARSON – DEFORMAÇÃO MÁXIMA VERTICAL X DEFORMAÇÃO MÁXIMA HORIZONTAL BRITA	107
TABELA 40. CORRELAÇÃO DE PEARSON – TENSÃO MÁXIMA VERTICAL AREIA X DEFORMAÇÃO MÁXIMA VERTICAL AREIA	107
TABELA 41. CORRELAÇÃO DE PEARSON – TENSÃO MÁXIMA VERTICAL AREIA X DEFORMAÇÃO MÁXIMA HORIZONTAL AREIA	107
TABELA 42. CORRELAÇÃO DE PEARSON – DEFORMAÇÃO MÁXIMA VERTICAL X DEFORMAÇÃO MÁXIMA HORIZONTAL AREIA	107

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1: NÍVEL DE SEGURANÇA DESEJADO CONTRA A PERDA DE VIDAS HUMANAS.....	53
QUADRO 2: NÍVEL DE SEGURANÇA DESEJADO CONTRA DANOS MATERIAIS E AMBIENTAIS.....	53

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	19
1.1	Objetivo Geral	22
1.2	Objetivos Específicos.....	22
2.	REVISÃO DE LITERATURA	23
2.1	Gabiões: considerações gerais.....	23
2.2	Uso de gabiões na infraestrutura urbana	25
2.3	A importância das obras de gabião para as cidades	27
2.4	Tipos de gabião.....	30
2.4.1	<i>Gabião Saco</i>.....	32
2.4.2	<i>Gabião colchão</i>.....	33
2.4.3	<i>Gabião caixa</i>.....	34
2.4.4	<i>Gabião EasyWorks – Eletrossoldado</i>.....	35
2.5	Casos de obras executadas em gabião	39
2.6	Verificações necessária ao dimensionamento de contenções em gabião	43
2.7	Determinação do fator de segurança segundo a ABNT NBR 11.682/2009	52
2.8	Experiência científica no estudo da performance de gabiões.....	55
3	METODOLOGIA	58
3.1	Caracterização do tipo de pesquisa	58
3.2	Ensaios laboratoriais para caracterização dos materiais de preenchimento	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	69

5 CONCLUSÃO	112
REFERÊNCIAS	115

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O deslizamento de terra é, na verdade, apenas uma categoria dos chamados “movimentos de massa”: processo de vertente que envolve o desprendimento e transporte de solo e/ou material rochoso encosta abaixo. Danificam moradias que estão em locais inadequados para construção. O deslizamento é um fenômeno comum em áreas de relevo acidentado, sobretudo nas encostas. Esse processo pode ocorrer em locais onde não há ocupação humana, no entanto são mais comuns em terrenos onde houve a retirada da cobertura vegetal original, para construções, que é responsável pela consistência do solo e que impede, por meio das raízes, o escoamento das águas. A ocupação desordenada e a falta de fiscalização dos órgãos públicos são as causas principais dos deslizamentos de terra no País. A resolução dessas questões reduziria, e muito, o número de mortes e de prejuízos aos cofres públicos, uma vez que nem sempre há solução técnica viável para ocupação segura em determinadas áreas. Ainda assim, em alguns casos de encostas urbanas densamente ocupadas, um plano eficiente de contenção é o primeiro passo para evitar tragédias anunciadas (COFFERI, HUHN; BORDIGNON, 2014).

A crescente urbanização e a ocupação desordenada do solo têm intensificado desafios relacionados à estabilidade geotécnica e à degradação ambiental, sobretudo em áreas suscetíveis a processos erosivos e deslizamentos de terra. Em muitas cidades, a impermeabilização excessiva do solo, o desmatamento de encostas e a ocupação irregular agravam a instabilidade de margens de rios, taludes e encostas, aumentando a vulnerabilidade das infraestruturas urbanas e comprometendo a segurança das populações. Diante desse cenário, a adoção de soluções de engenharia que conciliem eficácia estrutural e sustentabilidade ambiental torna-se essencial para promover cidades mais resilientes e sustentáveis.

Os desastres provocados por deslizamentos no Brasil vêm se disseminando com o aumento de sua quantidade, magnitude e extensão territorial afetada. Como consequência, têm-se perdas materiais e de vidas humanas e graves danos sociais devido a desabrigados e desalojados. A diretriz comumente adotada para a redução desses desastres consiste basicamente na execução de obras de engenharia para a recuperação das encostas atingidas ou para a prevenção de novos eventos. Em função dos elevados custos envolvidos nesse tipo de ação sem frear o recrudescimento dos desastres

evidencia-se uma deficiência na gestão do sistema de controle dos mesmos (DE MENDONÇA; PINHEIROS, 2012).

Os gabiões, estruturas compostas por malhas metálicas preenchidas com materiais granulares, são amplamente utilizados em obras de contenção, estabilização de solos e proteção contra erosão. Tradicionalmente, esses elementos são confeccionados com malha de arame hexagonal torcido e preenchidos com pedras de dimensões relativamente grandes. No entanto, uma alternativa tecnológica mais recente, os gabiões de malha eletrossoldada, apresenta vantagens significativas em termos de resistência estrutural, facilidade de montagem e flexibilidade de preenchimento, possibilitando o uso de materiais alternativos além da brita convencional. O muro de gabião destaca-se por sua adaptabilidade às irregularidades do terreno e sua eficiência na drenagem, mostrando-se uma opção valiosa em determinados contextos geotécnicos. No entanto, é vital considerar cuidadosamente questões como a limitação de altura, possíveis assentamentos diferenciais e a necessidade de manutenção regular para assegurar sua eficácia contínua (SILVA SOUZA et al., 2024).

A sustentabilidade dos gabiões está diretamente relacionada ao seu método construtivo e aos materiais utilizados. Trata-se de uma técnica de construção a seco, que dispensa o uso de argamassa e concreto, reduzindo significativamente a demanda por

água e a geração de resíduos durante a execução da obra. Além disso, sua estrutura permeável melhora a drenagem e evita a concentração de águas pluviais, um problema comum em soluções convencionais de contenção, como muros de concreto armado. Essa característica favorece a estabilidade do solo e contribui para a prevenção de deslizamentos, tornando os gabiões uma alternativa eficiente para áreas urbanas e regiões suscetíveis a processos erosivos.

Outro aspecto relevante na sustentabilidade dos gabiões é a possibilidade de utilização de resíduos da construção civil (RCC) como material de preenchimento, o que reduz a extração de agregados naturais e promove a economia circular no setor da construção. Estudos como o de Camelo (2019) demonstraram que resíduos como concreto reciclado e brita secundária podem ser empregados no preenchimento dos gabiões sem comprometer seu desempenho estrutural. Essa abordagem não apenas minimiza os impactos ambientais associados ao descarte inadequado de resíduos, mas também representa uma solução econômica para projetos de contenção, diminuindo custos com materiais e transporte.

Além do uso de RCC, a escolha dos materiais de preenchimento dos gabiões pode impactar diretamente sua viabilidade técnica e operacional, especialmente em situações emergenciais. O uso de brita e areia em substituição ao rachão se apresenta como uma alternativa viável, uma vez que esses materiais são de mais fácil acesso e podem ser encontrados em praticamente qualquer local, agilizando a execução de obras de emergência de caráter temporário. Em cenários onde há necessidade de rápida resposta, como recuperação de encostas após chuvas intensas ou contenção de margens de rios em colapso, a disponibilidade imediata de materiais pode ser um fator determinante para a efetividade das soluções adotadas. Dessa forma, investigar a adequação da brita e da areia como materiais de preenchimento para gabiões de malha eletrossoldada pode contribuir significativamente para a otimização dessas estruturas em diferentes contextos.

A implementação de cidades sustentáveis requer soluções inovadoras para problemas recorrentes na infraestrutura urbana, como a instabilidade de solos, a contenção de encostas e a erosão fluvial. Métodos tradicionais, como muros de concreto armado e cortinas atirantadas, embora eficazes, possuem altos custos de produção e impacto ambiental significativo, tanto pelo elevado consumo de materiais como pela impermeabilização do solo. Alternativamente, os gabiões se destacam por sua capacidade de integração ao meio ambiente, promovendo maior drenagem e menor interferência no equilíbrio natural dos terrenos.

No entanto, a aplicação dos gabiões de malha eletrossoldada em larga escala depende de uma melhor compreensão de sua viabilidade estrutural e dos materiais de preenchimento mais adequados para diferentes contextos geotécnicos e ambientais. A maioria dos estudos existentes sobre gabiões foca em modelos convencionais de malha hexagonal, sem considerar as particularidades da nova tecnologia e suas possibilidades de otimização. Além disso, a falta de padronização no uso de materiais de preenchimento pode comprometer a segurança e a eficiência dessas estruturas, tornando essencial a realização de pesquisas experimentais para definir parâmetros técnicos confiáveis.

Assim, esta pesquisa tem como objetivo avaliar o comportamento mecânico de gabiões de malha eletrossoldada preenchidos com diferentes materiais, incluindo areia média, brita #2. Por meio de ensaios de compressão simples em módulos experimentais de $0,4 \times 0,4 \times 0,4$ m, serão analisados parâmetros fundamentais como resistência à compressão, deformações horizontal e vertical, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e curvas tensão-deformação. A comparação entre os diferentes tipos de

preenchimento possibilitará a definição de diretrizes técnicas para otimizar o uso dessa tecnologia em obras de contenção, fornecendo subsídios para sua aplicação em projetos urbanos sustentáveis.

Ao aliar desempenho estrutural e responsabilidade ambiental, os gabiões de malha eletrossoldada representam uma solução promissora para a construção de infraestruturas resilientes e sustentáveis. Seu uso em cidades sustentáveis pode contribuir significativamente para a redução da impermeabilização do solo, o reaproveitamento de materiais descartados e a mitigação dos impactos ambientais das construções tradicionais. Além disso, a possibilidade de utilizar materiais de fácil acesso, como brita e areia, em obras emergenciais, amplia ainda mais a aplicabilidade dessa tecnologia, tornando-a uma alternativa eficiente e acessível para situações de rápida necessidade de intervenção. Dessa forma, a expansão do conhecimento sobre essa tecnologia é essencial para promover sua adoção em larga escala, consolidando-a como uma alternativa viável e eficiente para a engenharia geotécnica e ambiental.

1.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho mecânico de gabiões eletrossoldados preenchidos com brita #2 e areia média em estado fofo e compactada, por meio de ensaios de compressão, determinando sua capacidade de suporte, deformabilidade e rigidez estrutural, a fim de fornecer subsídios técnicos para sua aplicação em projetos geotécnicos e de infraestrutura urbana sustentável.

1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a resistência à compressão de gabiões eletrossoldados preenchidos com, brita #2 e areia média compactada e fofa, a fim de obter sua capacidade de suporte e comportamento mecânico sob carregamento vertical.
- Determinar os módulos secante, tangente e de rigidez dos gabiões eletrossoldados preenchidos com cada material, para analisar a evolução da rigidez estrutural ao longo do carregamento e sua influência na estabilidade da estrutura.
- Aplicar métodos estatísticos, incluindo teste t e correlação de Pearson, a fim verificar diferenças significativas entre os preenchimentos e identificar relações entre os parâmetros mecânicos analisados.

- Elaborar curvas tensão-deformação para cada tipo de preenchimento, de forma a apresentar uma ferramenta prática para estimativas de deformação e aplicação em projetos básicos de contenções provisórias.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Gabiões: considerações gerais

Os gabiões, compostos por caixas de malha metálica preenchidas com rochas, são amplamente utilizados em diversas aplicações de engenharia civil, incluindo a contenção de encostas, controle de erosão e obras hidráulicas. A popularidade desses elementos estruturais se deve à combinação de flexibilidade, permeabilidade, durabilidade e baixo custo de construção. Contudo, o dimensionamento seguro dos gabiões requer uma compreensão detalhada do seu comportamento mecânico sob diferentes condições de carregamento, (MACCAFERRI, 2020).

O desempenho dos gabiões é influenciado por múltiplos fatores que determinam sua capacidade estrutural:

1. **Propriedades da malha metálica:** A resistência à tração e compressão da malha metálica define a robustez do gabião. Variáveis como o tipo de fio, diâmetro e abertura das malhas afetam diretamente o comportamento estrutural.

2. **Material de enchimento:** As características do material de enchimento, como o tipo de rocha, granulometria, forma e tamanho, impactam na resistência à compressão, permeabilidade e atrito interno, influenciando o desempenho global da estrutura.

3. **Geometria da estrutura:** A forma e as dimensões dos gabiões, incluindo altura, largura e inclinação, são cruciais para a distribuição das tensões e a capacidade de carga, afetando diretamente a estabilidade da estrutura.

4. **Condições de carregamento:** Os tipos de cargas aplicadas, como forças axiais, laterais e de solo, influenciam os modos de falha e a capacidade limite do gabião (MACCAFERRI, 2020).

Os principais modos de falha dos gabiões podem ser classificados em:

1. **Falha por ruptura da malha metálica:** Ocorre quando a tensão supera a resistência da malha, levando à ruptura e colapso estrutural.

2. **Falha por cisalhamento:** Resulta do deslocamento horizontal das camadas de enchimento, causado pela falta de coesão ou atrito insuficiente entre as partículas.

3. **Falha por rolamento:** Acontece quando a base do gabião não está devidamente restrita, permitindo o giro ou deslizamento da estrutura sobre o terreno.

4. **Falha por erosão interna:** O fluxo de água através da estrutura pode causar a perda de partículas do enchimento, comprometendo a integridade e a estabilidade do gabião (MACCAFERRI, 2020).

Diversos métodos são empregados para analisar o comportamento mecânico dos gabiões:

1. **Análise teórica:** Utiliza modelos matemáticos que incorporam as propriedades da malha metálica, do material de enchimento e da geometria para prever o desempenho sob diferentes condições de carga.

2. **Ensaios laboratoriais:** Proporcionam uma avaliação empírica do comportamento dos gabiões sob cargas controladas, oferecendo dados essenciais para a validação de modelos teóricos e o dimensionamento de projetos.

3. **Monitoramento em campo:** O acompanhamento do desempenho de gabiões em aplicações reais fornece informações valiosas sobre seu comportamento a longo prazo e sob diferentes condições de serviço, contribuindo para ajustes nos projetos futuros (MACCAFERRI, 2020).

O conhecimento aprofundado do comportamento mecânico dos gabiões é fundamental para garantir sua aplicação segura e eficiente em diversas áreas da engenharia civil, como:

1. **Contenção de encostas:** Mitigação de deslizamentos e controle de erosão em taludes íngremes, funcionando como estruturas de arrimo ou reforço de solo.

2. **Controle de erosão em cursos d'água:** Proteção de margens de rios, canais e córregos contra a erosão causada pelo fluxo de água.

3. **Obras hidráulicas:** Aplicações em diques, canais de irrigação, dissipadores de energia e outras estruturas, aproveitando a permeabilidade e flexibilidade dos gabiões.

4. **Fundações:** Utilizados como base estrutural para pontes, edifícios e outras construções em terrenos com baixa capacidade de suporte, (MACCAFERRI, 2020).

O estudo do comportamento mecânico dos gabiões é essencial para o desenvolvimento de práticas de engenharia que maximizem sua eficiência e segurança. Compreender os mecanismos de falha, os métodos de análise e as normas de projeto é indispensável para o dimensionamento adequado dessas estruturas. Originários da Itália, com o nome “gabbione”, os gabiões foram introduzidos no Brasil na década de 1970 e têm sido amplamente adotados devido à sua eficácia comprovada em diversas regiões (BARROS et al., 2017).

Como estruturas armadas, flexíveis, drenantes e de longa durabilidade, os gabiões estão entre as soluções mais eficazes para a contenção de solos, estabilização de encostas, revestimento de canais e em diversas obras hidráulicas, oferecendo resistência, desempenho sustentável e custo-benefício.

2.2 Uso de gabiões na infraestrutura urbana

A análise econômica é um dos aspectos fundamentais na concepção de qualquer obra de engenharia, frequentemente se tornando o critério principal na escolha do método construtivo. Contudo, além do custo inicial, é essencial avaliar o custo-benefício ao longo do ciclo de vida da estrutura, considerando as manutenções necessárias para sua conservação.

Embora os muros de gabião possam inicialmente parecer menos econômicos do que os de concreto ciclópico, Barros (2008) destaca que a flexibilidade dos muros de gabião, aliada à rigidez dos seus componentes, permite que suportem desgastes naturais ao longo dos anos, desde que sejam executados de forma adequada.

Essa flexibilidade permite que os muros de gabião acompanhem recalques ou acomodações do terreno sem comprometer sua eficiência estrutural, diferentemente dos muros de concreto ciclópico, que são rígidos e, portanto, mais suscetíveis a danos em função de recalques e movimentações do solo (DA CRUZ; BRAGHIN, 2016).

O crescimento populacional e a urbanização intensificam a demanda por alimentos e produtos, reforçando a importância de uma logística eficiente. No Brasil, o transporte rodoviário é o principal componente da matriz de transportes, conectando áreas de produção aos centros consumidores.

Muitas rodovias brasileiras, construídas há mais de 70 anos, carecem de monitoramento adequado e intervenções regulares. Em várias regiões do país, o período chuvoso intensifica a ocorrência de deslizamentos e escorregamentos em taludes naturais ao longo das rodovias, comprometendo a segurança das infraestruturas e dos usuários.

A falta de recursos para investimentos em monitoramento, conservação, manutenção e melhorias contrasta com a necessidade urgente de ações que garantam a segurança e a eficiência do transporte rodoviário (SILVA, 2021).

Os movimentos de massa em encostas são influenciados por agentes predisponentes e efetivos. Os agentes predisponentes referem-se a condições intrínsecas, como características geológicas, geométricas e ambientais do terreno, que configuram o cenário propício para o desencadeamento dos deslizamentos, sem intervenção humana. Já os agentes efetivos são aqueles que atuam diretamente no desencadeamento dos movimentos de massa, incluindo fatores naturais e intervenções humanas. Esses agentes são classificados em predatórios, que intensificam o processo de instabilidade ao longo do tempo, e imediatos, que provocam o deslizamento de forma direta e abrupta (GUIDICINI; NIEBLE, 2019).

Nas rodovias, a utilização de taludes contidos por gabiões (Figura 1) tem se mostrado uma solução eficaz para a estabilização de encostas, reduzindo significativamente o risco de deslizamentos de rochas e solos.

A flexibilidade e permeabilidade dos gabiões não apenas promovem a segurança das infraestruturas rodoviárias, como também minimizam a necessidade de manutenções emergenciais, contribuindo para a durabilidade das obras e a redução de custos ao longo do tempo.



Figura 1. Instalação de talude – Rodovia Mogi-Bertioga. *Fonte: G1 Santos, 2018.*

2.3 A importância das obras de gabião para as cidades

A construção de barragens para a reserva de água, com o objetivo de suprir as necessidades humanas, é uma prática que remonta aos primórdios da civilização. Desde as primeiras comunidades organizadas, a necessidade de armazenar água para o abastecimento de populações e atividades diárias tornou-se evidente. As barragens desempenham funções essenciais, como o armazenamento de água, a geração de energia elétrica e a contenção de rejeitos industriais e de mineração (PASCHOALIN FILHO, 2002).

As cidades, caracterizadas por concentrações humanas em áreas geográficas específicas, são marcadas pela presença de edificações destinadas a diversas atividades, incluindo moradia, comércio, indústria e cultura. Raquel Rolnik, no livro “O que é cidade”, discute que o surgimento das cidades acompanha o processo de sedentarização, marcando uma nova relação entre o homem e a natureza: “Ela nasce com o processo de sedentarização e seu aparecimento delimita uma nova relação homem/natureza: para fixar-se em um ponto para plantar é preciso garantir o domínio permanente de um território” (ROLNIK, 1988, p. 84). Nesse ambiente, as cidades se tornaram centros de inovação, onde grandes obras de infraestrutura, como drenagem e irrigação, aumentam a produtividade e impulsionam o desenvolvimento tecnológico e social.

A urbanização e o controle sobre o ambiente natural exigiram o desenvolvimento de técnicas que garantissem a segurança e eficiência das infraestruturas urbanas. O gabião surge como uma técnica contemporânea que oferece soluções eficazes para a estabilização de taludes, drenagens, canais e outras estruturas de contenção. Compostas por gaiolas metálicas preenchidas com pedras, essas estruturas proporcionam flexibilidade, permeabilidade e integração ambiental, sendo amplamente utilizadas no controle de erosão e na mitigação de riscos geotécnicos. Um exemplo da aplicação dos gabiões pode ser observado em Urussanga, Rio Grande do Sul, onde intervenções emergenciais têm sido realizadas para assegurar a segurança dos moradores. A Defesa Civil do município interditou temporariamente duas vias importantes, a Serrinha e a Rua Dolovico Savi Mondo, para a construção de muros de gabião, com o objetivo de conter áreas sujeitas a deslizamentos. Segundo Paschoalin Filho (2002), obras de contenção são cruciais para a segurança e o desenvolvimento urbano, pois garantem a estabilidade de áreas vulneráveis.

Essas medidas emergenciais em Urussanga refletem um desafio comum em muitas cidades brasileiras, especialmente diante de eventos climáticos recentes que aumentam os riscos de deslizamentos. A atuação rápida da Defesa Civil visa prevenir acidentes e proteger a comunidade, destacando a importância de intervenções que reforcem a segurança das infraestruturas (PREFEITURA DE URUSSANGA, 2024).

Outro caso relevante é a estabilização dos taludes nas rodovias PRC-466 e PRC-476, em União da Vitória, Paraná, próximo ao Morro da Dona Mercedes (Figura 2). Essa encosta, com variações de altura entre 50 e 90 metros, é uma área crítica para deslizamentos, agravados pelas chuvas intensas, o que levou à emissão de decretos de risco pela prefeitura local (DER, 2024). As obras de contenção, como os muros de gabião, oferecem soluções robustas para mitigar riscos e aumentar a resiliência das infraestruturas urbanas em regiões propensas a desastres naturais.

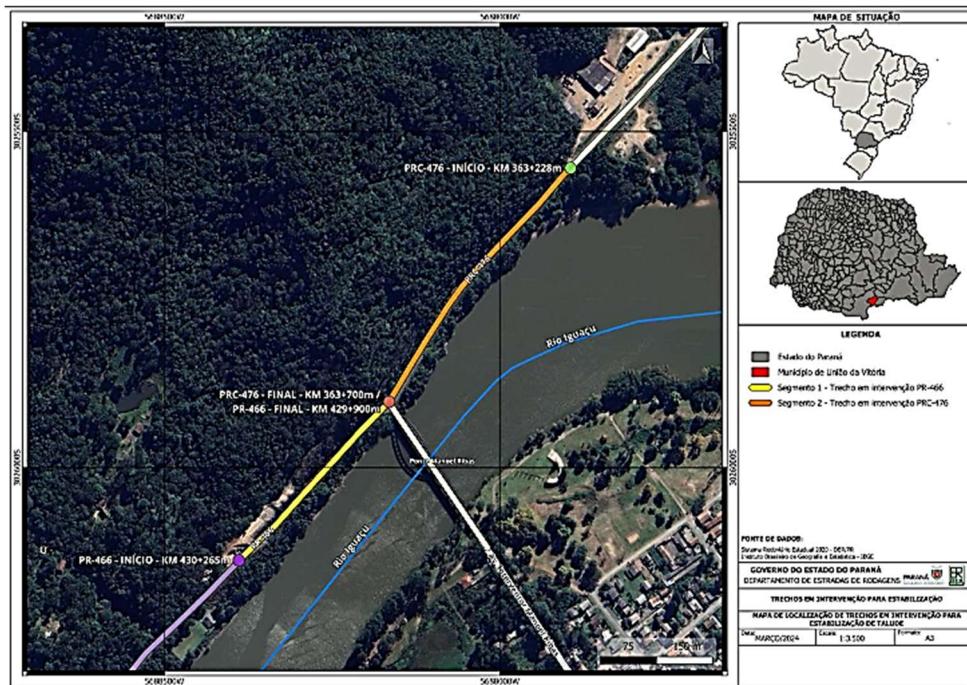


Figura 2. Mapa de localização de trechos em intervenção para estabilização de taludes. *Fonte:* DER – PR

Desde março de 2024, a PRC-476 está interditada para o tráfego de veículos devido à instabilidade do talude e ao risco à segurança dos usuários, tornando necessária a execução de obras de estabilização (Figura 3) que sejam rápidas e economicamente viáveis. O uso de gabiões se mostra adequado para atender a essa necessidade.

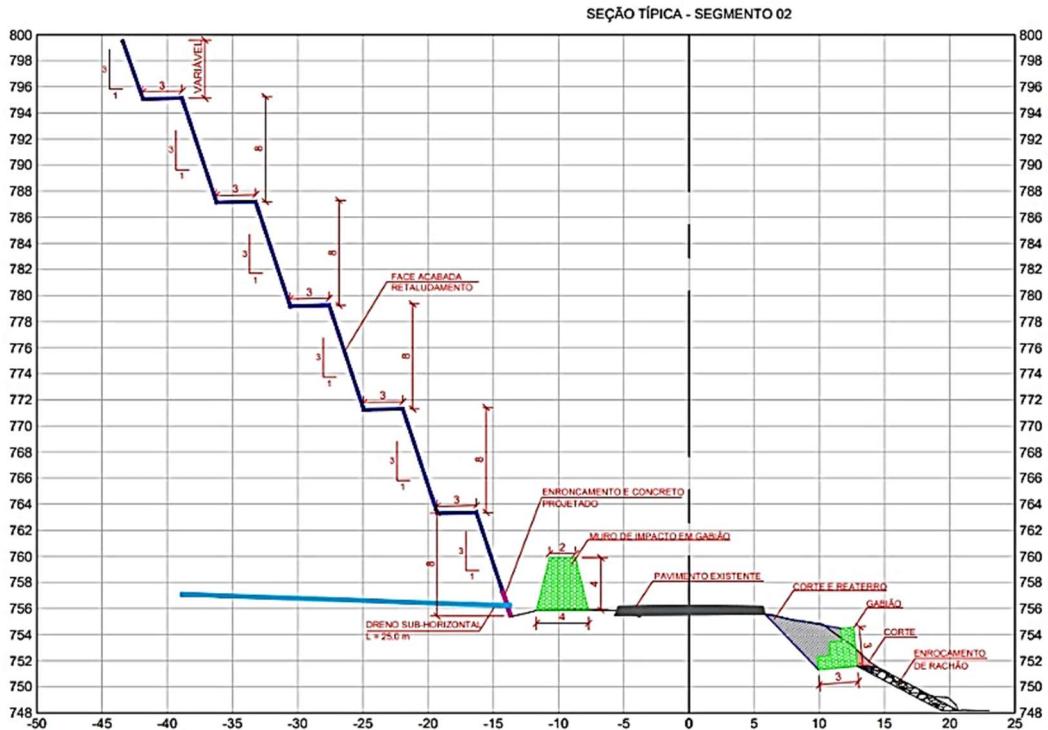


Figura 3. Seção transversal – obra emergencial na PRC-476. Fonte: DER – PR, 2024.

Na análise da seção transversal do projeto, observa-se o muro de impacto em gabião, destacado em verde, projetado como uma estrutura de segurança adicional para conter eventuais deslizamentos futuros. Complementarmente, o muro de arrimo é utilizado para a contenção de cortes e aterros, conforme previsto no projeto de execução da pavimentação. Essas soluções ilustram a importância do uso de gabiões em obras emergenciais, especialmente em regiões que enfrentam frequentes instabilidades geotécnicas, como observado nos últimos meses no sul do Brasil.

O uso de gabiões em obras de contenção tem se mostrado crucial em diversos contextos, como evidenciado pelas intervenções realizadas pela Prefeitura de São Paulo em 2022. Nesse período, foram iniciadas 16 obras em áreas de risco de deslizamentos e enchentes na região de Jaçanã/Tremembé, Zona Norte da cidade. As intervenções incluíram a urbanização de assentamentos precários, obras de drenagem, contenção de margens de rios e canalização de córregos, beneficiando diretamente mais de 200 mil moradores que enfrentavam problemas recorrentes de enchentes e instabilidade do terreno (PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2024).

Um exemplo específico dessas intervenções ocorreu em um trecho de 120 metros na altura da Rua Antonelo de Messina, onde a Secretaria Municipal de Infraestrutura Urbana e Obras (SIURB) implantou novas barreiras utilizando muros de

gabião (Figura 4) e lajes de concreto. Essas estruturas proporcionam maior estabilidade às margens e aumentam a segurança de pedestres, alunos e motoristas que transitam na área, demonstrando a eficácia dos gabiões na mitigação de riscos geotécnicos e na proteção de áreas urbanas sujeitas a eventos adversos. As obras, já concluídas, refletem a aplicação prática dos gabiões como uma solução técnica e economicamente viável para a estabilização de encostas.



Figura 4. Córrego Vila Sapo – Jaçanã/Tremembé, SP. *Fonte:* Prefeitura de São Paulo, 2024.

“Parte do muro havia caído no córrego, oferecendo risco à população. Após obras de drenagem, além da contenção do gabião, aqui não alaga mais”, destacou o prefeito, lembrando que o avanço do processo erosivo nas margens do córrego colocava em risco as instalações da Escola Estadual Profa. Eunice Terezinha e a estabilidade da Rua Benedito Henrique (PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2024).

2.4 Tipos de gabião

As estruturas de contenção ou arrimo estão entre as construções mais antigas realizadas pelo homem, desempenhando um papel fundamental na estabilidade de rochas e maciços de solo. Estas estruturas têm a função de resistir a movimentos de massa e garantir a segurança de áreas suscetíveis a deslizamentos e instabilidades. Exemplos comuns de obras de contenção incluem cortinas de estacas pranchas, paredes diafragma, muros de concreto ciclópico, estruturas de pedras argamassadas, blocos articulados e gabiões (BARROS, 2008).



Figura 5. Tipos de gabião aplicado. *Fonte: LF Ambiental, 2020*

No contexto dos projetos arquitetônicos, os muros de gabião (Figura 5), desempenham duas funções principais. A primeira está relacionada à sua concepção estrutural, oferecendo uma solução de contenção com baixo custo de operação e manutenção em comparação com outras técnicas convencionais. A segunda função refere-se à escolha dos gabiões como elemento construtivo em função de sua estética, que tem ganhado destaque no mercado arquitetônico moderno. A aparência rústica e natural dos gabiões torna-se um diferencial estético que alinha a funcionalidade estrutural às tendências contemporâneas de design (DA CRUZ; BRAGHIN, 2016).

Os gabiões são fabricados em diversas medidas padronizadas e consistem em malhas de dupla torção com formato hexagonal, preenchidas com pedras de mão ou seixos rolados. Eles são classificados em três tipos principais: o gabião do tipo caixa, com formato de paralelepípedo; o gabião tipo saco, que se assemelha a um saco aberto; e o gabião tipo colchão, figura 4, formado por um pano de rede com malhas menores e arames de diâmetro reduzido. O material mais comumente utilizado na fabricação dessas estruturas é o arame de aço AISI 1010/1020, zinkado a fogo, que apresenta resistência entre 38 e 50 kg/mm² (MOLITERNO, 1980).

Esta pesquisa considera para os ensaios o gabião caixa na sua forma tradicional e o gabião Easyworks, uma variação que utiliza solda nas junções da malha, desenvolvido pela empresa Belgo Arames. Segundo Emerson Ananias, o gabião Easyworks é resultado de estudos e pesquisas realizadas pela equipe técnica da Belgo Soluções Geotech em

parceria com a fábrica Bekaert, líder global em tecnologia de gabiões soldados, localizada na República Tcheca. Adicionalmente, o desenvolvimento incorporou referências de tecnologia da Alemanha, país reconhecido pela excelência na engenharia de estruturas de contenção e soluções geotécnicas.

2.4.1 Gabião Saco

O gabião saco, também referido como colchão de gabião ou cesta de gabião, é uma estrutura cilíndrica composta por malha de arame metálico entrelaçada (Figura 6). A malha é preenchida com pedras, geralmente rochas britadas, formando uma estrutura robusta e permeável que proporciona estabilidade e drenagem eficiente. Devido à sua flexibilidade e capacidade de adaptação ao terreno, o gabião saco é amplamente utilizado em aplicações de controle de erosão, estabilização de margens de rios e proteção de taludes (WINIAWER, 2009).

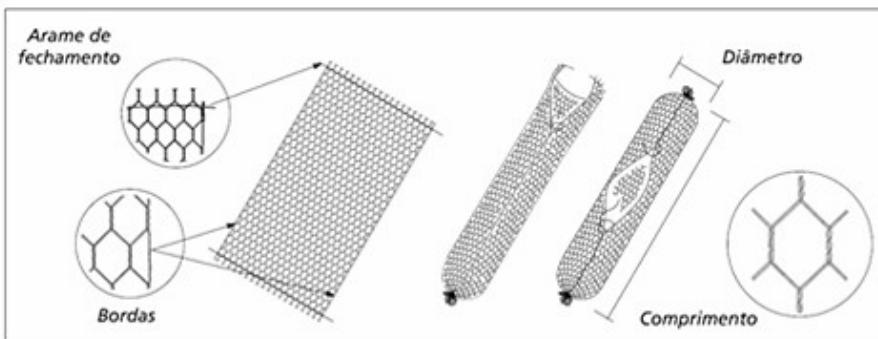


Figura 6. Gabião tipo saco. Fonte: Winiawer, 2009

As principais aplicações, os gabiões saco são empregados na contenção de encostas, atuando como barreiras físicas que previnem deslizamentos de solo e erosões superficiais. Em obras de controle de cursos d’água, esses gabiões são utilizados para estabilizar margens de rios e canais, protegendo-as contra a erosão causada pelo fluxo hidráulico. Adicionalmente, são integrados em sistemas de drenagem, auxiliando no controle do escoamento superficial e subterrâneo, o que contribui para a prevenção de alagamentos e para a manutenção da estabilidade do solo.

Outra aplicação significativa dos gabiões saco é em fundações e muros de arrimo, onde atuam como elementos de suporte estrutural em terrenos com características instáveis ou inclinadas. No reforço de solos, os gabiões ajudam a aumentar a resistência e a estabilidade de taludes, promovendo uma interação positiva com o solo graças à sua permeabilidade, que permite a passagem de água e reduz a pressão hidrostática, prevenindo a formação de áreas encharcadas e instáveis (WINIAWER, 2009).

As vantagens técnicas do uso dos gabiões saco são múltiplas. A flexibilidade da malha de arame permite que a estrutura se adapte a movimentos e recalques do solo sem perder sua integridade, sendo especialmente eficaz em áreas sujeitas a deslizamentos. A permeabilidade da estrutura facilita a drenagem natural, mitigando a acumulação de água e reduzindo os riscos de erosão. Além disso, a alta resistência e durabilidade dos materiais utilizados asseguram uma vida útil prolongada das estruturas, enquanto a utilização de materiais locais e naturais torna o método mais sustentável.

Os gabiões saco também se destacam pela facilidade de instalação e pelo baixo custo operacional. A montagem é simples, dispensando o uso de equipamentos complexos, e a utilização de materiais locais reduz os custos associados ao transporte e à logística. Do ponto de vista estético, os gabiões podem ser integrados harmoniosamente em paisagens naturais e urbanas, sendo amplamente utilizados em projetos paisagísticos que valorizam tanto a estética quanto a funcionalidade. Dessa forma, os gabiões saco representam uma solução técnica eficiente e econômica para uma ampla gama de desafios na engenharia civil e ambiental, aliando desempenho estrutural a benefícios ambientais e estéticos (WINIAWER, 2009).

2.4.2 Gabião colchão

O gabião colchão, também conhecido como colchão de gabião ou cesta de gabião, é uma estrutura modular de formato retangular, composta por malha de arame metálico trançada e preenchida com pedras (Figura 7). Esse tipo de gabião se distingue do gabião tipo caixa por apresentar uma grande área e pequena espessura, o que o torna adequado para revestimentos, mas não para a contenção de margens, função típica dos gabiões tipo caixa (COUTINHO, 2019).

A principal característica dos gabiões colchão é a sua menor espessura em comparação com outros gabiões, o que favorece seu uso em revestimentos de áreas extensas, como canais e margens de rios, onde a flexibilidade e a permeabilidade são essenciais. Devido à sua versatilidade, facilidade de instalação e eficácia, os gabiões colchão formam uma camada protetora em revestimentos de cais, rios, barragens e encostas, além de serem utilizados em soluções ambientais diversas. O gabião colchão é produzido com malha metálica hexagonal de dupla torção, sendo dividido em duas partes, a tampa e a base, que são unidas durante a instalação após o preenchimento com rachão. A base é subdividida por diafragmas, que atuam como paredes divisórias, aumentando a estabilidade e resistência da estrutura. Juntamente com tirantes verticais, esses elementos

conferem alta resistência hidráulica, proporcionando eficiência em ambientes aquáticos e em contato direto com fluxos de água (MACCAFERRI, 2020).

Os gabiões colchão são considerados soluções monolíticas, flexíveis e permeáveis, que se destacam pela integração ao ambiente natural, sustentabilidade e facilidade de instalação além de respeito ao meio ambiente.

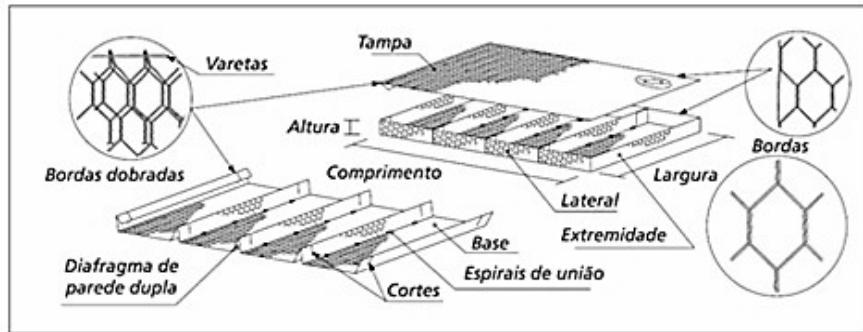


Figura 6. *Gabião tipo colchão.* Fonte: Winiawer, 2009

2.4.3 Gabião caixa

Os gabiões tipo caixa são estruturas prismáticas modulares compostas por malha hexagonal de dupla torção, fabricadas com fios metálicos revestidos por galvanização ou materiais poliméricos de alto desempenho, como PVC ou Poli-Alfan, que conferem alta resistência à corrosão (Figura 8). A malha de dupla torção impede o desenrolamento em caso de ruptura, garantindo a integridade estrutural (MACCAFERRI, 2020). Comumente, os gabiões apresentam alturas entre 0,5 m e 1 m, larguras de 1 m e comprimentos de até 4 m, sendo subdivididos internamente por diafragmas que aumentam a estabilidade e impedem o deslocamento do enchimento (COUTINHO, 2019).

Após a montagem no local de instalação, os módulos são interconectados com fios de amarração ou grampos metálicos, formando uma estrutura monolítica e contínua. O preenchimento é feito com pedras de granulometria controlada, que devem ser maiores que as aberturas da malha para evitar a perda de material. A compactação adequada das pedras é fundamental para maximizar a resistência e minimizar vazios, assegurando o atrito interno e a correta transferência de cargas.

As características dos gabiões tipo caixa, como flexibilidade, permeabilidade e alta resistência à compressão, permitem que se ajustem a deformações do solo e evitem a acumulação de pressões hidrostáticas, um aspecto crucial na prevenção de falhas. Essas propriedades tornam os gabiões ideais para aplicações em contenção de taludes, proteção de margens de rios, controle de erosão e estabilização de encostas (WINIAWER, 2009).

A execução dos gabiões tipo caixa envolve preparação do terreno, posicionamento dos módulos, conexão adequada, e preenchimento com pedras, seguido do fechamento das tampas. É essencial a instalação de geotêxtils sob a base para filtração e reforço, garantindo a separação do solo e prevenindo a migração de partículas (MOLITERNO, 1980).

A manutenção é mínima devido à durabilidade e adaptabilidade das estruturas. Os gabiões tipo caixa atuam como muros de contenção à gravidade, sendo amplamente utilizados em obras geotécnicas, hidráulicas e ambientais. Sua permeabilidade reduz a pressão hidrostática, enquanto sua flexibilidade permite a adaptação a movimentos do terreno, oferecendo uma solução eficaz, durável e sustentável para uma ampla gama de aplicações na engenharia civil (DA CRUZ; BRAGHIN, 2016).

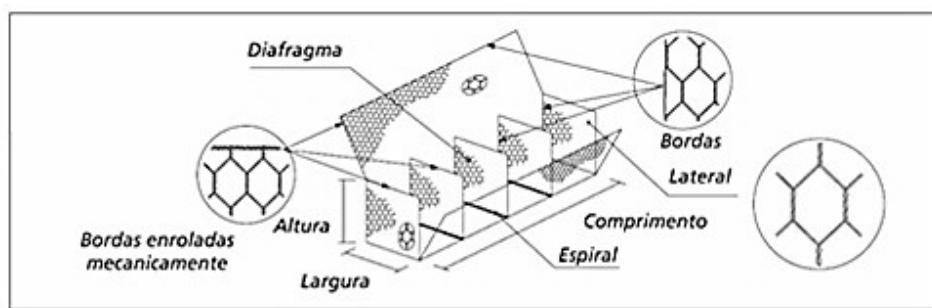


Figura 7. Gabião tipo caixa. *Fonte:* Winiawer, 2009

2.4.4 Gabião EasyWorks – Eletrossoldado

Os Gabiões Easyworks, também conhecidos como Gabiões Modulares ou Sistema Easyworks, são uma solução inovadora desenvolvida pela Belgo Bekaert para atender às exigências de projetos de alta performance em engenharia civil e ambiental. Fabricados conforme as normas ASTM A974 e EN 10223-8 (Figura 9), esses gabiões são projetados para atender a rigorosos padrões de qualidade, incluindo certificações alemãs que asseguram uma elevada resistência ao cisalhamento dos pontos de solda, alcançando, em média, 75% da resistência à tração do arame. Tais características tornam os Gabiões Easyworks superiores em desempenho e durabilidade quando comparados aos gabiões tradicionais.



Figura 8. Gabião tipo eletrosoldado. Fonte: próprio autor, 2024

A seguir são apresentadas algumas características do gabião eletrossoldado:

- **Alta Resistência:** Fabricados com arames de aço carbono de alta resistência, com limites de escoamento de até 700 MPa, e revestidos com liga Bezinal®5000, os Gabiões Easyworks oferecem até 50% mais resistência à tração e até o dobro de durabilidade em comparação aos gabiões convencionais (Belgo, 2024). Estudos indicam que a liga Bezinal®5000, melhora significativamente a resistência à corrosão, estendendo a vida útil dos gabiões em até 25 anos em ambientes agressivos (COUTINHO, 2019).
- **Desempenho Estrutural:** A malha eletrossoldada de alta performance, com aberturas de 5×10 cm e 10×10 cm, proporciona maior rigidez e estabilidade estrutural. Esta configuração permite um enchimento mecanizado eficiente, aumentando em até 30% a produtividade da obra em comparação aos sistemas de enchimento manual.
- **Eliminação de Costuras Manuais:** O sistema Easyworks utiliza espirais de conexão de alta performance, eliminando a necessidade de costuras manuais e garantindo um acabamento uniforme e padronizado, o que melhora a confiabilidade da montagem (Figura 10). Essa tecnologia atende às especificações da norma ISO 9001 para controle de qualidade na fabricação e montagem.
- **Conformidade com Normas e Certificações:** Os Gabiões Easyworks atendem às normas técnicas ASTM A974 e EN 10223-8, e passam por rigorosos controles de qualidade, incluindo testes de desempenho de solda que excedem 75% da

resistência do arame, conforme as diretrizes da norma EN 10218, assegurando a confiabilidade da estrutura.

- **Sustentabilidade:** O processo de fabricação dos Gabiões Easyworks utiliza materiais recicláveis e práticas otimizadas que reduzem o impacto ambiental, contribuindo para projetos sustentáveis. Estudos de ciclo de vida indicam uma redução de até 40% nas emissões de CO₂ comparado a sistemas de contenção em concreto (WINIAWER, 2009).
- **Facilidade de Instalação:** O design modular dos Gabiões Easyworks permite uma montagem rápida e simplificada, sem a necessidade de mão de obra especializada ou de equipamentos complexos, o que reduz o tempo e os custos de instalação em até 25% em relação aos sistemas tradicionais.
- **Versatilidade de Aplicação:** Os Gabiões Easyworks podem ser aplicados em uma ampla variedade de projetos, incluindo contenção de encostas, obras em cursos d'água, estruturas de drenagem, fundações, muros de arrimo, reforço de solo, proteção contra inundações e intervenções em áreas úmidas.
- **Estética Integrada:** Além do desempenho técnico, o design dos Gabiões Easyworks proporciona uma integração harmoniosa com a paisagem, oferecendo um efeito visual natural e esteticamente agradável, especialmente em projetos paisagísticos e de revitalização ambiental (COUTINHO, 2019).

As aplicações técnicas são expostas a seguir:

- **Contenção de Encostas:** Empregados na estabilização de taludes e encostas, os Gabiões Easyworks previnem a erosão e deslizamentos de terra, garantindo a segurança de áreas íngremes. Em um estudo de caso na Serra do Mar, SP, os gabiões mostraram-se eficazes na contenção de encostas, reduzindo a incidência de deslizamentos em 85% durante o período chuvoso (COUTINHO, 2019).
- **Obras em Cursos d'Água:** Utilizados para proteger margens de rios, canais e córregos, os gabiões previnem erosão e desmoronamentos, assegurando a estabilidade de estruturas hidráulicas. Em projetos de revitalização de rios na Europa, como o Rio Reno, os Gabiões Easyworks apresentaram durabilidade superior, com manutenção mínima após 15 anos de instalação (COUTINHO, 2019).
- **Estruturas de Drenagem:** Facilitam o controle do escoamento superficial e subterrâneo em áreas alagadas, atuando como filtros naturais que mitigam riscos

de inundações e melhoram a estabilidade do solo. Ensaios de laboratório demonstraram que os gabiões mantêm 90% de sua capacidade de drenagem mesmo após anos de operação em ambientes saturados (MOLITERNO, 1980).

- **Fundações:** Servem como bases estruturais para pontes, edifícios e outras construções em terrenos instáveis ou com baixa capacidade de suporte, proporcionando resistência adicional.
- **Muros de Arrimo:** Aplicados na construção de muros de contenção, os Gabiões EasyWorks suportam a pressão de solos em aterros ou escavações, garantindo a estabilidade das estruturas adjacentes.
- **Reforço de Solo:** Aumentam a capacidade de suporte de solos em áreas desafiadoras, viabilizando a construção de infraestrutura em locais que apresentem restrições geotécnicas.
- **Proteção Contra Inundações:** Atuam como barreiras de contenção para controlar fluxos de água em áreas propensas a inundações, protegendo infraestruturas e propriedades.
- **Obras em Áreas Úmidas:** Permitem a execução de intervenções em áreas pantanosas ou com alta umidade, minimizando os impactos ambientais e preservando o ecossistema local (BELGO, 2024).

Os Gabiões Easyworks mantêm as aplicações tradicionais dos gabiões, mas com maior qualidade, resistência e versatilidade, fazendo deles uma solução avançada para os desafios da engenharia moderna.



Figura 9. Malha gabião eletrosoldado. Fonte: Belgo, 2024

Gabiões eletrossoldados utilizam espirais de conexão de alta performance e resistência (Figura 10). Com uma bitola 4,5 mm garantem uma conexão monolítica de alta performance em toda a estrutura. Possuem tirantes pré-formados de 5mm que foram

projetados para garantir o máximo de desempenho mecânico e alta padrão de rigidez estrutural (BELGO, 2024).

2.5 Casos de obras executadas em gabião

O processo de uso e ocupação do solo está intimamente relacionado às condições de vida humana e à gestão dos recursos hídricos, que são elementos fundamentais para o desenvolvimento sustentável. No entanto, a exploração inadequada dos recursos naturais tem causado uma série de desequilíbrios ambientais, como deslizamentos de terra, inundações e erosão, cujos impactos variam de acordo com o contexto socioeconômico e o grau de desenvolvimento das áreas afetadas (SOUSA, 2022). Esses danos estruturais resultam, em grande parte, do uso inadequado e da gestão insuficiente do solo, que comprometem a integridade das formações geológicas e das infraestruturas urbanas.

Em um cenário global marcado pelas mudanças climáticas, a intensidade e diversidade dos riscos ambientais enfrentados pela sociedade aumentam de forma alarmante, especialmente para populações urbanas vulneráveis. As transformações ambientais previstas para o século XXI afetarão todas as formas de vida na Terra, e a capacidade de adaptação e resiliência das espécies, incluindo a humana, será crucial para a sua sobrevivência (OLIVEIRA, 2012).

As estruturas de contenção formadas por gaiolas de malha metálica entrelaçada, preenchidas com pedras ou materiais rochosos, como os gabiões, têm sido amplamente utilizadas para mitigar os impactos de processos erosivos e deslizamentos. Essas estruturas oferecem flexibilidade, permeabilidade e resistência, sendo indicadas para diversas aplicações geotécnicas e hidráulicas. Entre as principais utilizações destacam-se: contenção de encostas para prevenir deslizamentos e erosões em terrenos íngremes; proteção de margens de rios contra erosão, canalização de cursos d'água que permite o direcionamento controlado do fluxo hídrico; e em sistemas de drenagem que facilitam o escoamento de água do solo, prevenindo alagamentos.

Um exemplo significativo foi o rompimento do vertedouro, estrutura de concreto, na Represa do Cillo em Santa Barbara do Oeste em 2022 (Figura 11). O rompimento provocou o derramamento de 500 mil litros de água e poucos minutos no Ribeirão dos Toledos, rio pertencente a cidade. A obra hidráulica do Departamento de Água e Esgoto de Santa Bárbara d'Oeste visou o alteamento da barragem da nova represa

de Cillo, utilizando como técnica a construção do muro de contenção do barramento com gabião (JUSTINO/EPTV, 2022).



Figura 10: Barragem rompida, represa do Cilo. *Fonte: Wesley Justino/EPTV, 2022*

A Prefeitura e o DAE (Departamento de Água e Esgoto) de Santa Bárbara d’Oeste consideraram o custo e o tempo necessários para a obra de emergência, além do trabalho de terraplanagem necessário para o novo vertedouro. O muro possui altura total de 7 metros e comprimento de 180 metros (Figura 12). Essa solução é considerada sustentável devido à estabilidade proporcionada pelas gaiolas preenchidas com pedras, à permeabilidade da estrutura, e à possibilidade de crescimento da vegetação ao redor.



Figura 11. Barragem de gabião – Represa de Cilo. *Fonte: Novo Momento, 2022*

Além disso, os gabiões são amplamente empregados na construção de muros de arrimo, onde desempenham a função de sustentação de terrenos em desnível, permitindo construções em áreas inclinadas. Devido à sua versatilidade, sustentabilidade, estética e

custo-benefício, as estruturas de gabião têm se destacado em projetos de engenharia que buscam aliar desempenho técnico e integração ambiental. Essas características fazem dos gabiões uma solução eficiente e durável para o controle de erosões e estabilização de taludes, contribuindo para a mitigação dos riscos ambientais em áreas urbanas e rurais.

Em setembro de 2021, os técnicos da SIURB vistoriaram as margens do córrego Itaquera Mirim em Guaianazes, figura 13, e constataram a situação de risco iminente as pessoas que passavam pelo local. Fortes chuvas ocorridas na mesma época agravaram o processo de erosão nas margens do córrego. O solapamento atingiu o passeio e a via de pública por onde passam carros, ônibus e caminhões. A SIURB fez contratação de empresa especializada em gabiões para realização das obras (PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2023).



Figura 12. Obra hidráulica – Córrego Itaquera Mirim 2022. *Fonte: Prefeitura de São Paulo (2023)*

O Rio Pinheiros, em São Paulo, recebeu em 2019 uma obra para recuperação das margens com a aplicação de gabião preenchido com rachão (figuras 14, 15 e 16).

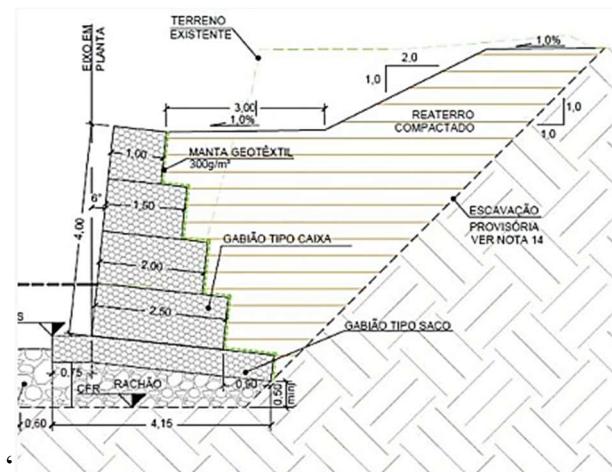


Figura 13. Ilustração de projeto de revestimento de gabião – Rio Pinheiros. *Fonte: Maccaferri, 2020.*



Figura 14. Revestimento em gabião – Rio Pinheiros, Parque Bruno Covas. Fonte: Autoria própria, 2024



Figura 15. Revestimento acesso em gabião - Rio Pinheiros. Fonte: Autoria própria, 2024.

Devido à necessidade urgente de conter deslizamentos na região sul de Ilhabela, em março de 2023 foi iniciada a obra de construção do muro de contenção na Rodovia SP-131, no trecho do bairro Borrifos (Figura 17), ao sul do município. A contenção de encostas é crucial para garantir a segurança dos motoristas e da população local, especialmente em áreas sujeitas a movimentos de massa. Para estabilizar a via e conter os deslizamentos, foi adotada a técnica de muro de contenção tipo gabião caixa, composto por arame galvanizado e preenchido com pedras. As unidades de gabião são conectadas e sobrepostas em camadas, formando uma estrutura monolítica que proporciona a necessária estabilidade da encosta (RADAR LITORAL, 2023).



Figura 16. Obra rodoviária - Contenção da Rod SP-131, Borrifó -2023. Fonte: Radar Litoral, 2023.

Os muros de contenção tipo gabião apresentam elevada adaptabilidade ao meio ambiente, principalmente devido ao uso de materiais naturais, como rochas e agregados, no seu preenchimento. Essa característica permite que esses muros se integrem de forma eficaz à vegetação circundante, favorecendo a recuperação ambiental e a estabilização do solo. Além de suas funções primárias como estrutura de contenção e controle de erosão, os gabiões também oferecem um valor estético (Figura 18), podendo ser incorporados em projetos de arquitetura e paisagismo para criar uma harmonização visual com o entorno natural (DA CRUZ; BRAGHIN, 2016). A permeabilidade dos gabiões facilita a drenagem e a dissipação de pressões hidrostáticas, contribuindo para a durabilidade e a eficiência das estruturas em ambientes geotécnicos e hidráulicos.



Figura 17. Taludes em decoração e paisagismo. Fonte: Total Construção, 2024.

2.6 Verificações necessária ao dimensionamento de contenções em gabião

A verificação da segurança estrutural dos muros de arrimo é fundamental para prevenir diferentes modos de falha que possam comprometer a estabilidade da obra. Nos

muros de arrimo construídos com gabiões, os principais tipos de ruptura que devem ser analisados incluem: ruptura global, ruptura da fundação, deslizamento, tombamento e ruptura interna (Figura 19). Cada um desses mecanismos de falha requer uma avaliação criteriosa durante o dimensionamento e a execução da estrutura para garantir a segurança e a eficiência do muro de contenção ao longo de sua vida útil (BARROS, 2017).

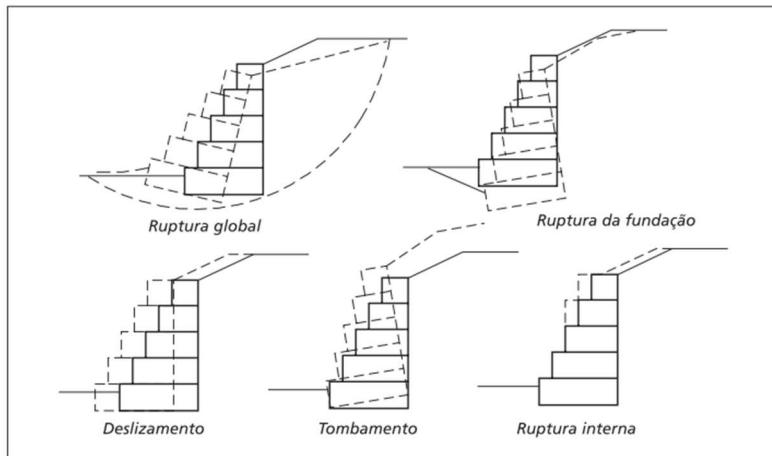


Figura 18. Tipos de ruptura de muros de gabiões. *Fonte: Manual de obras de contenção, Maccaferri, 2017*

A ruptura global do maciço ocorre quando há um escorregamento ao longo de uma superfície de ruptura que circunda a estrutura de arrimo, comprometendo a estabilidade do conjunto. A ruptura da fundação, ou recalque excessivo, manifesta-se quando as pressões exercidas pela estrutura sobre o solo de fundação excedem sua capacidade de carga, resultando em assentamentos diferenciais que podem desestabilizar o muro. O deslizamento sobre a base é determinado quando a resistência ao escorregamento na interface entre a base do muro e o solo, somada ao empuxo passivo disponível à frente da estrutura, é insuficiente para contrapor o empuxo ativo atuante.

A ruptura por tombamento ocorre quando o momento estabilizante gerado pelo peso próprio do muro em relação ao ponto de rotação (fulcro) é insuficiente para contrabalançar o momento causado pelo empuxo ativo. A ruptura interna da estrutura refere-se à falha nas seções intermediárias entre os gabiões, que pode ocorrer tanto por escorregamento quanto por pressões normais excessivas nas conexões internas.

As principais forças atuantes nas análises de estabilidade são o empuxo ativo (E_a), o empuxo passivo (E_p), o peso próprio da estrutura (P) e a reação da fundação (R) (Figura 20). A reação da fundação pode ser decomposta em uma componente normal (N) e uma componente tangencial (T) à base da estrutura de arrimo (Figura 19). Além dessas

forças primárias, devem ser consideradas outras forças que possam impactar a segurança e a integridade estrutural da obra (MACCAFERRI, 2010).

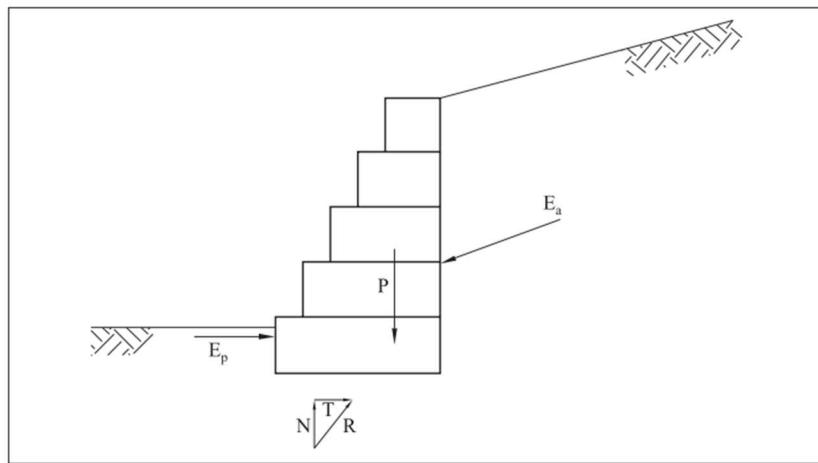


Figura 19. Forças atuantes sobre estrutura de arrimo. Fonte: Manual de obras, Maccaferri, 2017.

A ruptura global acontece quando há escorregamento do maciço de solo que contorna a estrutura de contenção, de modo que o mesmo não atua combatendo as solicitações em dois tipos. O primeiro tipo é o método de cunhas (figura 21) em que a resistência mobilizada é o coeficiente de segurança contra a ruptura do maciço (RIBEIRO, 2018).

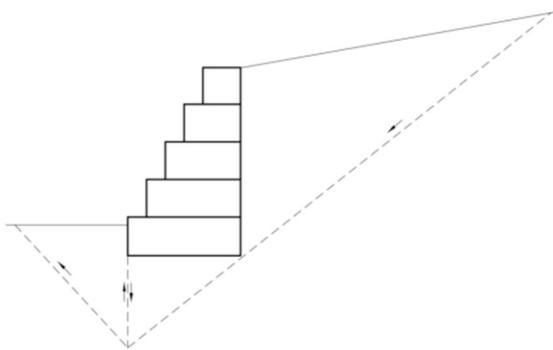


Figura 20. Ruptura global do maciço pelo método de cunhas. Fonte: Barros, 2005.

O segundo tipo, representado pelo método de fatias em que o material é dividido em lamelas com a possibilidade de se considerar um grande número de diferentes situações tais como camadas de solos diferentes, pressões neutras, lençol freático, sobrecargas (figura 22), tem se ilustrado a ruptura global sob análise de método de fatias (RIBEIRO, 2018).

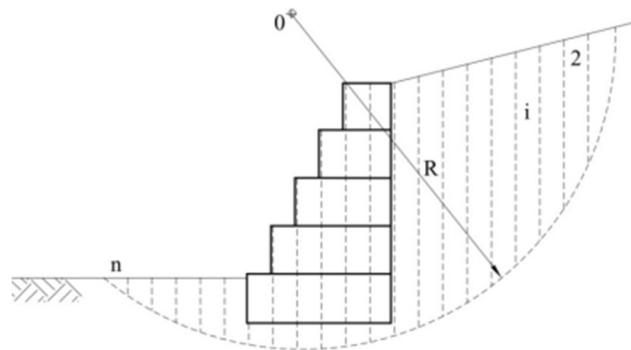


Figura 21. Ruptura global do maciço pelo método das fatias. Fonte: Barros, 2005.

A capacidade de carga do solo de fundação envolve a análise de segurança contra a ruptura e deformações excessivas, que podem comprometer a estabilidade da estrutura de arrimo. Essa análise considera o muro como um corpo rígido e assume que a distribuição de tensões ao longo da base é linear. Quando a resultante das forças atuantes no muro está localizada dentro do núcleo central da base, o diagrama de pressões no solo assume uma forma trapezoidal, indicando que o terreno está submetido exclusivamente a tensões de compressão (GERSCOVICH, 2010).

Nos muros de arrimo, as tensões verticais na base apresentam um comportamento característico, distribuído de forma trapezoidal ao longo da fundação. Essa distribuição de tensões compressivas é fundamental para garantir a integridade estrutural do muro, evitando o surgimento de tensões de tração que possam causar instabilidade ou ruptura da base (Figura 23).

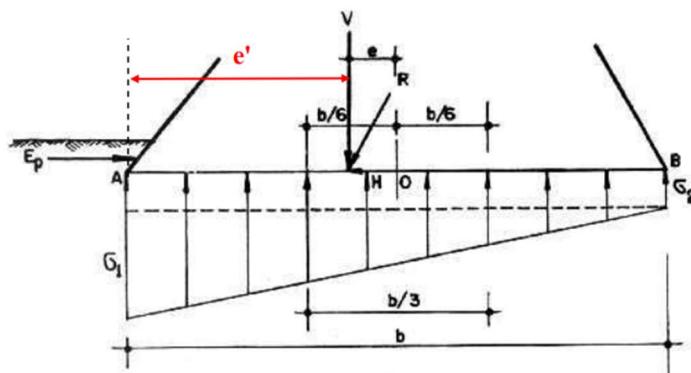


Figura 22. Capacidade de carga da fundação. Fonte: Gerscovich, 2010

A distribuição não é uniforme devido atuação combinada de peso W e do empuxo E sobre o muro. Para o cálculo das pressões verticais na base do muro σ_1 e σ_2 , temos as equações 1 e 2.

$$\sigma = \frac{v}{b} \cdot \left(1 + \frac{6 \cdot e}{b}\right) \quad (\text{equação 1})$$

$$\sigma = \frac{v}{b} \cdot \left(1 - \frac{6 \cdot e}{b}\right) \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

V = somatório das forças verticais;

e = excentricidade;

b = largura da base do muro.

A excentricidade é calculada pela resultante de momentos em relação ao ponto A da Figura 23.

$$v = \sum F_v \Rightarrow e' = \frac{\Sigma m}{\sum F_v} \Rightarrow e = \frac{b}{2} - e' \quad (\text{equação 3})$$

Os cálculos devem garantir que a base esteja submetida a tensão de compressão maior que zero, a resultante deve estar localizada no terço central; ou seja, $e < b/6$, evitando tensão de pressão na base do muro.

A equação 4 é recomendada para evitar a ruptura do solo da fundação do muro.

$$\sigma_{max} < \frac{Q_{max}}{FS} = \frac{Q_{max}}{2,5} \quad (\text{equação 4})$$

Sendo Q_{max} a capacidade de suporte calculada pelo método clássico de TERZAGHI-PRANDTL. A equação 5 apresenta o solo do muto como uma sapata.

$$q_{max} = C' \cdot N_c + q_s \cdot N_q + 0,5 \cdot \gamma_f \cdot B' \cdot N_y \quad (\text{equação 5})$$

Onde:

q_{max} = capacidade de suporte da fundação;

$B' = B - 2e$ = largura equivalente da base do muro;

c' = coesão do solo de fundação;

y_f = peso específico do solo de fundação;

$N_c - N_q - N_\gamma$ = são os fatores de capacidade de carga (tabela 1);

q_s = sobrecarga efetiva no nível da base da fundação ($q_s = 0$, caso a base do muro não esteja embutida no solo de fundação).

Tabela 1. Fatores de capacidade de carga (Vesic, 1975)

Φ (graus)	Nc	Nq	NY
0	5,14	1,00	0,00
10	8,35	2,47	1,22
20	14,83	6,40	5,39
30	30,14	18,40	22,40
40	75,31	64,20	109,41
50	266,89	319,07	729,89

Gerscovich (2010) ressalta que, quando a resultante das forças atuantes se localiza fora do núcleo central da base do muro, a distribuição das tensões passa a ser triangular, concentrando-se em uma região mais restrita e sendo limitada apenas a tensões de compressão. Essa configuração pode indicar uma condição crítica de estabilidade, pois a concentração das tensões na borda da base aumenta o risco de recalques diferenciais e falhas localizadas. A Figura 24 ilustra a distribuição dos esforços neste cenário, evidenciando o comportamento das tensões compressivas quando a resultante se desvia do núcleo central.

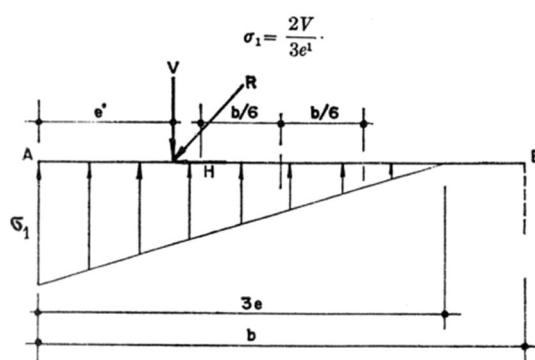


Figura 23. Capacidade de carga da fundação (resultante fora do núcleo central). Fonte: Gerscovich, 2010

Segundo Júnio e Viana (2016), a ruptura por arraste da contenção ocorre quando a resistência ao deslizamento ao longo da base do muro de gabião, somada à força de

empuxo passivo disponível à frente da estrutura, é insuficiente para contrabalançar o empuxo ativo atuante. Essa condição compromete a estabilidade do muro, levando ao deslizamento da estrutura, conforme ilustrado na Figura 25. A análise desse tipo de ruptura é essencial para o dimensionamento adequado dos muros de gabião, garantindo que as forças resistentes sejam suficientes para manter o equilíbrio estático da contenção.

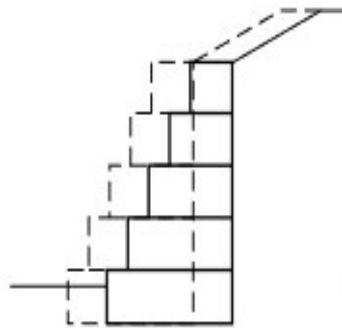


Figura 24. Arraste de uma contenção em gabião. Fonte: (BARROS, 2010)

Portanto, é possível definir um coeficiente de segurança contra o arraste (F_d) dada pela seguinte expressão

$$F_d = \frac{T_d + E_{pd}}{E_{ad}} \quad (\text{equação 6})$$

Onde “ E_{ad} ” e “ E_{pd} ” referem-se aos empuxos ativo e passivo em direção ao arraste. A figura 26 abrange tais elementos em corte esquemático.

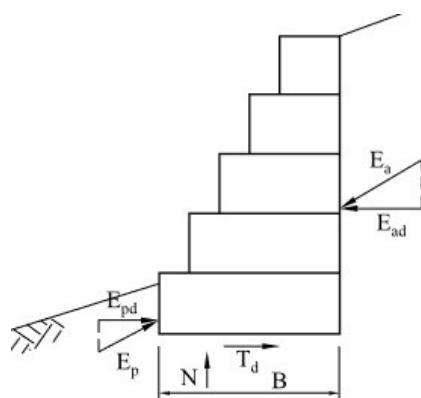


Figura 25. Forças atuantes no gabião quanto ao deslizamento. Fonte: (Barros, 2010)

De acordo com Alelvan (2017), A força “ T_d ” corresponde à resistência ao cisalhamento disponível ao longo da base da estrutura (fundação/solo), equivalendo a:

$$T_d = N \cdot \tan \delta^* + a^* \cdot B \quad (\text{equação 7})$$

Onde “ δ^* ” representa o ângulo de atrito entre o solo da fundação e a base da estrutura, e “ a^* ” representa a adesão entre o solo e a base. Os valores sugeridos por Barros (2010) para “ δ^* ” e “ a^* ” são:

$$\frac{2}{3} \tan \phi \leq \tan \delta^* \leq \tan \phi \quad (\text{equação 8})$$

$$\frac{1}{3} \cdot c \leq a^* \leq \frac{3}{4} \cdot c \quad (\text{equação 9})$$

É sugerido por Coduto et al. (2015) valor de $F_d \geq 1,5$ para solos não coesivos e $F_d \geq 2,0$, para solos coesivos.

Para Teixeira (2017), o tombamento do arrimo consiste em um movimento rotacional que ocorre a frente do maciço próximo ao eixo abaixo do centro de gravidade do trecho que está sendo deslocado. Esta solicitação ocorre quando a grandeza do momento gerado pelo empuxo ativo em relação a um ponto “A”, localizado no próximo a base do gabião, é superior a força do momento gerado pelo peso próprio da contenção, somado ao empuxo passivo. A Figura 27 ilustra o tombamento do arrimo em muro de gabião.

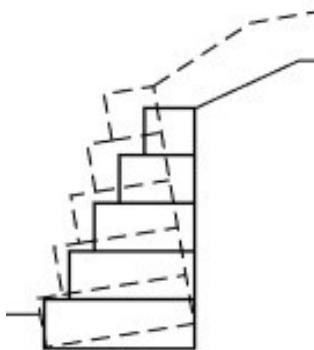


Figura 26. Tombamento do arrimo em muro de gabião. Fonte: (Barros, 2010)

Dessa forma, pode-se calcular o fator de segurança ao tombamento da contenção por meio da seguinte equação:

$$F_1 = \frac{M_p + M_{Ep}}{M_{Ea}} \quad (\text{equação 10})$$

A seguir, a Figura 28 apresenta os esforços solicitantes no tombamento:

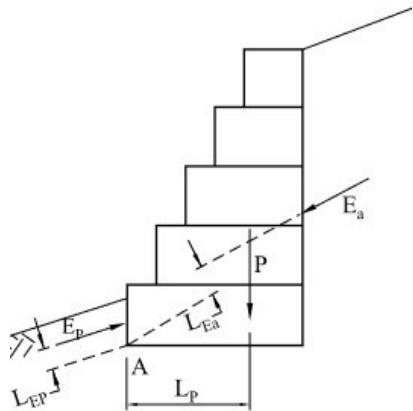


Figura 27. Forças atuantes no gabião quanto ao tombamento. Fonte: (Barros, 2010)

De acordo com Alqedra (2016), outra maneira de definição do coeficiente de segurança em relação ao tombamento é levar em conta que apenas a componente horizontal do empuxo ativo “Eah” corrobora com o momento de tombamento, enquanto sua componente vertical “Eav” contribui com o momento resistente. Dessa forma o coeficiente de segurança “Ft” ficaria:

$$F_t = \frac{M_p + M_{Ep} + M_{Eav}}{M_{Eah}} \quad (\text{equação 11})$$

Este tipo de ruptura pode ocorrer quando os esforços internos do gabião são excessivos e /ou pelo carregamento externo oriundo do empuxo e sobrecargas aplicadas no arrimo, não previstas no projeto. Assim, a análise da ruptura interna deve ser feita criteriosamente para cada tipologia de estrutura de arrimo (BARROS, 2010). A Figura 29 ilustra este fenômeno.

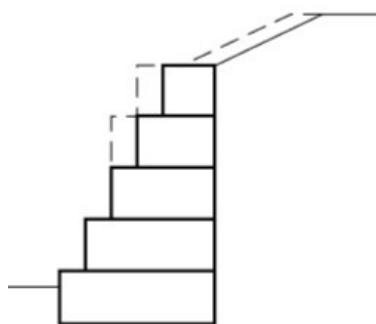


Figura 28. Ruptura interna do muro de gabião. Fonte: (Barros, 2010)

Para muros de arrimo compostos por gabiões, é essencial avaliar a segurança contra o deslizamento das gaiolas superiores sobre as inferiores, tornando essa análise análoga à verificação de arraste da estrutura. A diferença reside no fato de que, nesse caso, a análise deve ser conduzida para cada nível do arranjo escalonado dos gabiões, considerando para o cálculo do empuxo a altura total desde o topo até o nível em análise. Além disso, deve-se incluir a resistência ao deslizamento fornecida pelo atrito entre as gaiolas, caracterizada pelo ângulo de atrito interno “ φ^* ” e pela coesão “C” entre os gabiões. Esses parâmetros são críticos para garantir a estabilidade da estrutura e são sugeridos por Barros (2010).

$$\varphi^* = 25 \cdot \gamma_g - 10^\circ \quad (\text{equação 12})$$

$$C_g = 0,30 \cdot p_u - 0,50 \text{ [tf/m}^2\text{]} \quad (\text{equação 13})$$

Onde “ γ_g ” é o peso específico dos gabiões em “tf/m³” e “ p_u ” é o peso da gaiola metálica em “kgf/m³”.

É necessário verificar também, a tensão normal máxima entre os gabiões, tal análise é semelhante a desenvolvida nos cálculos de ruptura de fundação. Para o cálculo de “ $\sigma_{máx}$ ” admite-se que a força normal “N” dissipase uniformemente sobre seu ponto de aplicação até uma distância “d” para cada lado deste ponto, ou seja, “d” representa a distância entre o ponto de aplicação de “N” e a borda da camada de gabiões (BARROS, 2010) Dessa forma se obtém:

$$\sigma_{máx.} = \frac{N}{2 \cdot d} \quad (\text{equação 14})$$

A tensão normal máxima admissível entre os gabiões é:

$$\sigma_{adm} = 0,30 \cdot \gamma_g - 30 \text{ [tf/m}^2\text{]} \quad (\text{equação 15})$$

2.7 Determinação do fator de segurança segundo a ABNT NBR 11.682/2009

Conforme estabelecido pela norma ABNT NBR 11.682/2009 – Estabilidade de Encostas, os fatores de segurança (FS) desempenham um papel crucial na mitigação das incertezas inerentes ao processo de projeto de estruturas de contenção. Esses fatores são utilizados para garantir a estabilidade, levando em consideração as variabilidades naturais

do solo e das condições de contorno. A classificação do nível de segurança do projeto deve ser realizada com base na análise dos riscos envolvidos, especialmente considerando a possibilidade de perdas de vidas humanas, conforme ilustrado no quadro 1, e os potenciais danos materiais e ambientais, como demonstrado no quadro 2. Essa abordagem permite o dimensionamento de contenções com níveis de segurança adequados às especificidades do local e ao impacto potencial dos deslizamentos.

Quadro 1: Nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas.

Nível de segurança	Critérios
Alto	Áreas com intensa movimentação e permanência de pessoas, como edificações públicas, residenciais ou industriais, estádios, praças e demais locais, urbanos ou não, com possibilidade de elevada concentração de pessoas ferrovias e rodovias de tráfego intenso.
Médio	Áreas e edificações com movimentação e permanência restrita de pessoas ferrovias e rodovias de tráfego moderado.
Baixo	Áreas e edificações com movimentação e permanência eventual de pessoas, ferrovias e rodovias de tráfego reduzido.

Fonte: (ABNT, 2009)

Quadro 2: Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais.

Nível de segurança	Critérios
Alto	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de alto valor histórico, social ou patrimonial, obras de grande porte e áreas que afetem serviços essenciais. Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais graves, tais como nas proximidades dos oleodutos, barragens de rejeito e fábrica de produtos tóxicos.
Médio	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor moderado. Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais moderados.
Baixo	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor reduzido. Danos Ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais reduzidos.

Fonte: (ABNT, 2009)

Conforme a ABNT NBR 11.682/2009, o fator de segurança (FS) mínimo a ser adotado na avaliação da estabilidade global das estruturas de contenção deve ser determinado em conformidade com os níveis de segurança padronizados na Quadro 1 e Quadro 02, sendo confrontado com os valores especificados na Tabela 2. Esses valores se referem às análises de estabilidade global e local do maciço de solo, sendo independentes dos fatores de segurança adicionais recomendados por outras normas específicas para o dimensionamento dos elementos estruturais de contenção, incluindo o uso de gabiões. Essa distinção assegura que os critérios de segurança sejam aplicados de forma abrangente e apropriada às condições específicas de cada projeto.

Tabela 2. Nível de segurança desejado contra danos a vidas humanas.

Nível de Segurança contra danos a vidas Humanas.	Alto	Médio	Baixo
Nível de Segurança Contra danos Materiais e ambientais			
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

Nota 1- No caso de grande variabilidade dos resultados dos ensaios geotécnicos, os fatores de segurança supracitados devem ser majorados em 10%.

Nota 2- No caso de estabilidade de lascas/blocos rochosos, podem ser utilizados fatores de segurança parciais, incidindo sobre os parâmetros γ , ϕ , c em função das incertezas destes parâmetros. O método de cálculo deve ainda considerar um fator de segurança mínimo de 1,1. Este caso deve ser justificado pelo responsável técnico.

Fonte: (ABNT, 2009)

Em relação aos projetos de contenção de solo, incluindo muros de gabião, a ABNT NBR 11.682/2009 estabelece que todas as estruturas de contenção devem ser projetadas para suportar, além dos esforços inerentes do solo, uma sobrecarga accidental mínima de 20 kPa, uniformemente distribuída sobre a superfície do maciço a ser contido. Caso valores inferiores sejam adotados, é imperativo que a justificativa técnica seja devidamente apresentada pelo responsável técnico.

Adicionalmente, para estruturas de contenção do tipo gravidade, como muros de gabião, o dimensionamento deve contemplar a verificação da estabilidade frente ao tombamento, deslizamento e capacidade de carga da fundação. A linha de ação da resultante dos esforços deve interceptar o terço central da base da estrutura, garantindo segurança contra falhas.

O sistema de drenagem é um componente essencial no projeto de contenção e deve ser cuidadosamente considerado, mesmo em muros de gabião, que podem funcionar como soluções auto drenantes em determinadas condições. Existem dois tipos principais de drenagem: superficial e profunda. Os drenos superficiais são, preferencialmente, moldados "in loco" e devem considerar a correta disposição do ponto de descarga, evitando áreas não protegidas contra erosão e prevendo bacias de amortecimento, quando necessário. Os drenos profundos são projetados para manter o lençol freático rebaixado, sendo dimensionados com base em estudos geológicos e hidrogeológicos para garantir a passagem de água sem o transporte de partículas sólidas (ABNT, 2009).

Quanto aos critérios de cálculo para a estabilidade de encostas ou elementos de obras de contenção de maciços de solo, incluindo muros de gabião, a ABNT NBR 11.682/2009 exige que os seguintes parâmetros sejam claramente definidos em qualquer situação de cálculo:

- i) As seções geológico-geotécnicas consideradas no projeto, detalhando a configuração estrutural do terreno e as camadas de solo analisadas;
- ii) Os parâmetros geotécnicos do terreno, incluindo a descrição dos critérios adotados para a obtenção dos valores utilizados, considerando de forma coerente os parâmetros de resistência para condições de solos intactos e rompidos. Para terrenos rompidos, deve-se adotar coesão igual a zero, conforme as diretrizes técnicas;
- iii) O método de cálculo utilizado, com especificação das fórmulas aplicadas, softwares ou programas computacionais empregados, e referências bibliográficas que fundamentam os procedimentos adotados no dimensionamento;
- iv) As condições consideradas para o nível da água, poropressões, atuação de sobrecargas, possíveis eventos sísmicos e as fases executivas, garantindo que todos os aspectos críticos do comportamento do solo sejam adequadamente avaliados.

2.8 Experiência científica no estudo da performance de gabiões

Para alcançar um desenvolvimento sustentável, é essencial que os países priorizem soluções que valorizem a qualidade sobre a quantidade, promovendo a economia no uso de matérias-primas e incentivando a reutilização de recursos. Nesse contexto, o conceito de Soluções Baseadas na Natureza (SBN), ou Nature-Based Solutions (NBS), como definido pela Comissão Europeia (EC, 2021), ganha destaque. As SBN incorporam os princípios de sustentabilidade, economia e flexibilidade, apresentando alternativas inovadoras para atender às diversas necessidades humanas.

Essas soluções operam em harmonia com os processos naturais, criando oportunidades de emprego e produtos, sem esgotar os recursos ambientais, promovendo um equilíbrio essencial entre o desenvolvimento humano e a preservação da natureza.

Na construção civil, a incorporação de SBN implica o uso de materiais provenientes de fontes naturais combinados com elementos estruturais tradicionais, buscando minimizar os impactos ambientais das edificações. Como observado por Yokemura (2023), essa abordagem permite que a construção civil se torne uma aliada na preservação do meio ambiente, utilizando recursos de forma responsável e eficiente. A aplicação de SBN no setor construtivo não só atende aos padrões técnicos exigidos, mas também contribui para a criação de cidades mais resilientes e sustentáveis, reduzindo a degradação ecológica dos empreendimentos.

Uma das áreas emergentes de aplicação das SBN é a mitigação dos impactos urbanos, como a poluição sonora gerada pelo tráfego intenso de veículos em grandes centros urbanos, como São Paulo. Estudos recentes, como o conduzido por Souza Junior (2023), exploram o uso de soluções inovadoras para reduzir esses impactos. A pesquisa investigou a viabilidade técnica da utilização de gabiões caixa eletrossoldados, que são comumente utilizados como estruturas de contenção na construção civil, para a redução da poluição sonora em áreas de alta circulação de veículos e pessoas. A proposta é posicionar esses gabiões em pontos estratégicos da cidade, como ilustrado na Figura 30, para atenuar os níveis de ruído, contribuindo para uma melhor qualidade de vida urbana e reforçando o papel das SBN na requalificação dos espaços urbanos.



Figura 29. Disposição do emissor, com posicionamento decibelímetros. Fonte: Souza Junior, 2023.

Na UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais, uma pesquisa foi conduzida para avaliar a viabilidade técnica da utilização de resíduos de construção e demolição (RCD) reciclados como material de enchimento em estruturas de contenção construídas com gabiões (Figura 31). O estudo teve como objetivos específicos determinar a composição gravimétrica dos RCD utilizados; caracterizar os agregados reciclados (AR) com base em suas propriedades e índices físicos, comparando-os com o material pétreo tradicionalmente empregado; avaliar o desempenho mecânico de cada fração de AR em relação aos agregados rochosos convencionais; e determinar a resistência à compressão não confinada de células de gabião preenchidas com diferentes composições: 100% em massa de RCD da fração cinza, 25% em massa de fração vermelha e 25% em massa de fração mista.

Além disso, o estudo analisou a deformabilidade dessas células de gabião, com o objetivo de avaliar o desempenho mecânico global das estruturas de contenção. A comparação dos AR com materiais pétreos convencionais buscou evidenciar o potencial de utilização dos resíduos reciclados, contribuindo para uma construção mais sustentável ao reduzir a dependência de recursos naturais e promover a reciclagem de materiais provenientes da construção civil. Os resultados visam demonstrar a viabilidade técnica e as vantagens ambientais de integrar RCD em soluções construtivas, alinhando-se aos princípios de sustentabilidade e economia circular no setor da construção.



Figura 30. (a) Gabião vazio, (b) Início de montagem, (c) Gabião com RCD. Fonte: Ramos, 2022.

Apesar da exigência de responsabilidade técnica, muitos projetos de barragens de médio e pequeno porte ainda são desenvolvidos com base em métodos empíricos, o que frequentemente resulta em obras conservadoras, porém não necessariamente seguras (PASCHOALIN FILHO, 2002). Um exemplo dessa realidade pode ser observado em um

projeto destinado a atender às necessidades de abastecimento de um município com 57.500 habitantes, onde a barragem precisava elevar o nível do ribeirão em até 1,5 m.

Entretanto, a construção de um barramento convencional foi limitada pela presença de um muro de contenção do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) localizado na margem esquerda do ribeirão Avecuia, restringindo o espaço disponível para a obra. Diante dessa restrição, optou-se pela substituição do barramento de solo compactado convencional por uma estrutura em gabiões, conforme detalhado no artigo “Utilização de Solução em Gabião em Projeto e Execução de Barragem no Ribeirão Avecuia”. O projeto executivo (Figura 32) foi elaborado pela empresa Geoconceito Engenharia Consultiva, com o apoio da Maccaferri do Brasil (PASCHOALIN FILHO et al., 2020).

Essa abordagem inovadora demonstrou a viabilidade técnica dos gabiões como alternativa eficiente e sustentável em projetos de barragens, evidenciando a adaptação das soluções tradicionais para atender a restrições espaciais e normativas específicas, sem comprometer a segurança e a funcionalidade da estrutura.



Figura 31. Locação e preenchimento dos gabiões caixa. Fonte: Paschoalin Filho et al., 2020.

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização do tipo de pesquisa.

Para aplicar o gabião como alternativa de construção os efeitos adversos devido a sua implementação devem ser estudados criteriosamente. Gabiões são confeccionados, a partir de telas metálicas em malhas hexagonais, preenchidos com blocos de rochas de granulometria e costuradas juntas, formando uma estrutura flexível. Como são elementos permeáveis, recomenda-se que entre o solo e o gabião, coloca-se o geotêxtil, para prevenir entradas de partículas do solo no fluxo de água (PEREIRA, et al., 2022)

Em muitas regiões, predominam técnicas convencionais fundamentadas em um padrão de observação positivista, caracterizado pela ênfase na quantificação de resultados empíricos e pela pouca interação entre pesquisadores e participantes do estudo. Esse enfoque, embora útil para determinadas abordagens, frequentemente limita a compreensão dos fenômenos sociais, uma vez que desconsidera a complexidade e a subjetividade das interações humanas.

A pesquisa-ação se apresenta como uma alternativa metodológica que visa superar essas limitações, promovendo uma integração ativa entre teoria e prática e estimulando a colaboração entre os envolvidos no processo investigativo. No entanto, é importante ressaltar que a pesquisa-ação não substitui outras abordagens metodológicas; trata-se de uma linha de pesquisa complementar, com um campo de aplicação específico dentro da metodologia das ciências sociais (THIOLLENT, 2022).

A pesquisa-ação destaca-se por sua natureza participativa e reflexiva, sendo frequentemente utilizada em contextos nos quais é necessária uma intervenção direta para a resolução de problemas específicos. Essa metodologia preenche a lacuna entre teoria e prática, permitindo que o conhecimento científico se desenvolva em conjunto com a prática cotidiana dos participantes. As seguintes características da pesquisa-ação são:

- **Processo de Aprendizagem:** A pesquisa-ação envolve os participantes e o objeto de estudo em um processo contínuo, onde o pesquisador e os sujeitos não são vistos como entidades separadas, mas como cocriadores do conhecimento. Essa integração permite uma compreensão mais rica e contextualizada do fenômeno, criando um espaço de aprendizado mútuo que favorece tanto a prática quanto a teoria.
- **Utilidade Prática dos Dados:** Os resultados obtidos na pesquisa-ação são diretamente aplicáveis à prática, pois são gerados a partir de um contexto real e com a participação ativa dos envolvidos. As estratégias de intervenção são desenvolvidas e ajustadas em tempo real, garantindo que as soluções propostas sejam compreendidas e aplicáveis pelos participantes, que se tornam protagonistas do processo de mudança.
- **Caráter Situacional:** A pesquisa-ação é intrinsecamente vinculada a contextos específicos e visa identificar e solucionar problemas localizados. Ao focar em um problema particular dentro de um contexto definido, a pesquisa-ação busca relevância prática, valorizando a aplicabilidade dos resultados em vez de buscar

generalizações científicas amplas que muitas vezes não capturam as especificidades locais.

- **Autoavaliação Contínua:** A pesquisa-ação incorpora um processo de autoavaliação contínua, onde as intervenções são constantemente monitoradas e ajustadas com base nos feedbacks coletados. Esse processo reflexivo permite a correção de rumos e o aprimoramento das ações, o que contribui para uma abordagem flexível e adaptativa que se ajusta às necessidades emergentes do contexto.
- **Ciclo de Melhoria Contínua:** A metodologia da pesquisa-ação segue um ciclo interativo de planejamento, ação, observação e reflexão. Cada etapa do ciclo fornece informações valiosas que são utilizadas para refinar e melhorar os estágios subsequentes. Esse caráter cíclico promove uma adaptação constante, garantindo que a pesquisa não apenas responda às questões iniciais, mas também evolua junto com as necessidades do contexto.

Esta pesquisa é do tipo aplicada, com uma abordagem exploratória e experimental com a análise quantitativa dos dados obtidos. Uma pesquisa aplicada é orientada para a resolução de problemas práticos específicos e visa a aplicação direta dos conhecimentos gerados.

Essencialmente, a pesquisa experimental consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto. As pesquisas experimentais constituem o mais valioso procedimento disponível aos cientistas para testar hipóteses que estabelecem relações de causa e efeito entre as variáveis. Em virtude de suas possibilidades de controle, os experimentos oferecem garantia muito maior do que qualquer outro delineamento de que a variável independente causa efeitos na variável dependente (GIL, 2002).

Nesse caso, o objetivo é desenvolver soluções que possam ser implementadas em contextos reais, respondendo a demandas concretas de uma comunidade ou setor.

A abordagem exploratória permite um entendimento inicial do problema, identificando padrões e insights que podem guiar intervenções futuras. É particularmente útil quando o tema ainda não é amplamente estudado, fornecendo uma base para formulação de hipóteses e novas pesquisas.

A análise quantitativa dos dados foi utilizada para mensurar variáveis e obter resultados objetivos que são comparados e replicados. Essa análise permite avaliar a

eficácia das intervenções propostas pela pesquisa de maneira sistemática, fornecendo evidências numéricas que apoiam as conclusões e recomendações do estudo. A combinação da análise quantitativa com a pesquisa-ação, exploratória e experimental garante um aprofundamento na compreensão dos fenômenos investigados, ao mesmo tempo que oferece dados robustos que fortalecem a validade científica da pesquisa.

Assim, a pesquisa proposta não apenas promove a produção de conhecimento prático, mas também fortalece a capacidade dos participantes de compreenderem e modificarem suas próprias realidades, ampliando o impacto social e científico dos estudos realizados. Essa metodologia se destaca pela capacidade de gerar transformações concretas, alinhando-se aos princípios de uma ciência engajada.

3.2 Ensaios labororiais para caracterização dos materiais de preenchimento

A caracterização dos materiais utilizados como enchimento de gabiões foi realizada por meio de ensaios labororiais específicos para cada tipo de material, conforme orientações de especialistas e em conformidade com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). A escolha dos ensaios seguiu uma consulta técnica especializada, visando atender aos critérios normativos e assegurar a qualidade dos dados obtidos. Os ensaios foram conduzidos nos Laboratórios da Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp. A seguir, são detalhados os ensaios a serem realizados para cada tipo de material:

- **Ensaio de Permeabilidade a Carga Constante:** Realizado conforme a ABNT NBR 13292:1995, determina o coeficiente de permeabilidade de solos granulares, como a areia utilizada nesta pesquisa. O ensaio é conduzido em laboratório com um permeâmetro de carga constante, onde a água escoa através da amostra sob um gradiente hidráulico controlado. Mede-se o volume de água percolado em um tempo determinado, permitindo o cálculo da permeabilidade.
- **Ensaio de Análise Granulométrica por Peneiramento:** Realizado conforme a ABNT NBR 7181:2016, determina a distribuição granulométrica de solos granulares, como a amostra de areia e brita utilizadas nesta pesquisa. No ensaio, a amostra foi peneirada em uma série de peneiras padronizadas, com abertura decrescente, sendo o material retido em cada peneira pesado para calcular a distribuição dos grãos e traçar a curva granulométrica. Os resultados foram essenciais para a classificação da granulometria das amostras e sua caracterização.

- **Ensaio de Peso Específico dos Sólidos:** Realizado conforme a ABNT NBR 6508:1984, determinou a densidade dos grãos das amostras de areia. O ensaio foi conduzido em laboratório utilizando o método da picnometria, onde uma amostra seca do material é inserida em um frasco volumétrico (picnômetro), preenchido com água ou outro líquido não reativo. A variação de massa permitiu calcular o volume real dos sólidos, determinando assim o peso específico dos grãos.
- **Ensaio de Peso Específico Natural:** Realizado conforme a ABNT NBR 7182:1986, determinou o peso específico das amostras de brita na sua condição natural. O ensaio foi conduzido pelo método do peso submerso e volume deslocado, onde a amostra seca foi imersa em um líquido não reativo e seu volume é determinado pela quantidade de fluido deslocado. Com a relação entre a massa seca e o volume obtido, calculou-se o peso específico natural.

3.3 Montagem dos corpos de prova e ensaio de compressão

Os ensaios de compressão simples não confinados foram conduzidos no Laboratório de Materiais da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI) da Universidade de Campinas (UNICAMP), localizada em Campinas/SP. O principal objetivo desses ensaios foi a determinação das curvas tensão versus deformação para gabiões executados com malha eletrossoldada, permitindo a análise do comportamento estrutural do material sob carregamento axial.

Para a realização dos ensaios, foram utilizados corpos de prova confeccionados com dimensões reduzidas de 0,4 m (altura) × 0,4 m (largura) × 0,4 m (comprimento). Essa configuração permitiu a avaliação das deformações verticais e horizontais, possibilitando uma compreensão detalhada da resposta mecânica da estrutura sob compressão simples (Figura 33).

Os corpos de prova foram construídos utilizando malha eletrossoldada do tipo Easy S, fabricados pela Belgo Arames. Essa escolha foi fundamental para garantir que os resultados obtidos fossem representativos das condições reais da estrutura monitorada. Os gabiões eram compostos por painéis de malha soldada, com diâmetro de arame de 4,0 mm e abertura de tela retangular de 5,0 cm (largura) × 10,0 cm (altura). Além disso, foram utilizadas conexões no formato espiral, fabricadas com arame de 5,0 mm de diâmetro e 40 cm de comprimento, assegurando a fidelidade do modelo experimental em relação à estrutura real.



Figura 32. Painéis e conexões em espiral do Gabião Eletrossoldado. Fonte: Dados da Pesquisa

Todos os corpos de prova utilizados no ensaio foram pesados individualmente, incluindo tanto os gabiões (compostos por painéis e conexões).

Cada corpo de prova de gabião foi montado com seis painéis de 40 cm de comprimento, conectados por doze espirais metálicas, formando a estrutura da caixa.

Diferentemente dos gabiões utilizados na pesquisa de Camelo (2019), que empregou gabiões convencionais de malha tipo tecido, os gabiões eletrossoldados utilizados nesta pesquisa apresentam características estruturais distintas. Nos gabiões convencionais, a conformação da caixa é obtida por meio da costura das telas com arames de amarração, processo que confere flexibilidade à estrutura, mas pode resultar em deformações ao longo do tempo.

Já no modelo de gabião eletrossoldado adotado neste estudo, a geometria da caixa não depende de costuras com arames, mas sim do uso de conexões metálicas espirais, que substituem as amarrações tradicionais. Além disso, as telas são rígidas, uma característica que melhora o desempenho estrutural ao reduzir deformações durante o carregamento e proporcionar maior resistência à compressão e ao cisalhamento.

Essa configuração faz com que os gabiões eletrossoldados apresentem um comportamento mecânico diferenciado, com maior controle da deformabilidade e melhor desempenho em contenções. A rigidez das telas soldadas evita deslocamentos excessivos, garantindo maior estabilidade à estrutura ao longo do tempo e reduzindo a necessidade de manutenção em comparação aos modelos convencionais.

O equipamento utilizado para a realização do ensaio de compressão foi uma prensa da marca ENIC, com capacidade máxima de 300 kN. Esse equipamento permitiu a aplicação controlada da carga sobre os corpos de prova, viabilizando a obtenção de dados

precisos sobre o comportamento mecânico dos gabiões eletrossoldados sob compressão axial.

Os corpos de prova de gabião foram posicionados entre duas chapas metálicas de 500 mm × 500 mm × 20 mm, garantindo uma distribuição uniforme da carga aplicada durante o ensaio. Para assegurar a livre deformação da estrutura, as quatro paredes laterais dos corpos de prova permaneceram sem qualquer tipo de apoio, permitindo a observação direta das deformações verticais e horizontais ao longo do teste.

Essa configuração experimental foi adotada para simular de forma mais crítica as condições de carregamento de um muro de gabião, reproduzindo seu comportamento estrutural sem a influência de restrições laterais artificiais, o que garantiria confinamento e reduziria a magnitude das deformações.

Para garantir que a pressão aplicada pela prensa fosse distribuída de maneira uniforme no centro da chapa metálica (Figura 34), foi necessário realizar uma marcação de referência (gabarito) na superfície desta. Essa marcação assegurou o alinhamento preciso do eixo da prensa, permitindo uma dissipação homogênea da força aplicada sobre os corpos de prova durante os ensaios de compressão.

Além de auxiliar no posicionamento adequado da carga, essa marcação também foi fundamental para a instalação dos relógios comparadores, dispositivos utilizados para medir com precisão a deformação vertical dos gabiões ao longo do ensaio. Durante os testes, os relógios comparadores foram posicionados estratégicamente, garantindo que as leituras refletissem fielmente o comportamento do gabião sob carregamento axial, possibilitando a análise detalhada da variação da altura da estrutura em função da carga aplicada.

Essa metodologia foi essencial para garantir a reproduzibilidade dos ensaios e a coletânea de dados confiáveis, permitindo a correta caracterização da capacidade de deformação dos gabiões eletrossoldados sob compressão.



Figura 33. Chapas de aço com gabarito para apoio dos gabiões. Fonte: Dados da Pesquisa

Após a colocação da primeira chapa metálica, o gabião eletrossoldado foi montado seguindo as especificações do manual do fabricante, garantindo que a estrutura mantivesse sua geometria e estabilidade. O gabião foi então centralizado sobre a chapa inferior, de acordo com as recomendações de Barros (2008), assegurando um alinhamento adequado para o ensaio.

Após a finalização do preenchimento (figuras 35 e 36), foi instalado o último painel do gabião, fechando completamente a estrutura e garantindo sua integridade para o ensaio (figura 37). Sobre esse painel foi posicionada a segunda chapa metálica (figura 38), completando o sistema de carregamento. Finalmente, foram instalados os relógios medidores, responsáveis por monitorar as deformações verticais da estrutura durante o ensaio de compressão.

Com o objetivo de acompanhar e medir as deformações a cada incremento de carga durante o ensaio de compressão, os relógios comparadores foram posicionados estratégicamente nos cantos da chapa metálica gabaritada. Além das leituras automatizadas, também foram realizadas leituras manuais utilizando uma trena metálica manual (figura 39), garantindo a precisão das medições.

Para a avaliação das deformações horizontais, foi adotado um método complementar com o uso de fita métrica em rolo, posicionada sempre sobre o ponto central previamente marcado no painel do gabião. Essa metodologia permitiu a verificação contínua da expansão lateral do corpo de prova, possibilitando uma análise mais detalhada do comportamento mecânico da estrutura sob compressão.

Os ensaios foram conduzidos com a aplicação progressiva de força vertical com incrementos de carga em etapas de 5kN, registrando-se as leituras dos relógios comparadores, bem como as medições verticais e horizontais do corpo de prova a cada nova aplicação de carga. O ensaio foi conduzido até que o corpo de prova atingisse um dos seguintes critérios de interrupção:

- **Estabilização da carga** – quando não houvesse mais variação significativa na resistência do gabião frente ao aumento da carga aplicada.
- **Deformação lateral excessiva** – quando o deslocamento horizontal do gabião atingisse o limite estabelecido, a ponto de encostar-se no equipamento de teste

Para o preenchimento dos gabiões, uma vez que os materiais utilizados eram granulares a face interna das telas foram revestidas com manta geotêxtil não tecida, sendo

o topo, após preenchimento completo, costurado a fim de evitar perda de material. O processo de preparo do corpo de prova pode ser verificado nas figuras a seguir:



Figura 34. Preenchimento do corpo de prova com areia. Fonte: Dados da Pesquisa



Figura 36. Corpo de prova preenchido com brita #2. Fonte: Dados da Pesquisa



Figura 37. Corpo de prova preenchido pronto para o ensaio. Fonte: Dados da Pesquisa



Figura 35. Ensaio de compressão em execução. Fonte: Dados da Pesquisa



Figura 36. Aferição da deformação horizontal no eixo do gabião com trena. Fonte: Dados da Pesquisa

3.4 Análise das curvas tensão versus deformação

Para o estudo das curvas tensão-deformação obtidas nos ensaios de compressão dos gabiões eletrossoldados preenchidos com diferentes materiais, foram determinadas as equações de regressão correspondentes a cada curva experimental.

O objetivo principal dessa modelagem foi verificar os ajustes dos dados experimentais, garantindo que as equações representassem o comportamento mecânico dos materiais ensaiados. Além disso, a partir dessas curvas, foram calculados os módulos

de rigidez, tangente e secante, parâmetros fundamentais para a caracterização estrutural dos gabiões sob carregamento vertical.

Os módulos de rigidez, tangente e secante são utilizados para quantificar a resistência do material à deformação sob a ação da carga aplicada. Esses parâmetros são fundamentais para prever o desempenho estrutural dos gabiões e auxiliar no dimensionamento de estruturas geotécnicas e de contenção.

O módulo de rigidez representa a resistência global da estrutura do gabião à deformação e pode ser calculado como a razão entre a variação da força aplicada (ΔF) e a variação da deformação correspondente ($\Delta\delta$):

$$G = \frac{\Delta F}{\Delta\delta} \quad (\text{equação 16})$$

Onde:

G = módulo de rigidez (kN/mm);

ΔF = variação da força aplicada (kN);

$\Delta\delta$ = variação da deformação (mm)

O módulo tangente é calculado como a inclinação da tangente à curva tensão-deformação em um determinado ponto. Ele reflete a rigidez instantânea do material e é dado por:

$$Et = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (\text{equação 17})$$

Onde:

Et =módulo tangente;

σ = tensão aplicada em kPa;

ε = é a deformação vertical (mm)

O módulo secante representa a rigidez média do material entre dois pontos da curva tensão-deformação e é determinado pela inclinação da reta secante que liga dois pontos distintos da curva:

$$Es = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (\text{equação 18})$$

Onde:

Es =módulo secante (MPa);

σ_1, σ_2 = são os valores de tensão nos pontos considerados (kPa);

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ = são os valores de deformação correspondentes (mm)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização das amostras utilizadas - Areia

4.1.1 Granulometria por peneiramento

Para a determinação da granulometria da areia foi utilizada a série normal de peneiras para agregados miúdos (4,8 mm, 2,4 mm, 1,2 mm, 0,6 mm, 0,3 mm e 0,15 mm). Para o ensaio foi utilizada 1000 g de areia seca em estufa a 105 °C por 24 h a qual foi agitada por 10 mim em agitador de peneiras. A Tabela 3 demonstra o resultado do ensaio de peneiramento, enquanto a Figura 40 apresenta a curva granulométrica obtida.

Tabela 3. Dados obtidos a partir do ensaio de peneiramento da amostra de areia

Abertura da peneira (mm)	Massa retida (g)	% Retida	% Retida acumulada	% que passa acumulada
6,30	0	0	0	100
4,80	21,5	2,15	2,15	97,85
2,40	174,1	17,41	19,56	80,44
1,20	206,5	20,65	40,21	59,79
0,60	212,3	21,23	61,44	38,56
0,30	171,6	17,16	78,6	21,4
0,15	150,8	15,08	93,68	6,32
Fundo	63,6	6,36	100	0
Total	1000		-----	

Fonte: Dados da Pesquisa

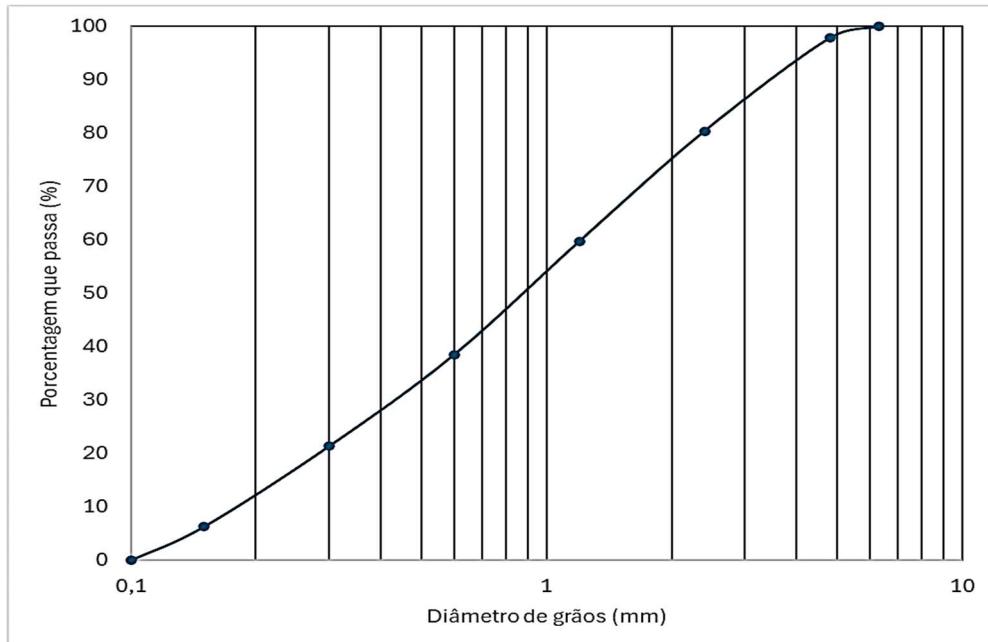


Figura 37. Curva de distribuição granulométrica obtida. Fonte: Dados da Pesquisa

A partir da curva demonstrada na Figura 40, foram obtidos os seguintes parâmetros característicos:

- Diâmetro efetivo (D_{10}) = 1,0 mm
- Diâmetro correspondente a 30% passante (D_{30}) = 1,0 mm
- Diâmetro correspondente a 60% passante (D_{60}) = 1,0 mm
- Coeficiente de Uniformidade ($C_u = D_{60} / D_{10}$) = 1,0
- Coeficiente de Curvatura ($C^c = (D_{30}^2) / (D_{10} * D_{60})$) = 1,0

Os valores obtidos indicam que o material possui uma granulometria uniforme, com partículas de tamanho muito próximo. Isso significa que não há uma ampla variação na distribuição dos grãos. Com base nessa análise, o material pode ser classificado como areia média, pois sua distribuição granulométrica está dentro da faixa típica para esse tipo de agregado.

4.1.2 Determinação do peso específico dos sólidos

Para a determinação do peso específico real (γ_{dmax}) do agregado miúdo foi utilizado o frasco de Chapman e 550,1 g de areia seca em estufa a 105°C. O volume inicial de água no frasco foi de 200 ml e a leitura final de volume foi de 415 ml, assim $\gamma_{dmax} = 2,75 \text{ g/cm}^3$ ou $27,5 \text{ kN/m}^3$.

4.1.3 Permeabilidade a carga constante

Na base do permeâmetro foi colocada uma camada de 3 cm de altura de brita nº 1 e uma camada de manta geotextil para filtragem. Sobre este filtro, foi adicionada uma massa de areia seca em estufa de 3,44 kg, resultando em uma camada (L) de 102 mm de areia adensada em mesa vibratória. A coluna de água sobre a amostra de areia foi de 59 cm em relação a base do permeâmetro. Na Tabela 4 contém os dados de leitura do permeâmetro para o ensaio com a areia. Para a determinação da constante do material (k) foi utilizada a equação de Darcy para a vazão de água (Q - Equação 18).

$$Q = k * \frac{\Delta h}{L} * A \quad (1) \qquad \text{(equação 19)}$$

Onde: $\Delta h/L$ é o gradiente hidráulico e A é a área do permeâmetro.

Camada de areia (L) = 10,2 cm

Diâmetro do permeâmetro = 15,5 cm

Coluna de água (Δh) = 59 cm

Tabela 4. Dados obtidos a partir dos ensaios de permeabilidade a carga constante

Massa (g)	Tempo (s)	Temperatura (°C)	Q (cm ³ /s)
1091,1	95,00	23	11,48
1092,4	97,00		11,26
1070,7	97,00		11,04

Fonte: Dados da Pesquisa

$$Kmédio = \frac{11,48 + 11,26 + 11,04}{3} = 11,26 \qquad \text{(equação 20)}$$

Assim, $k = 1,031 \times 10^{-2}$ cms

4.1.4 Determinação da compacidade relativa da areia (CR)

A compacidade relativa da areia é a relação entre a densidade relativa do solo solto e compactado, expressa em porcentagem. Ela indica o grau de compactação de uma areia em relação aos seus estados extremos (mínima e máxima densidade). É um parâmetro essencial para avaliar a estabilidade e resistência do solo em aplicações geotécnicas. Valores altos de CR indicam um solo mais denso e estável, enquanto valores baixos indicam uma areia solta e menos resistente. Para a determinação da compacidade relativa (CR) foi utilizada a Equação 20.

$$CR = \frac{\gamma_d - \gamma_{d\min}}{\gamma_{d\max} - \gamma_d} \times 100(\%) \quad (\text{equação 21})$$

γ_d = densidade seca do solo no campo

$\gamma_{d\min}$ = densidade seca mínima

$\gamma_{d\max}$ = densidade seca máxima

Para o ensaio foi utilizado um becker com volume total de 1360 cm³. O peso específico mínimo ($\gamma_{d\min}$) foi obtido pelo preenchimento de areia seca em estufa lançada de 10 a 12 cm da altura da borda do becker até seu preenchimento, sendo obtida a massa de 2032,9 g. Utilizando o mesmo becker, porém, com a compactação através de mesa vibratória, a massa obtida foi de 2328,4 g. Desse forma, foram obtidos os seguintes valores para os parâmetros:

- Peso específico compactado ($\gamma_{d\text{comp}}$) = 1,71 g/cm³
- Peso específico mínimo ($\gamma_{d\min}$) = 1,49 g/cm³
- Compacidade relativa (CR) = 27,27%

Um CR (Compacidade Relativa) de 27,27% indica que a areia está próxima do seu estado solto, ou seja, possui uma compactação baixa em relação à sua densidade máxima. Isso significa que o material ainda tem grande potencial de adensamento sob carregamento, podendo sofrer recalques significativos se submetido a cargas externas.

Em termos práticos:

- *Areias com CR abaixo de 33% são classificadas como soltas.*
- *Entre 33% e 67%, são consideradas medianamente compactas.*
- *Acima de 67%, são densas.*

4.2 Caracterização das amostras utilizadas - Brita

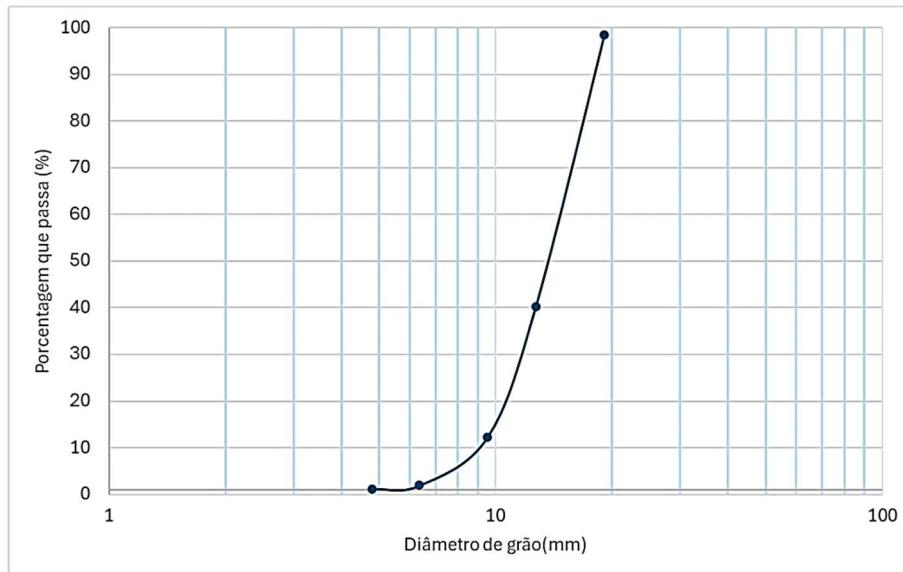
4.2.1 Granulometria por peneiramento

Para a determinação da granulometria da brita foi utilizada a série normal de peneiras para agregados graúdos (19 mm, 9,5 mm e 4,8 mm) e série intermediária (12,5 mm e 6,3 mm). Para o ensaio foi utilizada 6 kg de brita seca em estufa a 105 °C por 24 h a qual foi agitada por 10 mim em agitador de peneiras. A Tabela 5 apresenta a massa de areia retida em cada peneira, assim como os parâmetros envolvidos para a determinação do módulo de finura (MF).

Tabela 5.Dados obtidos a partir do ensaio de peneiramento da amostra de brita

Abertura da peneira (mm)	Massa retida (g)	% Retida	% Retida acumulada	% que passa acumulada
25,00	0	0	0	0
19,10	91,83	1,53	1,53	0
12,70	3494,9	58,13	59,66	98,47
9,52	1687,8	28,07	87,73	40,34
6,35	619,2	10,30	98,03	12,27
4,80	46,67	0,78	98,80	1,97
Fundo	71,90	1,20	100	1,2
Total	6012,3			

Fonte: Dados da Pesquisa

**Figura 38.** Curva de distribuição granulométrica obtida. Fonte: Dados da Pesquisa

De acordo com a Tabela 5 e Figura 41 constata-se que principais parâmetros granulométricos calculados foram $D_{10} = 8,82$ mm, $D_{30} = 11,53$ mm e $D_{60} = 14,86$ mm, sendo que o coeficiente de uniformidade (CNU) foi determinado como 1,69 e o coeficiente de curvatura (CC) resultou em 1,01. Esses valores indicam que o material apresenta uma granulometria relativamente uniforme, já que um CNU abaixo de 2 caracteriza uma distribuição menos dispersa das partículas, enquanto o CC dentro da faixa recomendada (entre 1 e 3) sugere uma boa transição entre tamanhos de grãos, sem segregação excessiva.

Com base no valor de D_{60} , o material é classificado como Brita #2, um agregado amplamente utilizado na produção de concretos estruturais, lastros ferroviários

e camadas de base e sub-base para pavimentação. Assim, pode-se concluir que o material analisado possui uma granulometria bem distribuída.

4.2.2 Peso específico dos sólidos

A amostra de brita foi seca em estufa a 105°C por 24 h. Após a massa seca ser registrada, a amostra foi submersa em água por 24 h e anotados os valores de leitura submersa e suspensa, descontando-se o volume deslocado pelo cesto (Tabela 6). O peso específico real ($\gamma_{dmáx}$) para a brita calculado foi de 2,65 g/cm³ ou 26,5 kN/m³.

Tabela 6. Dados brutos para cálculo do peso específico real da brita.

Massa seca (g)	Tara seca (g)	Tara submersa (g)	Amostra + tara suspensa (g)	Amostra + tara submersa (g)	$\gamma_{dmáx}$ (kN/m ³)
1149	1178	167,2	1365,5	921	26,5

Fonte: Dados da Pesquisa

4.2.3 Permeabilidade a carga constante

Para o ensaio foi adicionado 4,53 kg de brita seca em estufa ao permeâmetro, com espessura final (L), após adensamento em mesa vibratória, de 14,9 cm. A coluna de água sobre a amostra de areia foi de 59 cm em relação a base do permeâmetro. Para a determinação da constante do material (k) foi utilizada a equação de Darcy para a vazão de água (Q - Equação 1). Na Tabela 7 contém os dados de leitura do permeâmetro para o ensaio com a brita.

- Camada de brita (L) = 14,9 cm
- Diâmetro do permeâmetro = 15,5 cm
- Coluna de água (Δh) = 59 cm

Tabela 7.Dados obtidos a partir dos ensaios de permeabilidade a carga constante

Massa (g)	Tempo (s)	Temperatura (°C)	Q (cm ³ /s)
1118,9	38,56		29,02
1093,9	37,66	23	29,05
1108,3	38,13		29,07

Fonte: Dados da Pesquisa

$$Kmédio = \frac{29,02+29,05+29,07}{3} = 29,04 \quad (\text{equação 22})$$

Assim, $k = 3,88 \times 10^{-2}$ cm/s

4.2.4 Determinação da compacidade relativa da brita (CR)

Para a determinação da compacidade relativa (CR) da brita foi utilizado o mesmo método empregado para calcular a compacidade relativa da areia. Dessa forma, considerando o volume do Becker = 1360,0 g, a massa solta de brita = 2045,8 g e massa compactada em mesa vibratória = 2269,6 g, obteve-se os seguintes valores para os parâmetros:

- Peso específico compactado (γ_{dcomp}) = 1,67 g/cm³ - 16,7 kN/m³
- Peso específico mínimo (γ_{dmin}) = 1,50 g/cm³ - 15,0 kN/m³
- Compacidade relativa (CR) = 23,45%

A compacidade relativa indica o quanto compactada está a amostra em relação à sua condição mais solta e mais densa. Um valor de 23,45% sugere que a brita se encontra em um estado relativamente solto, o que pode influenciar sua estabilidade mecânica e comportamento no uso prático.

4.3 Comentários gerais acerca dos parâmetros obtidos para as amostra

Com base nos ensaios realizados, foram determinadas as principais características da areia e da brita analisadas. A areia apresentou uma granulometria uniforme, com valores de D10, D30 e D60 iguais a 1,0 mm, resultando em um coeficiente de uniformidade (CNU) de 1,0 e um coeficiente de curvatura (CC) também de 1,0. Esses parâmetros indicam que a areia possui uma distribuição granulométrica homogênea, classificada como areia média. O peso específico real foi determinado como 2,82 g/cm³ (28,2 kN/m³). No ensaio de permeabilidade, obteve-se um coeficiente de permeabilidade $k = 1,031 \times 10^{-2}$ cm/s, indicando que o material permite uma passagem moderada de água. A compacidade relativa da areia foi de 27,27%, classificando-a como um material solto, com grande potencial de adensamento sob cargas externas.

Já a brita analisada foi classificada como Brita #2, com D10 = 8,82 mm, D30 = 11,53 mm e D60 = 14,86 mm. O coeficiente de uniformidade (CNU = 1,69) e o coeficiente de curvatura (CC = 1,01) indicam uma granulometria relativamente uniforme, com boa transição entre partículas menores e maiores. O peso específico real da brita foi determinado como 2,65 g/cm³ (26,5 kN/m³). O ensaio de permeabilidade resultou em $k = 3,88 \times 10^{-2}$ cm/s, confirmando que o material é altamente permeável, característica

esperada para agregados graúdos. A compacidade relativa da brita foi 23,45%, sugerindo que o material está em um estado relativamente solto, o que pode influenciar sua estabilidade mecânica.

Em resumo, os ensaios demonstraram que tanto a areia quanto a brita possuem granulometrias bem definidas e coerentes com suas classificações usuais. A areia, sendo um material solto, pode necessitar de compactação adequada para reduzir seu potencial de adensamento, enquanto a brita apresenta uma alta permeabilidade e um estado igualmente solto, o que pode influenciar sua estabilidade em determinadas aplicações estruturais e geotécnicas.

4.4 Ensaios de compressão realizados nos gabiões

4.4.1 Gabiões preenchidos com areia (*compacta e fofa*)

Como já apresentado, para a condução dos ensaios de compressão simples foram utilizados corpos de prova compostos por malha de gabião eletrossoldado com dimensões de 0,4 x 0,4 x 0,4m. Os gabiões foram preenchidos com areia sob duas condições distintas no intuito de verificar suas deformações:

- Com altura de queda de preenchimento de 40cm de forma que a areia se mantivesse fofa no interior do corpo de prova
- Com preenchimento e compactação por meio de vibração do corpo de prova de forma que a areia atingisse máximo valor de compacidade relativa.

As Tabelas seguintes demonstram os parâmetros dimensionais dos corpos de prova rompidos.

Tabela 8. Parâmetros dimensionais e volumétricos dos corpos de prova – Areia fofa

Corpo de prova	Volume (m ³)	Massa aferida	Peso específico
CP1	0,064	115,56 kg	18,05 kN/m ³
CP2	0,064	110,9 kg	17,32 kN/m ³
CP3	0,064	115,4 kg	18,03 kN/m ³

Fonte: Dados da Pesquisa

Tabela 9. Parâmetros dimensionais e volumétricos dos corpos de prova – Areia compacta

Corpo de prova	Volume (m ³)	Massa aferida	Peso específico
CP1	0,064	137,06	21,41
CP2	0,064	137,08	21,41
CP3	0,064	137,04	21,41

Fonte: Dados da Pesquisa

Tabela 10. Comparação entre as médias obtidas por meio do teste T de Student

Teste	$\gamma_{\text{fofa}} \text{ kN/m}^3$	$\gamma_{\text{compac}} \text{ kN/m}^3$	pobtido	P
$\gamma_{\text{fofa}} \times \gamma_{\text{compac}}$	17,8	21,41	0,006	<0,05

Fonte: Dados da Pesquisa

A análise dos corpos de prova revelou diferenças significativas entre os materiais avaliados, especialmente no que diz respeito ao peso específico antes e após a compactação. Os corpos de prova da primeira amostra apresentaram um volume constante de $0,064 \text{ m}^3$ e massas aferidas variando entre 110,9 kg e 115,56 kg, resultando em pesos específicos entre $17,32 \text{ kN/m}^3$ e $18,05 \text{ kN/m}^3$. A média obtida foi de $17,8 \text{ kN/m}^3$, com desvio padrão de $0,41 \text{ kN/m}^3$ e coeficiente de variação de 2,0%, indicando uma dispersão relativamente baixa dos dados e boa homogeneidade entre as amostras. O intervalo de confiança estimado revelou que o peso específico dos corpos de prova se situa entre $16,76 \text{ kN/m}^3$ e $18,83 \text{ kN/m}^3$, confirmando a consistência dos resultados.

Em contrapartida, a areia compactada apresentou um peso específico consideravelmente maior, atingindo valores constantes de $21,41 \text{ kN/m}^3$ para todos os corpos de prova. A massa aferida foi em torno de 137,06 kg, sem variação significativa entre as amostras, o que evidencia uma elevada uniformidade no processo de compactação e uma densidade mais elevada e homogênea do material. Esse comportamento reflete a redução dos vazios internos e o aumento da estabilidade do agregado, tornando-o mais resistente a cargas externas.

A comparação estatística entre as médias dos pesos específicos das amostras fofa e compactada, por meio do teste t de Student, demonstrou uma diferença estatisticamente significativa, com um p-valor de 0,006, inferior ao nível de significância adotado de 0,05. Esse resultado confirma que o aumento da densidade do material após a compactação não ocorreu por acaso, mas sim devido ao efeito direto da redução da porosidade e reacomodação das partículas.

O aumento do peso específico, de $17,8 \text{ kN/m}^3$ para $21,41 \text{ kN/m}^3$, representa um incremento de aproximadamente 20%, indicando que o processo de compactação é essencial para garantir a estabilidade e resistência do material. A areia compactada se destacou pela elevada densidade e uniformidade, sendo menos suscetível a deformações, o que a torna mais adequada para aplicações estruturais e geotécnicas.

A seguir é apresentada a curva carregamento versus deformação médios obtido durante a realização dos ensaios de compressão simples.

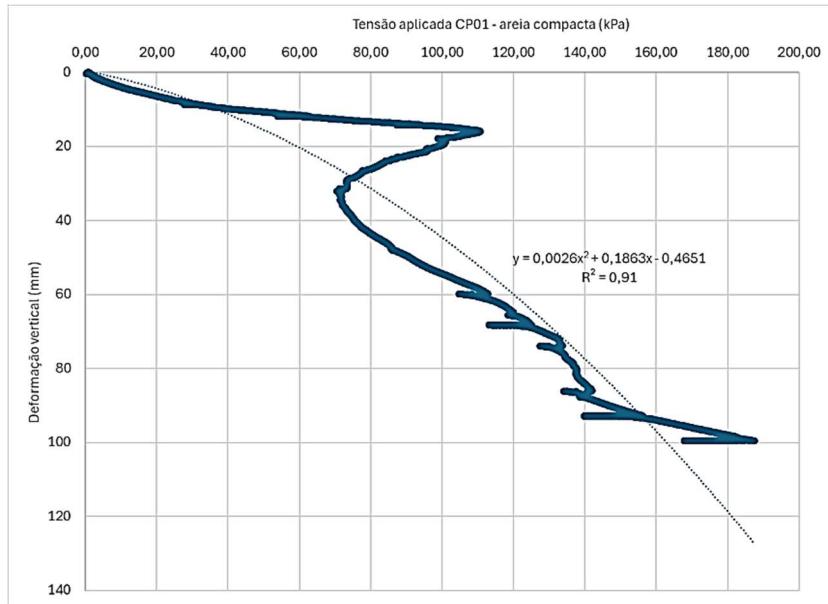


Figura 39. Curva carga versus deslocamento areia compacta CP01. Fonte: Dados da Pesquisa
A análise da curva tensão-deformação demonstrada na Figura 43 revelou diferentes fases no comportamento mecânico da estrutura sob carregamento progressivo. Inicialmente, para tensões de até 40 kPa, o comportamento é predominantemente elástico, com deformações proporcionais à tensão aplicada, sugerindo um confinamento eficiente do material granular dentro do gabião.

Entre 40 e 80 kPa, há um aumento acelerado da deformação, indicando um ajuste interno dos grãos da areia e uma redistribuição da carga. No intervalo de 80 a 140 kPa, a curva apresenta um comportamento não linear, evidenciando oscilações que podem estar relacionadas a deslocamentos internos da malha e à reorganização das partículas da areia. Acima de 140 kPa, observa-se um crescimento expressivo da deformação vertical, caracterizando um regime de instabilidade progressiva e possível perda da eficiência do confinamento.

Com base na equação da curva $y=0,0026x^2+0,1863x-0,4651$, foram calculados os módulos secante, tangente e de rigidez para uma tensão de 100 kPa. O módulo secante (E_s) foi determinado como 2,26 kPa/mm, representando a rigidez global do sistema e indicando que, apesar da resposta inicial rígida, há uma tendência de perda progressiva de rigidez à medida que a carga aumenta.

O módulo tangente (E_t) foi calculado como 0,706 kPa/mm, obtido a partir da derivada da equação tensão-deformação, refletindo a rigidez instantânea do sistema e evidenciando que a resistência do material diminui com o aumento da tensão aplicada.

O módulo de rigidez (G) foi determinado como 0,869 kPa/mm, indicando a resistência ao cisalhamento dentro da estrutura granular confinada.

Os resultados demonstram que o gabião apresenta um confinamento eficiente nas fases iniciais de carregamento, garantindo resistência estrutural até certo limite. No entanto, a redução dos módulos tangente e de rigidez sugere que, com o aumento da carga, a areia compactada perde estabilidade e passa a apresentar deformações mais expressivas. Esse comportamento indica que, para aplicações onde se exige maior resistência, pode ser necessário reforçar a malha do gabião ou ajustar o grau de compactação da areia para minimizar deslocamentos excessivos e garantir maior estabilidade à estrutura.

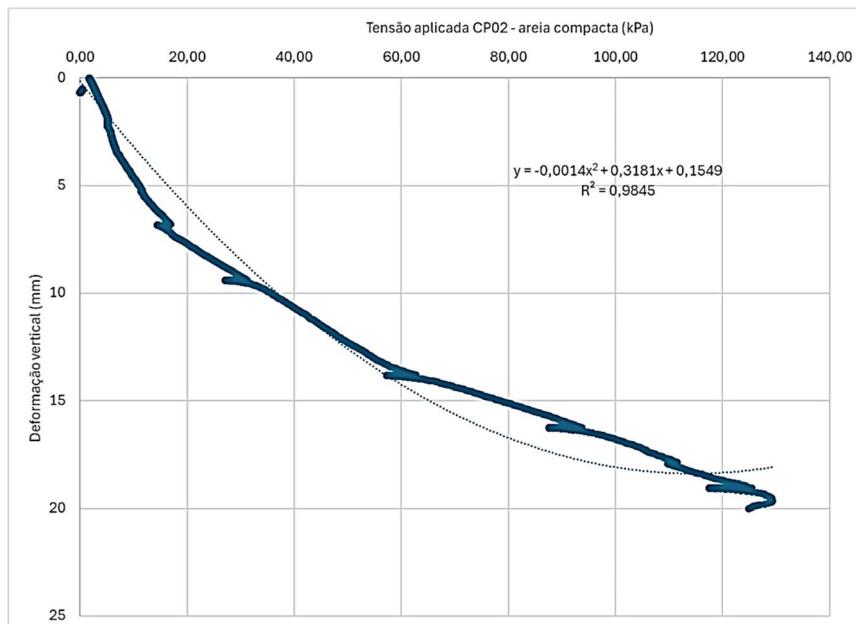


Figura 40. Curva carga versus deslocamento areia compacta CP02. Fonte: Dados da Pesquisa

A análise da curva tensão-deformação do corpo de prova CP02 apresentou um comportamento mecânico distinto em relação ao CP01, evidenciado por diferenças na deformação sob a aplicação de carga. A equação ajustada para CP02 foi determinada como $y=-0,0014x^2+0,3181x+0,1549$ com um coeficiente de determinação $R^2=0,98$ indicando um excelente ajuste ao modelo quadrático. Esse comportamento reflete uma resposta mecânica mais previsível e menos instável quando comparado ao CP01.

Inicialmente, para tensões de até 20 kPa, a deformação no CP02 ocorre de maneira mais rápida do que no CP01, sugerindo que o material tem menor rigidez inicial. No entanto, o comportamento segue um padrão quase linear, indicando um ajuste

estrutural eficiente dos grãos da areia compactada. Entre 20 e 80 kPa, observa-se estabilização da estrutura granular, com um crescimento mais controlado da deformação e sem oscilações significativas, o que sugere uma melhor uniformidade na compactação.

Na fase final, entre 80 e 120 kPa, a taxa de deformação continua aumentando, mas sem as variações abruptas observadas na curva do CP01, sugerindo uma resistência progressiva maior e uma estrutura menos suscetível a instabilidades.

Com base na equação da curva, foram calculados os módulos mecânicos para uma tensão de 100 kPa. O módulo secante (E_s) foi determinado como 5,57 kPa/mm, indicando que o CP02 apresenta uma maior resistência global à deformação em relação ao CP01, cujo módulo secante foi 2,26 kPa/mm. Esse valor reflete a maior estabilidade estrutural do CP02 sob cargas progressivas. O módulo tangente (E_t), que representa a rigidez instantânea do material, foi calculado como 0,0381 kPa/mm, valor inferior ao do CP01 ($E_t=0,706\text{kPa/mm}$), sugerindo que o CP02 sofre ajustes estruturais internos mais graduais, sem grandes picos de resistência. Já o módulo de rigidez (G), responsável por indicar a resistência ao cisalhamento dentro da estrutura granular confinada, foi calculado como 2,14 kPa/mm, sendo superior ao do CP01, que apresentou 0,869 kPa/mm. Esse resultado demonstra que o CP02 possui um melhor confinamento e menor tendência a deformações instáveis.

A comparação entre CP01 e CP02 indica que o CP02 apresenta maior resistência global e menor variabilidade na resposta mecânica. O maior módulo secante e módulo de rigidez do CP02 confirma que ele suporta melhor a tensão aplicada, garantindo um confinamento mais eficiente e reduzindo deslocamentos excessivos. Em contrapartida, o CP01 apresentou oscilações significativas na curva, sugerindo instabilidades estruturais e menor capacidade de resistência progressiva à deformação. Essa diferença entre os corpos de prova pode estar associada a um melhor controle da compactação no CP02, o que resultou em uma distribuição de carga mais uniforme e uma resposta mecânica mais estável. Dessa forma, conclui-se que a compactação do CP02 foi mais eficiente e proporcionou um melhor desempenho estrutural da areia confinada, tornando-o mais adequado para aplicações que exigem maior estabilidade sob cargas elevadas.

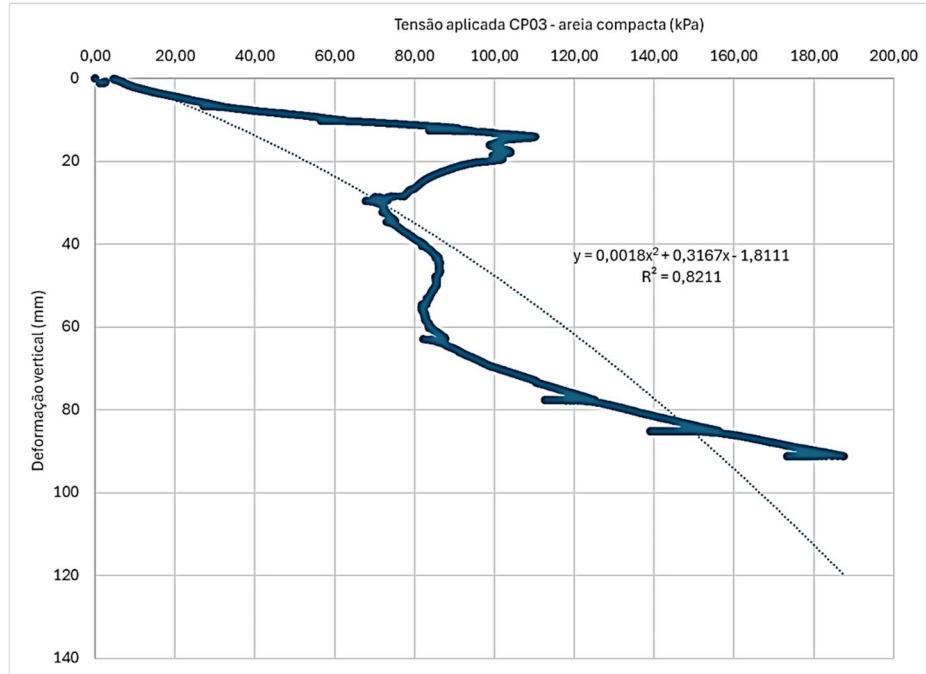


Figura 41. Curva carga versus deslocamento areia compacta CP03. Fonte: Dados da Pesquisa

A análise da curva tensão-deformação do corpo de prova CP03, composto por areia compactada, revelou diferenças significativas em relação ao CP02, indicando variações no comportamento mecânico sob carregamento progressivo. A equação ajustada para CP03 foi determinada como $y=0,0018x^2-0,3167x-1,8111$, com um coeficiente de determinação $R^2=0,82$ sugerindo um ajuste moderado ao modelo quadrático. Comparado ao CP02, que apresentou um coeficiente de $R^2=0,98$ percebe-se que o CP03 apresenta maior dispersão nos dados e instabilidades estruturais durante a aplicação da carga.

Nos primeiros 20 kPa, a deformação inicial do CP03 ocorre de maneira semelhante à do CP02, indicando um baixo módulo de rigidez inicial e um comportamento inicial quase linear. No entanto, à medida que a tensão aumenta para a faixa de 20 a 80 kPa, surgem oscilações bruscas na curva do CP03, ao contrário do CP02, que apresentou um comportamento mais uniforme. Essas oscilações podem ser resultado de deslocamentos internos da malha eletrosoldada, falhas na compactação ou redistribuições abruptas dos grãos de areia. A presença de recuos na deformação sugere possíveis reajustes internos na estrutura granular, enquanto no CP02 esse comportamento não foi observado. Na fase final, acima de 80 kPa, o CP03 continua apresentando instabilidades, com variações expressivas na taxa de deformação, o que difere da resposta

mais progressiva do CP02. Isso sugere que o CP03 entrou em colapso estrutural mais rapidamente, enquanto o CP02 manteve uma resposta mecânica mais estável.

Com base na equação da curva, foram calculados os módulos mecânicos para 100 kPa. O módulo secante (E_s) do CP03 foi calculado como 1,11 kPa/mm, valor significativamente menor que o do CP02, que apresentou 5,57 kPa/mm. Isso indica que o CP03 sofre deformação mais rapidamente e tem menor resistência ao carregamento progressivo. O módulo tangente (E_t), obtido a partir da derivada da equação tensão-deformação, foi 0,0433 kPa/mm, valor semelhante ao do CP02 ($E_t=0,0381\text{kPa/mm}$), o que sugere que, em uma análise instantânea, ambos apresentam rigidez semelhante sob tensão de 100 kPa. No entanto, a resposta global do CP02 é superior, pois suporta maiores cargas sem grandes variações na deformação. O módulo de rigidez (G), que representa a resistência ao cisalhamento, foi 0,427 kPa/mm para o CP03, enquanto para o CP02 foi 2,14 kPa/mm, indicando que o CP03 apresenta menor resistência ao cisalhamento e maior propensão à instabilidade estrutural.

A comparação entre CP02 e CP03 evidencia que o CP03 tem menor rigidez global, maior instabilidade estrutural e menor capacidade de sustentação de carga. O comportamento oscilatório da curva do CP03, com picos e quedas abruptas na deformação, sugere falhas na compactação ou redistribuições não homogêneas da areia dentro da malha do gabião, tornando-o menos eficiente em relação ao CP02. Já o CP02 apresentou uma resposta mecânica mais estável e progressiva, sustentando a carga de maneira mais uniforme e sem grandes oscilações. Essa diferença pode indicar que o CP02 passou por um processo de compactação mais eficiente, resultando em maior resistência estrutural e menor tendência ao colapso. Dessa forma, conclui-se que a compactação e o confinamento interno do CP03 podem necessitar de melhorias para aumentar sua estabilidade e reduzir deslocamentos abruptos, garantindo um melhor desempenho mecânico em aplicações que exigem resistência prolongada sob carregamento. A seguir é apresentada a curva carga versus deformação do corpo de prova preenchido com areia fofa:

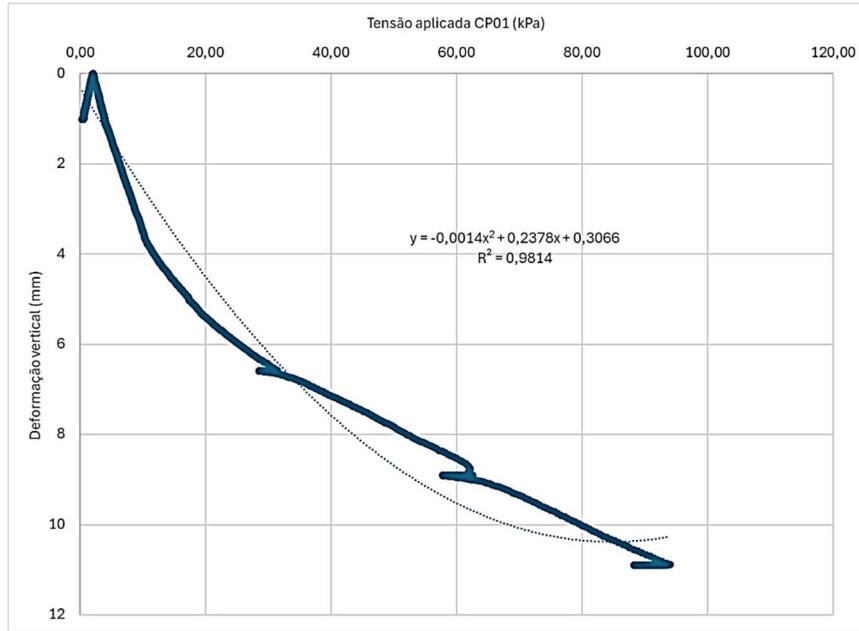


Figura 42. Curva carga versus deslocamento areia fofa CP01. Fonte: Dados da Pesquisa

A análise da curva tensão-deformação do corpo de prova CP01, preenchido com areia fofa, revelou um comportamento mecânico distinto em relação aos gabiões preenchidos com areia compactada. A equação ajustada da curva para CP01 apresentou um coeficiente de determinação $R^2=0,98$, indicando um excelente ajuste ao modelo quadrático e um comportamento contínuo da deformação sob carregamento progressivo. A resposta mecânica do CP01 difere dos gabiões compactados principalmente na fase inicial, onde há uma deformação rápida e expressiva, evidenciando uma baixa resistência inicial devido à maior quantidade de vazios e menor confinamento das partículas de areia.

Durante a aplicação das cargas, o CP01 apresentou uma transição suave e contínua na relação tensão-deformação, sem oscilações abruptas, ao contrário dos gabiões compactados que, em alguns casos, mostraram variações irregulares devido a redistribuições internas da carga e deslocamentos na malha eletrossoldada. O módulo secante ($E_s=9,91 \text{ kPa/mm}$) do CP01 foi superior ao dos gabiões compactados, como o CP02 ($E_s=5,57 \text{ kPa/mm}$) e CP03 ($E_s=1,11 \text{ kPa/mm}$), sugerindo que, apesar da maior deformação inicial, a relação tensão-deformação da areia fofa se manteve estável. No entanto, o módulo tangente ($E_t=-0,0422 \text{ kPa/mm}$) apresentou um valor negativo em altas tensões, indicando que a estrutura perdeu resistência progressivamente, entrando em instabilidade. Já o módulo de rigidez ($G=3,81 \text{ kPa/mm}$) do CP01 foi superior ao do CP03 ($G=0,427 \text{ kPa/mm}$) e do CP02 ($G=2,14 \text{ kPa/mm}$), indicando que, apesar de sofrer grandes deslocamentos, a areia fofa ainda mantém alguma resistência ao cisalhamento.

Comparando as cargas máximas aplicadas, o CP01 foi ensaiado até 100 kPa, enquanto os gabiões compactados atingiram 120 kPa (CP02) e 140 kPa (CP03). As deformações máximas atingidas também mostraram diferenças significativas, sendo 10,08 mm para CP01 (areia fofa), 17,96 mm para CP02 e 90 mm para CP03, evidenciando que a compactação da areia contribuiu para um melhor desempenho estrutural e maior capacidade de suportar cargas antes de entrar em colapso.

De forma geral, o CP01, preenchido com areia fofa, apresentou maior deformação inicial, menor resistência progressiva e tendência à instabilidade sob cargas elevadas, tornando-o menos eficiente em comparação aos gabiões compactados. Já os gabiões com areia compactada, apesar de apresentarem variações na curva tensão-deformação, demonstraram maior resistência ao carregamento e maior estabilidade estrutural, retardando o colapso e proporcionando um desempenho mais eficiente. Isso reforça a importância da compactação do material de preenchimento, garantindo maior rigidez, resistência ao cisalhamento e controle da deformação, fatores fundamentais para a aplicação de gabiões em obras que exigem maior durabilidade e capacidade de suporte de cargas elevadas.

A seguir, uma tabela comparativa apresenta os valores dos módulos secante, tangente e de rigidez, além das cargas máximas aplicadas e das deformações máximas atingidas para cada corpo de prova. Se precisar visualizar os dados, posso tentar gerá-los novamente em um formato acessível.

Tabela 11. Parâmetros obtidos a partir das curvas determinadas

Corpo de prova	Módulo secante (Es) kPa/mm	Módulo Tangente (Et) kPa/mm	Módulo de Rigidez (G) kPa/mm
CP1 areia fofa	9,91	-0,042	3,81
CP1 areia compacta	7,85	0,0512	2,95
CP2 areia compacta	5,57	0,0381	2,14
CP3 areia compacta	1,11	0,0433	0,427

Fonte: Dados da Pesquisa

Tabela 12. Parâmetros obtidos a partir das curvas determinadas

Corpo de prova	Régressão	R ²	Tensão Máxima atingida (kPa)	Deformação máxima atingida (mm)
CP1 areia fofa	y=-0,0014x ² +0,2378x+0,3066	0,9814	95	10,26
CP1 areia	y=0,0026x ² +0,1863x-0,4651	0,91	190	128,8

compacta				
CP2 areia compacta	$y=-0,0014x^2+0,3181x+0,1549$	0,8211	130	17,85
CP3 areia compacta	$y=0,0018x^2+0,3167x-1,8111$	0,9814	195	128,4

Fonte: Dados da Pesquisa

Tabela 13. Análise estatística tensão máxima atingida para gabião com areia compacta

Parâmetro	kPa
Média	171,6
Intervalo superior média	261,5
Intervalo inferior média	81,8
Mediana	190,0
Desvio padrão	36,17
Coeficiente de variação	21,0%
Valor máximo	195,0
Valor mínimo	130,0

Fonte: Dados da Pesquisa

Com base nos dados apresentados nas Tabelas 11, 12 e 13, é possível observar uma relação direta entre os parâmetros mecânicos dos corpos de prova e sua compactação. A Tabela 11 mostra que o módulo secante (E_s) é maior na areia fofa (9,91 kPa/mm), reduzindo-se conforme a compactação aumenta, atingindo o menor valor no CP3 areia compacta (1,11 kPa/mm). Esse comportamento indica que a areia fofa apresenta maior rigidez global sob carregamento inicial, enquanto a areia compacta, devido à sua maior densidade, responde de forma diferente às tensões aplicadas. O módulo tangente (E_t) apresenta uma variação positiva nos corpos compactados, com valores entre 0,0381 e 0,0512 kPa/mm, enquanto na areia fofa ele é negativo (-0,042 kPa/mm), o que pode indicar instabilidade inicial ou um comportamento mais deformável nesse tipo de material. O módulo de rigidez (G) segue a mesma tendência, sendo maior na areia fofa (3,81 kPa/mm) e reduzindo-se significativamente no CP3 areia compacta (0,427 kPa/mm), sugerindo que a compactação influencia diretamente a resistência ao cisalhamento.

Os dados da Tabela 12 reforçam essa tendência, evidenciando diferenças significativas na tensão máxima atingida pelos corpos de prova. A areia fofa atingiu apenas 95 kPa, enquanto os corpos compactados apresentaram valores muito superiores, com destaque para o CP3 areia compacta, que atingiu a maior tensão máxima (195 kPa). Além disso, a deformação máxima também variou de forma significativa, com CP1 areia compacta apresentando a maior deformação (128,8 mm), enquanto CP1 areia fofa atingiu apenas 10,26 mm. Essa diferença sugere que a compactação da areia influencia não apenas a resistência, mas também o comportamento deformacional, tornando o material

mais resistente e menos suscetível a colapsos repentinos. Os coeficientes de regressão (R^2) indicam um bom ajuste das equações aos dados experimentais, com valores acima de 0,81 em todos os casos, sendo CP1 areia fofa e CP3 areia compacta os que apresentaram melhor ajuste ($R^2=0,98$).

Por fim, a Tabela 13 fornece uma análise estatística dos valores de tensão máxima atingida para gabiões com areia compacta. A média registrada foi de 171,6 kPa, com um intervalo de variação entre 81,8 kPa (limite inferior) e 261,5 kPa (limite superior). A mediana de 190 kPa indica que a maior parte dos valores se concentra próximo a esse valor, o que está alinhado com os resultados obtidos nos corpos de prova CP1 e CP3 areia compacta. O desvio padrão de 36,17 kPa e o coeficiente de variação de 21,0% mostram uma dispersão moderada dos dados, reforçando que há variações na resistência dependendo das condições específicas da compactação. O valor máximo registrado (195 kPa) coincide com a maior tensão obtida no CP3 areia compacta, enquanto o valor mínimo (130 kPa) corresponde à menor tensão entre os corpos compactados (CP2 areia compacta).

De forma geral, a análise dos dados revela que a compactação da areia tem um impacto significativo na resistência mecânica dos materiais, aumentando a tensão máxima suportada e alterando a deformabilidade dos corpos de prova. Os resultados são coerentes entre as tabelas, demonstrando uma relação clara entre a rigidez, os parâmetros de resistência e a variação da tensão máxima atingida nos ensaios. A seguir são apresentadas as curvas tensão versus deformação horizontal obtidas para os corpos de prova preenchidos com areia compacta e fofa.

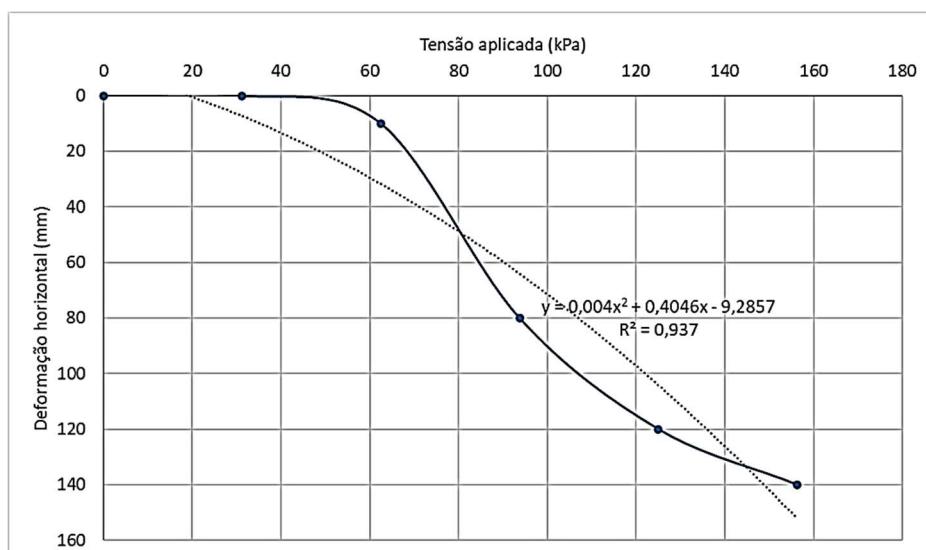


Figura 43. Curva carga versus deslocamento areia compacta CP01. Fonte: Dados da Pesquisa

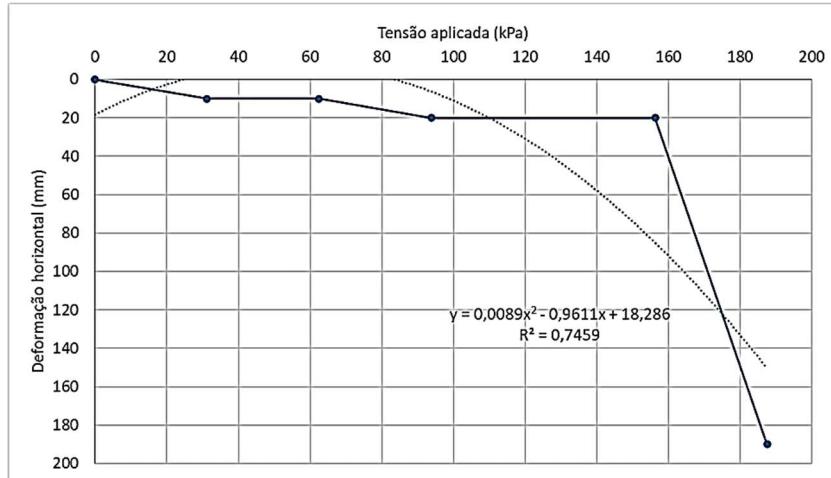


Figura 44. Curva carga versus deslocamento areia compacta CP02. Fonte: Dados da Pesquisa

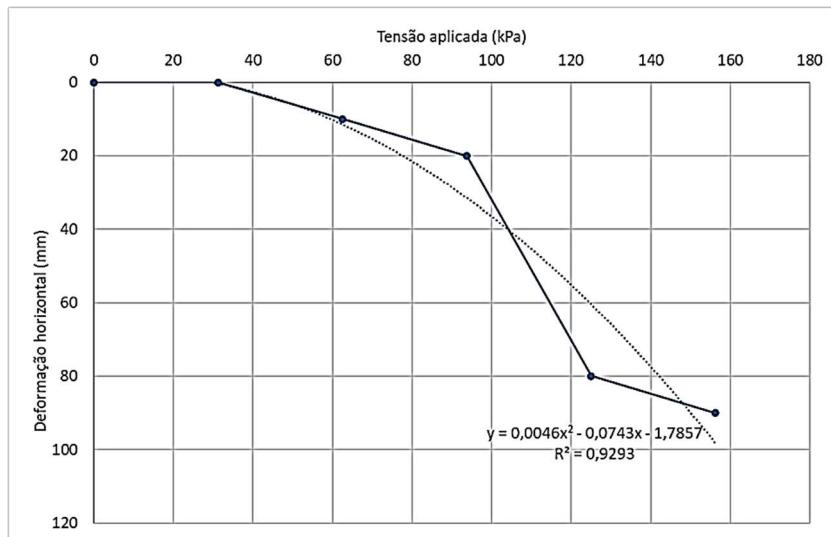


Figura 45. Curva versus deslocamento areia compacta CP 03. Fonte: Dados da Pesquisa

A análise das curvas tensão x deformação horizontal dos três corpos de prova de gabiões preenchidos com areia compactada permite entender o comportamento estrutural dessas unidades quando submetidas à compressão simples. Os gráficos mostram a evolução das deformações horizontais em função da tensão aplicada, enquanto os cálculos dos módulos secante, de rigidez e tangencial ajudam a quantificar essa resposta mecânica.

O CP1 apresentou um comportamento progressivo, com uma fase inicial de deformação moderada até aproximadamente 60 kPa, quando a deformação começou a aumentar significativamente. A tensão máxima atingida foi 156 kPa, com uma deformação correspondente de 140 mm. O coeficiente de determinação da regressão foi 0,937, indicando um excelente ajuste da curva aos dados experimentais. O módulo secante calculado foi de 1,11 kN/m, demonstrando uma resistência razoável à deformação inicial. O módulo de rigidez e o módulo tangencial foram ambos de 1,65 kN/m, sugerindo

uma perda gradual de rigidez ao longo da aplicação da carga. Esse corpo de prova apresentou um desempenho intermediário, combinando uma boa capacidade de resistência com uma deformação relativamente elevada.

Já o CP2 foi o corpo de prova que atingiu a maior tensão antes do colapso, chegando a 188 kPa, mas apresentou a maior deformação, atingindo 190 mm. Esse comportamento indica uma estrutura mais deformável, possivelmente devido a uma compactação menos eficiente da areia dentro do gabião. O coeficiente de determinação da regressão foi 0,7459, sugerindo que a curva pode ter sido influenciada por variações experimentais, tornando seu comportamento menos previsível. O módulo secante foi o menor entre os três corpos de prova, com 0,98 kN/m, indicando maior propensão à deformação sob carga. Em contrapartida, o módulo de rigidez e o módulo tangencial foram os mais elevados, atingindo 2,39 kN/m, sugerindo que a estrutura ainda apresentava alguma resistência mesmo após grandes deformações. Esse resultado indica que o CP2 suportou mais carga, mas com um grande comprometimento estrutural devido à alta deformação, tornando-o o mais flexível entre os três corpos de prova.

O CP3, por sua vez, apresentou um comportamento diferenciado. Embora tenha atingido a mesma tensão máxima do CP1 (156 kPa), sua deformação máxima foi significativamente menor, com 90 mm. Isso indica que esse corpo de prova teve a melhor capacidade de resistência à deformação entre os três, possivelmente devido a uma maior compactação da areia ou a um melhor confinamento dentro do gabião. O coeficiente de determinação da regressão foi 0,9293, demonstrando um bom ajuste aos dados experimentais. O módulo secante foi o maior entre os três corpos de prova, atingindo 1,73 kN/m, o que reflete uma maior resistência à deformação. Já o módulo de rigidez e o módulo tangencial foram de 1,36 kN/m, sugerindo que a estrutura manteve uma rigidez razoável ao longo do carregamento. O CP3 apresentou o menor nível de deformação, indicando uma estrutura mais rígida e resistente à compressão horizontal.

Comparando os três corpos de prova, observa-se que o CP1 teve um desempenho intermediário, apresentando uma deformação razoável e uma boa capacidade de resistência. O CP2 foi o mais flexível, atingindo a maior tensão, mas também a maior deformação, o que pode indicar menor compactação da areia ou menor confinamento dentro do gabião. O CP3 foi o mais rígido, suportando a mesma tensão máxima que o CP1, mas com a menor deformação, tornando-o estruturalmente mais estável. Essa análise reforça a importância do controle da compactação e do

confinamento na estabilidade dos gabiões, pois pequenas variações podem impactar significativamente seu comportamento mecânico sob compressão.

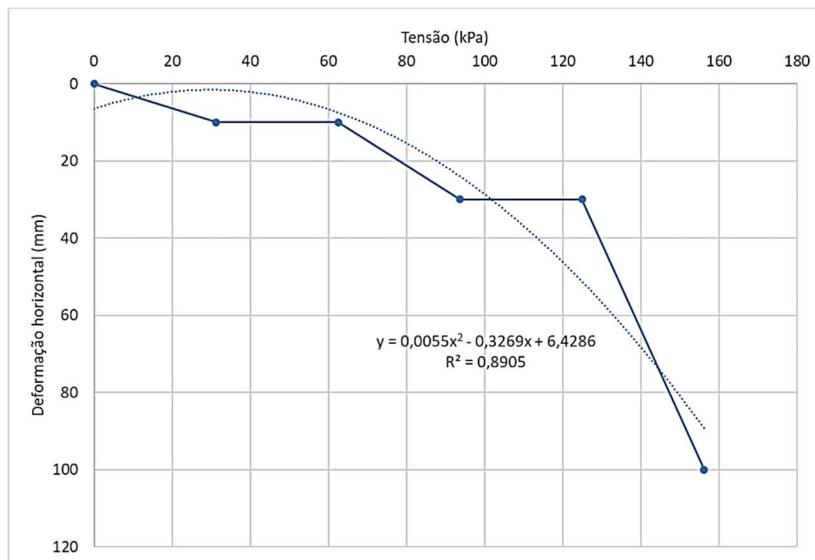


Figura 46. Curva carga versus deslocamento areia fofa CP01. Fonte: Dados da Pesquisa

A análise da curva extraída do ensaio de compressão do gabião preenchido com areia fofa revela um comportamento não linear, evidenciado pela relação entre tensão e deformação horizontal. A equação ajustada à curva experimental é um polinômio de segundo grau, indicando uma variação progressiva da rigidez estrutural ao longo do carregamento. O módulo secante (E_s), que representa a rigidez global do material ao longo da faixa de tensões aplicada, foi estimado em 0,279 kPa/mm, obtido a partir da inclinação da reta que liga o primeiro ao último ponto da curva. O módulo tangente (E_t), que descreve a rigidez instantânea do gabião para pequenos incrementos de carga e é calculado a partir da derivada da equação ajustada em um ponto intermediário, apresentou um valor de -0,190 kPa/mm, indicando uma tendência de redução progressiva da rigidez ao longo do ensaio. De forma semelhante, o módulo de rigidez (G), determinado no mesmo ponto intermediário da curva, apresentou o mesmo valor de -0,190 kPa/mm, reforçando a interpretação de que o gabião experimenta uma diminuição da sua capacidade resistente à medida que a carga se intensifica.

O comportamento observado sugere que, após um determinado nível de tensão, a estrutura do gabião pode entrar em um estágio de instabilidade, resultando em deformações aceleradas e perda de resistência efetiva.

Tabela 14. Parâmetros obtidos a partir das curvas determinadas

Corpo de prova	Módulo secante (Es) kPa/mm	Módulo Tangente (Et) kPa/mm	Módulo de Rigidez (G) kPa/mm
CP1 areia fofa	0,279	-0,190	-0,190
CP1 areia compacta	1,11	1,65	1,65
CP2 areia compacta	0,98	2,38	2,38
CP3 areia compacta	1,73	1,36	1,36

Fonte: Dados da Pesquisa

Tabela 15. Parâmetros obtidos a partir das curvas determinadas

Corpo de prova	Regressão	R ²	Tensão Máxima atingida (kPa)	Deformação máxima atingida (mm)
CP1 areia fofa	y=0,0055x ² -0,3269x+6,4286	0,89	158	100
CP1 areia compacta	y=0,004x ² +0,4046x-9,2857	0,937	156	140
CP2 areia compacta	y=0,0089x ² -0,9611x+18,286	0,7459	188	190
CP3 areia compacta	y=0,0046x ² -0,0743x-1,7857	0,9293	156	90

Fonte: Dados da Pesquisa

Tabela 16. Análise estatística tensão máxima atingida para gabião com areia compacta

Parâmetro	kPa
Média	164,50
Intervalo superior média	189,47
Intervalo inferior média	139,52
Mediana	157,00
Desvio padrão	15,69
Coeficiente de variação	9,53%
Valor máximo	188,00
Valor mínimo	156,00

Fonte: Dados da Pesquisa

Tabela 17. Análise estatística deformação máxima atingida para gabião com areia compacta

Parâmetro	mm
Média	130,00
Intervalo superior média	202,33
Intervalo inferior média	57,66
Mediana	120,00
Desvio padrão	45,46
Coeficiente de variação	35%
Valor máximo	190,00
Valor mínimo	90,00

Fonte: Dados da Pesquisa

A comparação entre os corpos de prova de areia fofa e areia compacta revela diferenças significativas nos parâmetros mecânicos, evidenciando a influência do estado de compactação na rigidez e na resposta estrutural do material sob compressão.

O corpo de prova CP1 de areia fofa apresentou os menores valores para todos os módulos avaliados, com um módulo secante (E_s) de 0,279 kPa/mm, módulo tangente (E_t) de -0,190 kPa/mm e módulo de rigidez (G) de -0,190 kPa/mm. O valor negativo dos módulos tangente e de rigidez indica uma perda significativa de resistência ao longo do carregamento, sugerindo um comportamento instável e uma tendência ao colapso estrutural.

Já os corpos de prova de areia compacta apresentaram valores de módulo significativamente superior, confirmando que o aumento da compactação melhora a rigidez e a capacidade de suporte do material. O CP1 de areia compacta obteve um módulo secante de 1,11 kPa/mm, cerca de quatro vezes maior que o da areia fofa, com um módulo tangente de 1,65 kPa/mm e módulo de rigidez de 1,65 kPa/mm, ambos positivos, indicando uma resposta mais estável à compressão. O CP2 de areia compacta apresentou um módulo secante de 0,98 kPa/mm, levemente inferior ao CP1, mas com valores de módulo tangente e de rigidez de 2,38 kPa/mm, os mais elevados entre os ensaios, demonstrando uma rigidez instantânea ainda maior ao longo do carregamento. O CP3 de areia compacta se destacou pelo maior módulo secante (1,73 kPa/mm), indicando maior resistência global, mas com módulo tangente e de rigidez inferiores aos do CP2 (1,36 kPa/mm).

Os resultados demonstram que a compactação da areia aumenta significativamente a rigidez e a capacidade de suporte do material, reduzindo a tendência ao colapso observada na areia fofa. Enquanto a areia fofa atingiu rapidamente sua tensão máxima com uma deformação relativamente menor (100 mm), os corpos de prova de areia compacta apresentaram maior resistência e capacidade de acomodação da carga, principalmente o CP2, que combinou alta tensão máxima (188 kPa) com a maior deformação registrada (190 mm).

Além disso, os valores dos módulos mecânicos reforçam que a compactação melhora não apenas a resistência global do material, mas também sua estabilidade ao longo do carregamento. A areia fofa apresentou um comportamento mais instável, com módulos tangente e de rigidez negativos, enquanto a areia compacta apresentou módulos positivos e significativamente mais elevados, indicando maior resistência à deformação horizontal. A análise dos coeficientes de determinação (R^2) sugere que os modelos

ajustados explicam bem os comportamentos observados, sendo que o CP2 de areia compacta apresentou maior dispersão nos dados.

Esses resultados reforçam a importância da compactação no desempenho de gabiões preenchidos com areia, demonstrando que a areia compacta apresenta vantagens claras em termos de resistência, rigidez e estabilidade estrutural, tornando-se a opção mais adequada para aplicações que exigem maior durabilidade e suporte de carga.

4.4.2 Gabiões preenchidos com brita

Tal como para os ensaios em areia, para a condução dos ensaios de compressão simples foram utilizados corpos de prova compostos por malha de gabião eletrossoldado com dimensões de 0,4 x 0,4 x 0,4m. Os gabiões foram preenchidos com brita, sendo seu preenchimento executado com compactação por meio de vibração do corpo de prova de forma que este atingisse máximo valor de compacidade relativa. As Tabelas seguintes demonstram os parâmetros dimensionais dos corpos de prova rompidos.

Tabela 18. Parâmetros dimensionais e volumétricos dos corpos de prova

Corpo de prova	Volume (m ³)	Massa aferida	Peso específico
CP1	0,064	135,86 kg	21,22 kN/m ³
CP2	0,064	135,96 kg	21,24 kN/m ³
CP3	0,064	135,90 kg	21,23 kN/m ³

Fonte: Dados da Pesquisa

As Figuras seguintes apresentam as curvas cargas versus deformação vertical obtidas durante os ensaios de compressão conduzidos.

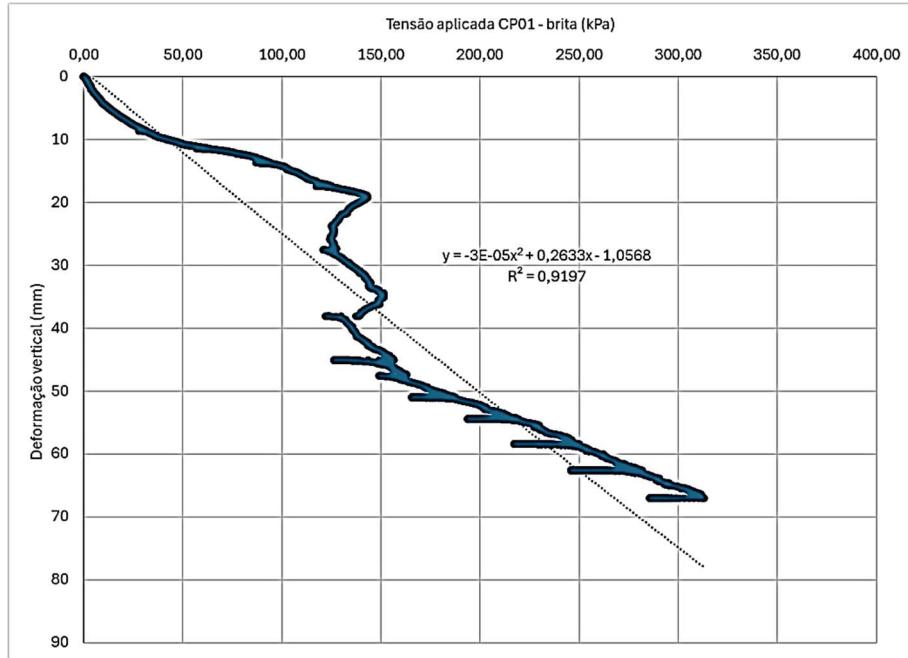


Figura 47. Curva carga versus deslocamento brita CP01. *Fonte: Dados da Pesquisa*

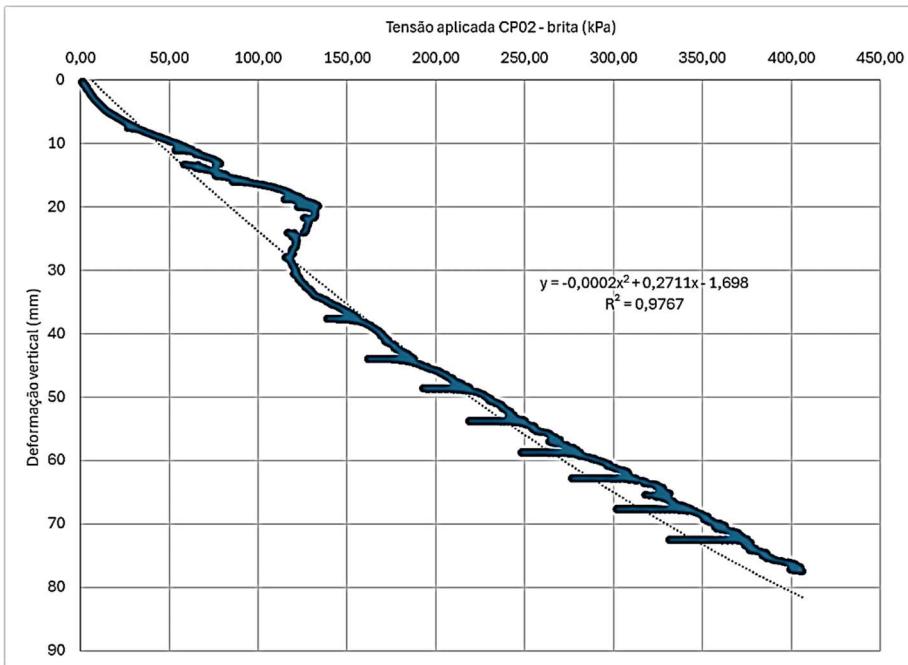


Figura 48. Curva carga versus deslocamento brita CP02. *Fonte: Dados da Pesquisa*

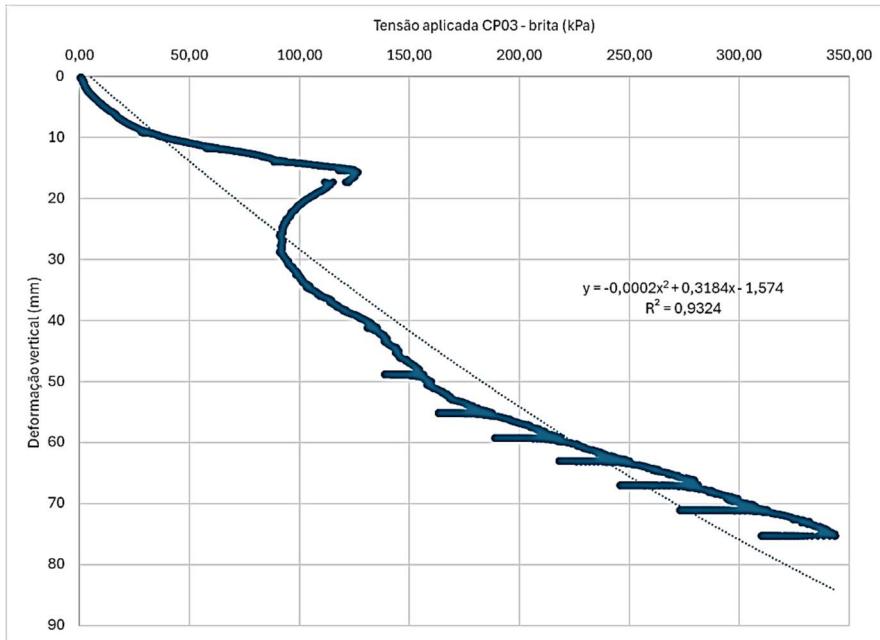


Figura 49. Curva carga versus deslocamento brita CP03. Fonte: Dados da Pesquisa

A análise comparativa entre os três corpos de prova (CP01, CP02 e CP03) de gabiões preenchidos com brita 2, submetidos a ensaios de compressão, evidencia diferenças significativas na rigidez e no comportamento mecânico sob carregamento. Os valores dos módulos secante, tangente e de rigidez foram extraídos a partir das equações de regressão ajustadas a cada curva tensão-deformação.

O CP01 apresentou um módulo secante (E_s) de 0,2573 kPa/mm, um módulo tangente (E_t) de 0,2513 kPa/mm e um módulo de rigidez (G) de 0,2513 kPa/mm. Esse comportamento sugere uma resposta relativamente estável ao carregamento, com uma boa rigidez inicial, mas sem ser o mais resistente entre os três corpos de prova.

O CP02, por sua vez, apresentou os menores valores entre os três ensaios, com um módulo secante (E_s) de 0,2311 kPa/mm, módulo tangente (E_t) de 0,1911 kPa/mm e módulo de rigidez (G) de 0,1911 kPa/mm. Esses valores indicam uma menor resistência ao carregamento e um comportamento mais deformável em relação aos demais corpos de prova, o que pode ser atribuído a um menor grau de compactação da brita ou a diferenças nas condições de confinamento.

Já o CP03 apresentou os maiores valores de módulo secante e um desempenho intermediário para os módulos tangente e de rigidez. Seu módulo secante (E_s) foi de 0,2784 kPa/mm, enquanto o módulo tangente (E_t) foi de 0,2384 kPa/mm e o módulo de rigidez (G) também de 0,2384 kPa/mm. Esses resultados indicam uma maior rigidez

global do sistema, o que pode estar relacionado a um melhor arranjo da brita dentro do gabião ou uma maior densidade relativa do material.

Comparando os três ensaios, nota-se que CP03 apresentou o melhor desempenho geral em termos de rigidez e resistência à deformação, seguido por CP01, enquanto CP02 apresentou a menor resistência, sendo o mais suscetível a deformações sob carga. Esses resultados demonstram a importância do controle de compactação e da distribuição da brita dentro do gabião para garantir um melhor desempenho mecânico. O coeficiente de determinação (R^2) de todos os modelos foi elevado, indicando um bom ajuste das equações às curvas experimentais. As tabelas a seguir apresentam os valores obtidos.

Tabela 19. Parâmetros obtidos a partir das curvas determinadas

Corpo de prova	Módulo secante (Es) kPa/mm	Módulo Tangente (Et) kPa/mm	Módulo de Rigidez (G) kPa/mm
CP1 brita 2	0,2573	0,2513	0,2513
CP2 brita 2	0,2311	0,1911	0,1911
CP3 brita 2	0,2784	0,2384	0,2384

Fonte: Dados da Pesquisa

Tabela 20. Parâmetros obtidos a partir das curvas determinadas

Corpo de prova	Regressão	R^2	Tensão Máxima atingida (kPa)	Deformação máxima atingida (mm)
CP1 brita 2	$y = -3 \times 10^{-5}x^2 + 0,2633x - 1,0568$	0,91	310	77,68
CP2 brita 2	$y = -0,0002x^2 + 0,2711x - 1,698$	0,97	400	74,74
CP3 brita 2	$y = -0,0002x^2 + 0,3184x - 1,574$	0,93	345	84,47

Fonte: Dados da Pesquisa

Tabela 21. Análise estatística tensão máxima atingida para gabião com brita 2

Parâmetro	kPa
Média	351,70
Intervalo superior média	464,36
Intervalo inferior média	238,96
Mediana	345,00
Desvio padrão	45,36
Coeficiente de variação	12,9%
Valor máximo	400,00
Valor mínimo	310,00

Fonte: Dados da Pesquisa

Tabela 22. Análise estatística deformação vertical máxima atingida para gabião com brita 2

Parâmetro	mm
Média	78,69
Intervalo superior média	91,36
Intervalo inferior média	66,56
Mediana	77,68
Desvio padrão	4,99
Coeficiente de variação	6,34%
Valor máximo	84,47
Valor mínimo	74,74

A análise estatística das tensões máximas e deformações verticais máximas apresentadas nas tabelas 21 e 22 revela características importantes do comportamento mecânico desse sistema estrutural.

A média das tensões máximas atingidas foi de 351,70 kPa, com um intervalo de confiança entre 238,96 kPa e 464,36 kPa, indicando uma variação ampla nos valores obtidos. O valor máximo registrado foi de 400 kPa, enquanto o mínimo foi de 310 kPa, sugerindo que algumas amostras apresentaram menor resistência, possivelmente devido a diferenças na compactação ou no arranjo interno da brita. A mediana de 345 kPa demonstra que a distribuição dos valores está próxima da média, sem grandes assimetrias. O desvio padrão de 45,36 kPa e o coeficiente de variação de 12,9% indicam que houve uma variabilidade significativa entre os ensaios, mas dentro de uma faixa razoável para materiais granulares confinados.

Comparando esses resultados com os ensaios individuais, verifica-se que o CP02 apresentou a maior tensão máxima (405 kPa), seguido pelo CP03 (345 kPa) e CP01 (310 kPa). Todos os valores estão dentro do intervalo esperado, confirmando que, apesar da variação, os gabiões preenchidos com brita 2 oferecem resistência adequada à compressão. O fato de a média estar próxima da mediana reforça que os dados seguem uma distribuição equilibrada, sem grandes discrepâncias.

A análise da deformação vertical máxima mostra um comportamento mais uniforme entre os ensaios. A média da deformação máxima foi de 78,69 mm, com um intervalo de confiança entre 66,56 mm e 91,36 mm. O valor máximo registrado foi de 84,47 mm, enquanto o mínimo foi de 74,74 mm, indicando menor dispersão em comparação com a tensão máxima. A mediana de 77,68 mm está muito próxima da média, sugerindo que a distribuição dos valores é bem centralizada. O desvio padrão de 4,99 mm e o coeficiente de variação de 6,34% evidenciam que a variação da deformação entre os ensaios foi baixa, indicando um comportamento previsível e mais controlado.

Comparando com os valores individuais, o CP03 apresentou a maior deformação (84,47 mm), seguido pelo CP01 (77,68 mm) e pelo CP02 (74,74 mm). Todos os valores estão dentro da faixa esperada, reforçando a consistência dos resultados experimentais. A menor dispersão nas deformações sugere que, embora haja variação na resistência máxima, a resposta do gabião em termos de acomodação de carga é mais previsível.

Os resultados indicam que, apesar da variabilidade nas tensões máximas atingidas, o comportamento da deformação foi mais homogêneo. A maior dispersão na resistência pode estar associada a diferenças no empacotamento da brita dentro do gabião, na compactação ou no efeito de confinamento lateral, enquanto a menor variação na deformação indica que o comportamento do sistema sob carga segue um padrão bem definido. Assim, conclui-se que o gabião preenchido com brita 2 apresenta boa capacidade de resistência e acomodação de cargas, sendo uma solução viável para aplicações estruturais. No entanto, a variação na resistência máxima sugere a necessidade de controle na compactação e distribuição do material para garantir um desempenho mais uniforme e previsível. As figuras seguintes demonstram as curvas tensão versus deformação horizontal obtidas para os corpos de prova.

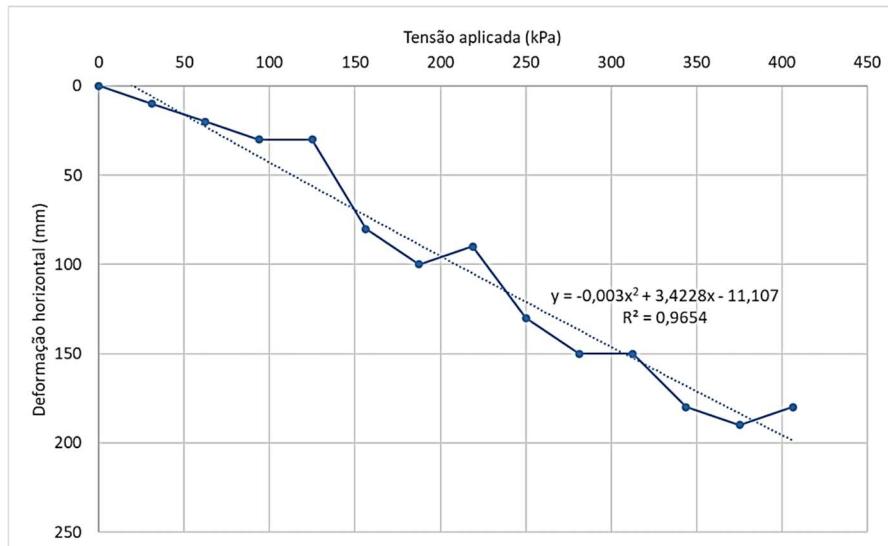


Figura 50. Curva carga versus deslocamento brita 2 CP01. Fonte: Dados da Pesquisa

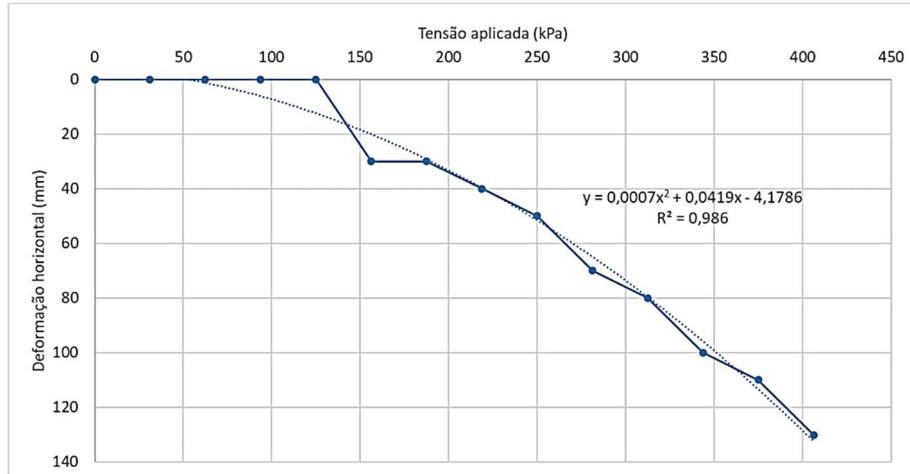


Figura 51. Curva carga versus deslocamento brita 2 CP02. Fonte: Dados da Pesquisa

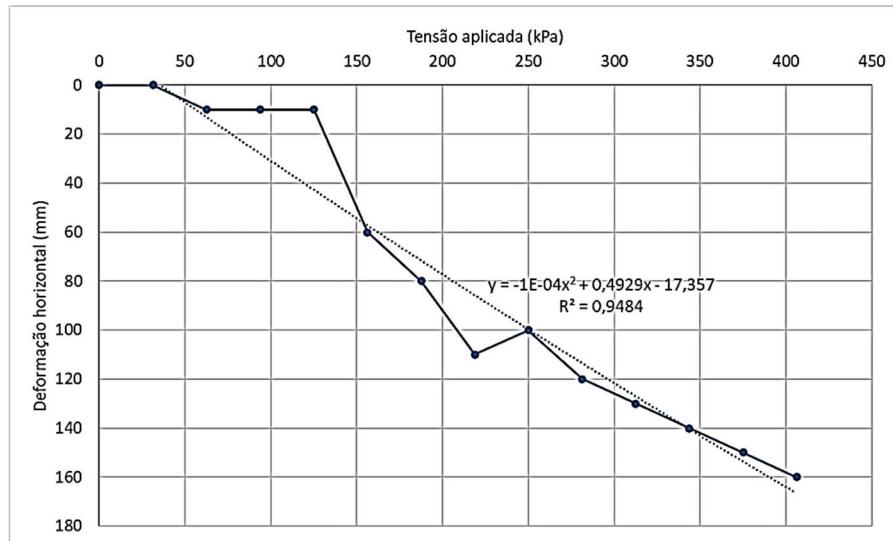


Figura 52. Curva carga versus deslocamento brita 2 CP03. Fonte: Dados da Pesquisa

A análise comparativa das curvas tensão-deformação horizontal dos ensaios de compressão realizados em gabiões preenchidos com brita 2 revela diferenças significativas no comportamento mecânico de cada corpo de prova. Os valores dos módulos secante, tangente e de rigidez foram extraídos das equações de regressão ajustadas, permitindo uma avaliação detalhada da resposta estrutural do sistema sob carga.

O CP01 apresentou o maior módulo secante ($E_s=3.272 \text{ kPa/mm}$), indicando uma resistência superior à deformação horizontal. Além disso, o módulo tangente ($E_t=3.122 \text{ kPa/mm}$) e o módulo de rigidez ($G=3.122 \text{ kPa/mm}$) reforçam que este corpo de prova teve a melhor estabilidade estrutural sob compressão. Esse desempenho pode estar relacionado a um melhor empacotamento da brita dentro do gabião ou a uma distribuição mais eficiente das tensões, reduzindo a tendência à deformação.

O CP02, por outro lado, apresentou os menores valores de rigidez e resistência à deformação, com um módulo secante de 0.077 kPa/mm, além de um módulo tangente e um módulo de rigidez de 0.112 kPa/mm. Esses valores sugerem um comportamento significativamente mais deformável em comparação aos outros corpos de prova, possivelmente devido a uma menor compactação da brita ou a um menor confinamento lateral do gabião. Esse comportamento pode indicar uma maior fragilidade da estrutura sob tensões horizontais elevadas.

Já o CP03 apresentou um comportamento intermediário, com um módulo secante de 0.473 kPa/mm, um módulo tangente de 0.453 kPa/mm e um módulo de rigidez também de 0.453 kPa/mm. Embora tenha mostrado uma resistência superior à do CP02, seus valores ainda estão bem abaixo dos do CP01, indicando que este corpo de prova é mais suscetível à deformação sob carga do que o CP01, mas mais resistente do que o CP02.

Comparando os três ensaios, verifica-se que CP01 apresentou a melhor resposta estrutural, sendo o mais rígido e resistente à deformação horizontal, seguido por CP03, que apresentou um desempenho intermediário, e por CP02, que teve o pior desempenho em termos de rigidez e resistência. Os coeficientes de determinação (R^2) das equações ajustadas indicam que todas as curvas possuem um bom ajuste aos dados experimentais, validando a análise.

Dessa forma, conclui-se que o comportamento do gabião preenchido com brita 2 é dependente da compactação e do arranjo interno dos agregados. Uma melhor distribuição da brita dentro da estrutura pode aumentar significativamente sua resistência e reduzir a deformação sob carregamento. Assim, para aplicações estruturais que exijam maior estabilidade e menor deformabilidade, recomenda-se um controle rigoroso do processo de compactação e confinamento da brita para garantir um desempenho mais eficiente e previsível do gabião. A seguir são apresentados os parâmetros obtidos a partir das curvas.

Tabela 23. Parâmetros obtidos a partir das curvas determinadas

Corpo de prova	Módulo secante (Es) kPa/mm	Módulo Tangente (Et) kPa/mm	Módulo de Rigidez (G) kPa/mm
CP1 brita 2	3.272	3.122	3.122
CP2 brita 2	0.077	0.112	0.112
CP3 brita 2	0.473	0.453	0.453

Fonte: Dados da Pesquisa

Tabela 24. Parâmetros obtidos a partir das curvas determinadas

Corpo de prova	Regressão	R ²	Tensão Máxima atingida (kPa)	Deformação máxima atingida (mm)
CP1 brita 2	y=-0,003x ² +3,4228x-11,107	0,96	405	200
CP2 brita 2	y=0,0007x ² +0,0419x-4,1786	0,98	408	130
CP3 brita 2	y=-1×10 ⁻⁴ x ² +0,4929x-17,357	0,94	410	168

Fonte: Dados da Pesquisa

Tabela 25. Análise estatística tensão máxima atingida para gabião com brita 2

Parâmetro	kPa
Média	407,7
Intervalo superior média	414,0
Intervalo inferior média	401,4
Mediana	408,0
Desvio padrão	6,33
Coeficiente de variação	1,5%
Valor máximo	410,0
Valor mínimo	405,0

Fonte: Dados da Pesquisa

Tabela 26. Análise estatística deformação vertical máxima atingida para gabião com brita 2

Parâmetro	Mm
Média	166,00
Intervalo superior média	253,00
Intervalo inferior média	78,95
Mediana	168,00
Desvio padrão	35,04
Coeficiente de variação	21,10%
Valor máximo	200,00
Valor mínimo	130,00

Fonte: Dados da Pesquisa

De acordo com as tabelas apresentadas, a análise estatística das tensões máximas e das deformações verticais máximas atingidas nos ensaios de compressão dos gabiões preenchidos com brita 2 revela informações importantes sobre o comportamento estrutural desse sistema. A média da tensão máxima foi de 407,7 kPa, com um intervalo de confiança entre 401,4 kPa e 414,0 kPa, indicando uma baixa dispersão nos valores obtidos. A mediana de 408,0 kPa reforça a simetria na distribuição dos dados, e a pequena variação entre o valor máximo (410,0 kPa) e o mínimo (405,0 kPa) sugere que os ensaios apresentaram um comportamento bastante uniforme. Além disso, o desvio padrão de 6,33 kPa e o coeficiente de variação de apenas 1,5% demonstram alta reproduzibilidade dos testes e pouca influência de fatores externos. Essa baixa variação pode ser atribuída à uniformidade na compactação da brita dentro dos gabiões e ao controle rigoroso das condições experimentais. Comparando esses resultados com os valores individuais dos corpos de prova, verifica-se que CP01, CP02 e CP03 atingiram valores próximos da média estatística, confirmando a confiabilidade dos ensaios.

Por outro lado, a deformação vertical máxima apresentou uma dispersão significativamente maior, com uma média de 166,00 mm e um intervalo de confiança muito mais amplo, variando entre 78,95 mm e 253,00 mm. A mediana de 168,00 mm sugere que a distribuição dos valores está equilibrada, mas o intervalo superior elevado indica que alguns ensaios apresentaram deformações consideravelmente maiores do que outros. O desvio padrão de 35,04 mm e o coeficiente de variação de 21,10% evidenciam uma variação expressiva nos valores de deformação, indicando que a resposta do gabião à compressão não foi tão uniforme quanto à resistência máxima. A diferença de 70 mm entre os valores máximo e mínimo (200,00 mm e 130,00 mm, respectivamente) sugere que fatores como a compactação do material, a distribuição dos agregados dentro do gabião e a influência do confinamento lateral podem ter impactado o comportamento estrutural de cada amostra.

Os resultados indicam que, enquanto a resistência à compressão do gabião com brita 2 foi altamente uniforme, apresentando baixa dispersão e previsibilidade, a deformação vertical máxima variou significativamente entre os ensaios. Essa diferença sugere que ajustes nos processos de compactação e na disposição dos agregados dentro da estrutura podem ser necessários para reduzir essa variação e garantir um desempenho mais consistente. A alta uniformidade nos valores de tensão máxima confirma que o gabião tem bom desempenho em termos de resistência à compressão, enquanto a variabilidade na deformação indica que melhorias no controle do preenchimento e no confinamento do material podem resultar em um sistema mais eficiente e previsível. Assim, para otimizar o comportamento mecânico dos gabiões preenchidos com brita 2, recomenda-se a adoção de critérios mais rigorosos para garantir uma compactação uniforme, minimizando variações na deformação ao longo do carregamento.

4.4.3 Comparação entre os gabiões preenchidos com areia e brita

Para a verificação se as médias referentes às tensões (verticais e horizontais) e deformações (horizontais e verticais) máxima obtidas para os gabiões preenchidos com areia média e brita 2 diferem (ou não) estatisticamente, foram realizados teste T, tendo em vista a tendência de normalidade dos dados determinados.

O teste T é um teste estatístico utilizado para comparar as médias de dois grupos e verificar se a diferença entre elas é estatisticamente significativa. Ele é amplamente aplicado em diversas áreas, como ciências sociais, engenharia e saúde, para avaliar se uma variável apresenta variação significativa sob diferentes condições.

O teste T pode ser realizado para amostras independentes, quando os grupos não possuem relação entre si, ou para amostras pareadas, quando as observações são dependentes, como antes e depois de um experimento. A interpretação dos resultados se baseia no valor-p, que indica a probabilidade de a diferença observada ocorrer ao acaso, sendo geralmente adotado um nível de significância de 5% para a tomada de decisão.

A formulação do teste de hipóteses segue dois enunciados: a hipótese nula (H_0), que assume que não há diferença significativa entre as médias dos grupos comparados, e a hipótese alternativa (H_1), que sugere a existência de uma diferença significativa. A interpretação dos resultados se baseia no valor-p, que indica a probabilidade de a diferença observada ocorrer ao acaso, sendo geralmente adotado um nível de significância de 5% para a tomada de decisão. Se o valor-p for menor que esse nível, rejeita-se H_0 e aceita-se H_1 , concluindo que há diferença significativa entre as médias.

- Se $p>0,05$, não se rejeita H_0 , ou seja, não há evidências estatísticas suficientes para afirmar que existe uma diferença significativa entre as médias.
- Se $p<0,05$, rejeita-se H_0 e aceita-se H_1 , indicando que há evidências estatísticas para concluir que as médias são significativamente diferentes.
- test.

Também foram realizadas correlações entre os dados obtidos por meio do método de Pearson tendo em vista a tendência de distribuição normal constatada nos dados obtidos.

O teste de correlação de Pearson mede a relação linear entre duas variáveis quantitativas, assumindo que os dados seguem uma distribuição normal. O coeficiente de correlação (ρ) varia entre -1 e 1, onde valores próximos a 1 indicam correlação positiva forte, próximos a -1 indicam correlação negativa forte, e próximos a 0 indicam ausência de correlação.

A significância estatística é avaliada pelo valor-p, onde $p<0,05$ indica uma correlação significativa. Esse teste é amplamente utilizado em análises científicas e experimentais, especialmente quando há suposição de normalidade nos dados. As análises conduzidas são a seguir apresentadas:

Tabela 27. Valores de deformação máxima e tensão máxima obtidos para gabiões com areia compactada

Corpo de prova	Tensão Máxima horizontal atingida (kPa)	Deformação máxima horizontal atingida (mm)	Tensão Máxima vertical atingida (kPa)	Deformação máxima vertical atingida (mm)

CP1 areia compacta	156	140	190	128,8
CP2 areia compacta	188	190	130	17,85
CP3 areia compacta	156	90	195	128,4

Fonte: Dados da Pesquisa

Tabela 28. Valores de deformação máxima e tensão máxima obtidos para gabiões com brita 2

Corpo de prova	Tensão Máxima horizontal atingida (kPa)	Deformação máxima horizontal atingida (mm)	Tensão Máxima vertical atingida (kPa)	Deformação máxima vertical atingida (mm)
CP1 Brita 2	405	200	310	77,68
CP2 Brita 2	408	130	400	74,74
CP3 Brita 2	410	168	345	84,47

Fonte: Dados da Pesquisa

Tabela 29. Teste T – tensão vertical máxima areia x tensão vertical máxima brita

Teste	σ_v média areia (kPa)	σ_v média brita (kPa)	p_{obtido}	p
σ_v areia x σ_v brita	171,66	351,66	0,059	>0,05

Fonte: Dados da Pesquisa

Tabela 30. Teste T – tensão horizontal máxima areia x tensão horizontal máxima brita

Teste	σ_h média areia (kPa)	σ_h média brita (kPa)	p_{obtido}	p
σ_h areia x σ_h brita	166,37	407,66	0,002	<0,05

Fonte: Dados da Pesquisa

Tabela 31. Teste T – tensão vertical máxima areia x tensão horizontal máxima areia

Teste	σ_v média areia (kPa)	σ_h média areia (kPa)	p_{obtido}	p
σ_v areia x σ_h areia	171,66	166,67	0,889	>0,05

Fonte: Dados da Pesquisa

Tabela 32. Teste T – tensão vertical máxima brita x tensão horizontal máxima brita

Teste	σ_v média brita (kPa)	σ_h média brita (kPa)	p_{obtido}	p
σ_v brita x σ_h brita	351,66	407,66	0,159	>0,05

Fonte: Dados da Pesquisa

Tabela 33. Teste T – deformação vertical máxima areia x deformação vertical máxima areia

Teste	ρ_v média areia (mm)	ρ_v média brita (mm)	p_{obtido}	p
ρ_v areia x ρ_v brita	91,68	78,96	0,75	>0,05

Fonte: Dados da Pesquisa

Tabela 34. Teste T – deformação horizontal máxima areia x deformação horizontal máxima brita

Teste	ρ_h média areia (mm)	ρ_h média brita (mm)	p_{obtido}	p
ρ_h areia x ρ_h brita	140,00	160,00	0,609	>0,05

Fonte: Dados da Pesquisa

Tabela 35. Teste T – deformação vertical máxima areia x deformação horizontal máxima areia

Teste	ρ_v média areia (mm)	ρ_h média areia (mm)	p_{obtido}	p
ρ_v areia x ρ_h areia	91,68	140,00	0,526	>0,05

Fonte: Dados da Pesquisa

Tabela 36. Teste T – deformação horizontal máxima brita x deformação horizontal máxima brita

Teste	ρv média brita (mm)	ρh média brita (mm)	p_{obtido}	p
ρv brita x ρh brita	78,96	166,00	0,046	<0,05

Fonte: Dados da Pesquisa

A análise estatística dos testes T conduzidos para comparar as tensões verticais (σv), tensões horizontais (σh), e deformações (ρv , ρh) entre areia e brita revelou alguns resultados significativos. Primeiramente, não foi identificada diferença estatisticamente significativa entre as tensões verticais da areia e da brita ($p=0,059$), o que indica que ambos os materiais apresentam comportamento semelhante nesse aspecto. Entretanto, a tensão horizontal da brita se mostrou significativamente maior do que a da areia ($p=0,002$), sugerindo que a brita pode ter uma maior capacidade de distribuir esforços lateralmente. A ausência de diferença estatisticamente significativa entre as resistências à tensão vertical da areia e da brita, mesmo sob o mesmo confinamento, pode estar relacionada a diversos fatores mecânicos e geotécnico, tais como:

- **Confinamento uniforme e distribuição de carga:** Quando um material granular, como areia ou brita, está submetido a um confinamento semelhante, a distribuição das tensões verticais tende a ser homogênea ao longo do meio granular. Isso ocorre porque a carga vertical aplicada é transferida de maneira relativamente uniforme através dos contatos entre os grãos, independentemente do tamanho ou forma das partículas.
- **Comportamento em regime de adensamento:** Tanto a areia quanto a brita podem ter atingido um estado de compactação ou acomodação similar sob o confinamento aplicado. No caso da areia, a mobilização da resistência pode ocorrer devido ao rearranjo dos grãos e ao aumento da densidade relativa, enquanto na brita, mesmo com partículas maiores e mais angulares, pode haver um mecanismo de intertravamento que limita a variação da resistência vertical.
- **Estrutura granular e rigidez relativa:** A rigidez do material pode influenciar a forma como a carga vertical é suportada. A brita, por possuir partículas maiores e mais angulares, poderia apresentar maior resistência individual por contato entre partículas. No entanto, a areia, composta por grãos menores, pode distribuir a carga de maneira mais homogênea, reduzindo a concentração de tensões em pontos específicos. Se ambos os materiais estiverem suficientemente

compactados, a resistência vertical tende a ser equivalente, pois o comportamento global do sistema não varia significativamente.

- **Efeito do confinamento na dilatação volumétrica:** No caso da brita, um confinamento efetivo pode reduzir sua tendência à dilatação, tornando seu comportamento mais semelhante ao da areia em termos de resistência vertical. A areia, por sua vez, pode ter atingido um estado de compactação no qual a dilatação volumétrica não ocorre significativamente, resultando em valores próximos de resistência à tração vertical.
- **Contato entre partículas e atrito interno:** A resistência à tensão vertical depende do atrito entre partículas e do contato efetivo entre elas. Como ambas as amostras estavam submetidas a um mesmo nível de confinamento, a resistência pode ter sido limitada por um mecanismo de atrito interno semelhante em ambos os casos, reduzindo as diferenças observadas.

Os testes mostraram que, dentro da areia ($p=0,889$) e dentro da brita ($p=0,159p$), não há uma diferença estatisticamente significativa entre a tensão vertical e a tensão horizontal. Isso significa que a resposta do material às tensões aplicadas nessas direções é relativamente equilibrada. Esse comportamento pode indicar que ambos os materiais possuem uma estrutura granular que distribui as tensões de maneira semelhante nas direções vertical e horizontal.

Ao analisar as deformações, na areia, a deformação vertical e a deformação horizontal não apresentaram diferença significativa ($p=0,526$), o que indica que o material responde de maneira semelhante à aplicação de cargas nas duas direções. Isso sugere que a areia se deforma de maneira mais isotrópica, sem grande distinção entre as direções.

Por outro lado, na brita, a deformação horizontal foi significativamente maior do que a deformação vertical ($p=0,046$). Isso indica que a brita responde de maneira diferente conforme a direção da aplicação da carga, caracterizando um comportamento mais anisotrópico. Essa diferença pode ser explicada pela disposição dos grãos e pelo confinamento lateral: a brita, por ter partículas maiores e mais angulares, pode resistir mais à deformação na direção vertical, mas permitir maior deformação lateral devido ao rearranjo das partículas e ao efeito de confinamento do material ao seu redor.

Quando comparadas as deformações verticais entre areia e brita ($p=0,75$) e as deformações horizontais entre esses materiais ($p=0,609$), não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas. Isso sugere que, apesar da brita apresentar

anisotropia interna (com maior deformação horizontal do que vertical), os valores médios de deformação nos dois materiais não diferem significativamente quando comparados entre si.

Os principais achados indicam que a areia apresenta um comportamento mais uniforme entre as direções, sem diferenças significativas entre suas tensões e deformações verticais e horizontais. Já a brita se destaca por ter maior tensão horizontal e por apresentar uma diferença significativa entre sua deformação vertical e horizontal, com deformação maior na direção horizontal. Esse comportamento pode impactar o desempenho estrutural dos materiais em aplicações geotécnicas, como pavimentação e camadas de base de aterros. Enquanto a areia se comporta de forma mais isotrópica, a brita pode oferecer maior resistência ao espalhamento lateral das tensões, mas ao mesmo tempo apresentar maior deformabilidade horizontal.

A anisotropia da brita e a isotropia da areia em relação à deformação podem ser explicadas principalmente pelo formato, tamanho e arranjo dos grãos, além do comportamento dos materiais sob carregamento. A areia, geralmente composta por grãos mais uniformes e arredondados, tende a apresentar um empacotamento mais homogêneo, o que permite que as forças se dissipem de maneira relativamente igual em todas as direções. Como resultado, a areia se deforma de forma equilibrada, exibindo um comportamento isotrópico. Por outro lado, a brita possui grãos maiores, angulares e irregulares, formando uma estrutura granular mais intertravada. Esse intertravamento aumenta a resistência à deformação vertical, pois os grãos se encaixam melhor sob carga, reduzindo o deslocamento para baixo. Entretanto, na direção horizontal, as partículas podem se reorganizar e deslizar umas sobre as outras com mais facilidade, resultando em maior deformação lateral e caracterizando um comportamento anisotrópico.

Além do formato dos grãos, o confinamento também influencia esse comportamento. Na areia, os grãos menores e mais esféricos permitem uma distribuição uniforme das forças, minimizando a diferença entre as deformações nas direções vertical e horizontal. Na brita, o confinamento impõe maior resistência ao deslocamento vertical devido ao intertravamento dos grãos, enquanto lateralmente, dependendo do grau de compactação e do confinamento imposto, os grãos podem se deslocar e reacomodar, permitindo maior deformação nessa direção. Outro fator importante é o estado inicial de compactação dos materiais. A areia, por ser mais uniforme, já se encontra próxima do seu estado denso inicial após compactação, limitando a diferença entre suas deformações nas diferentes direções. Já a brita pode apresentar mais espaços vazios iniciais, que são

reduzidos à medida que a carga é aplicada. Como o intertravamento na direção vertical é mais eficiente, a maior parte dessa reacomodação ocorre lateralmente, aumentando a deformação horizontal.

Portanto, a areia apresentou um comportamento isotrópico porque seus grãos uniformes permitiram uma distribuição homogênea das forças e uma deformação equilibrada. Já a brita apresentou um comportamento anisotrópico devido ao formato angular e irregular de seus grãos, que favoreceram um maior intertravamento na direção vertical e uma maior deformação lateral. Isso explica por que a brita teve uma deformação significativamente maior na horizontal do que na vertical, enquanto a areia manteve um comportamento mais uniforme em ambas as direções.

As tabelas seguintes demonstram as correlações obtidas por meio do método de Pearson:

Tabela 37. Correlação de Pearson – Tensão máxima vertical brita x deformação máxima vertical brita

Teste	pobtido	p	R ²
$\sigma_{V\text{máxima}} \times \rho_{V\text{máxima}}$	0,728	>0,05	-0,414

Fonte: Dados da Pesquisa

Tabela 38. Correlação de Pearson – Tensão máxima vertical brita x deformação máxima horizontal brita

Teste	pobtido	p	R ²
$\sigma_{V\text{máxima}} \times \rho_{h\text{máxima}}$	0,05	<0,05	-0,997

Fonte: Dados da Pesquisa

Tabela 39. Correlação de Pearson – Deformação máxima vertical x deformação máxima horizontal brita

Teste	pobtido	p	R ²
$\rho_{V\text{máxima}} \times \rho_{h\text{máxima}}$	0,778	>0,05	0,341

Fonte: Dados da Pesquisa

Tabela 40. Correlação de Pearson – Tensão máxima vertical areia x deformação máxima vertical areia

Teste	pobtido	p	R ²
$\sigma_{V\text{máxima}} \times \rho_{V\text{máxima}}$	0,046	<0,05	0,997

Fonte: Dados da Pesquisa

Tabela 41. Correlação de Pearson – Tensão máxima vertical areia x deformação máxima horizontal areia

Teste	pobtido	p	R ²
$\sigma_{V\text{máxima}} \times \rho_{h\text{máxima}}$	0,289	>0,05	-0,899

Fonte: Dados da Pesquisa

Tabela 42. Correlação de Pearson – Deformação máxima vertical x deformação máxima horizontal areia

Teste	pobtido	p	R ²
$\rho_{V\text{máxima}} \times \rho_{h\text{máxima}}$	0,335	>0,05	-0,864

Fonte: Dados da Pesquisa

A análise das correlações de Pearson entre as tensões máximas verticais e as deformações nos gabiões preenchidos com brita e areia revela diferentes padrões de relação entre as variáveis. No caso dos gabiões com brita, a correlação entre tensão máxima vertical e deformação máxima vertical foi fraca e negativa ($R=-0,414$) e não significativa ($p>0,05$), indicando que não há evidências estatísticas para afirmar que a tensão vertical influencia significativamente a deformação vertical.

No entanto, a correlação entre tensão máxima vertical e deformação máxima horizontal foi negativa e quase perfeita ($R=-0,997$), além de estatisticamente significativa ($p<0,05$), sugerindo que o aumento da tensão reduz significativamente a deformação horizontal. Já a relação entre a deformação vertical e horizontal apresentou correlação fraca e positiva ($R=0,341$), mas sem significância estatística ($p>0,05$), indicando ausência de uma relação relevante entre essas variáveis.

Nos gabiões preenchidos com areia, a correlação entre tensão máxima vertical e deformação máxima vertical foi positiva e quase perfeita ($R=0,997$), com significância estatística ($p<0,05$), demonstrando que o aumento da tensão está diretamente associado ao aumento da deformação vertical.

Por outro lado, a correlação entre tensão máxima vertical e deformação máxima horizontal foi negativa e forte ($R=-0,899$), porém sem significância estatística ($p>0,05$), sugerindo que essa relação não pode ser considerada conclusiva.

De forma semelhante, a relação entre deformação máxima vertical e horizontal também apresentou correlação negativa forte ($R=-0,864$), mas sem significância estatística ($p>0,05$), indicando que não há evidências suficientes para afirmar que a deformação vertical influencia diretamente a deformação horizontal nos gabiões de areia.

De maneira geral, os resultados mostram que, para a brita, a única correlação estatisticamente significativa foi entre tensão máxima vertical e deformação horizontal, sugerindo que a tensão vertical reduz a deformação horizontal, enquanto para a areia, a única correlação significativa foi entre tensão máxima vertical e deformação vertical, indicando que o aumento da carga vertical causa maior deformação vertical. As demais correlações, apesar de algumas apresentarem valores moderados ou fortes, não foram estatisticamente significativas, o que indica que os padrões observados podem ser fruto da variabilidade nos dados e não de uma relação real entre as variáveis. Para confirmar essas tendências, seria interessante ampliar o número de amostras, reduzindo a incerteza estatística das análises.

A correlação negativa observada entre tensão vertical e deformação horizontal nos gabiões preenchidos com brita pode ser explicada pelo comportamento mecânico dos materiais granulares sob carga. Quando a tensão vertical aumenta, os grãos de brita sofrem um rearranjo que favorece a compactação e o travamento entre partículas, reduzindo significativamente a possibilidade de deformação horizontal.

Esse fenômeno ocorre porque a brita é composta por partículas angulosas e de maior granulometria, o que favorece um alto atrito interno e um melhor intertravamento entre os grãos. Conforme a carga vertical é aplicada, os grãos tendem a se reacomodar e preencher os vazios, resultando em uma estrutura mais densa e resistente ao deslocamento lateral. Esse efeito de travamento impede que os grãos se movam livremente na direção horizontal, pois qualquer tentativa de deslocamento lateral requer uma energia adicional para vencer o atrito gerado pelos contatos intergranulares.

Além disso, o confinamento imposto pelo gabião contribui para essa redução da deformação horizontal. Diferente de um material solto, onde as partículas podem se espalhar livremente, o gabião impõe uma contenção que limita a mobilidade lateral dos grãos, obrigando a energia da carga vertical a ser dissipada predominantemente na forma de compressão interna, e não na forma de expansão lateral.

Na areia, a ausência de intertravamento efetivo entre os grãos permite uma maior mobilidade das partículas, tornando a deformação vertical mais expressiva sob tensão. Com o aumento da carga vertical, ocorre uma reacomodação granular progressiva, reduzindo os vazios internos e favorecendo a compactação do material. Esse processo faz com que a deformação vertical aumente proporcionalmente à tensão aplicada, resultando na forte correlação positiva observada. Diferente da brita, onde o intertravamento limita os deslocamentos verticais, na areia a menor resistência ao movimento dos grãos facilita a deformação na direção da carga imposta, explicando a relação significativa entre tensão máxima vertical e deformação vertical nos gabiões preenchidos com esse material.

4.4.4 Curvas tensão versus deformação obtidas

As curvas apresentadas a seguir para os gabiões preenchidos com brita #2 e areia média compacta foram obtidas a partir das equações de regressão derivadas dos ensaios de compressão conduzidos.

Cada curva representa o comportamento tensão-deformação de um corpo de prova específico (CP01, CP02 e CP03), enquanto a curva média foi construída a partir dos valores médios das deformações correspondentes a cada nível de tensão aplicado.

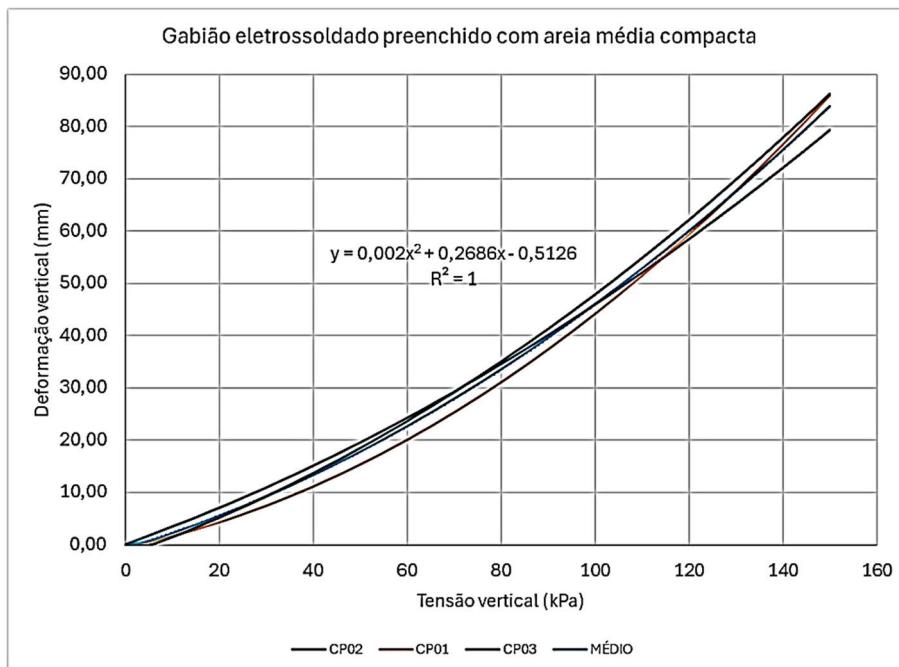


Figura 53. Curva versus deformação vertical - Areia compacta. Fonte: Dados da Pesquisa

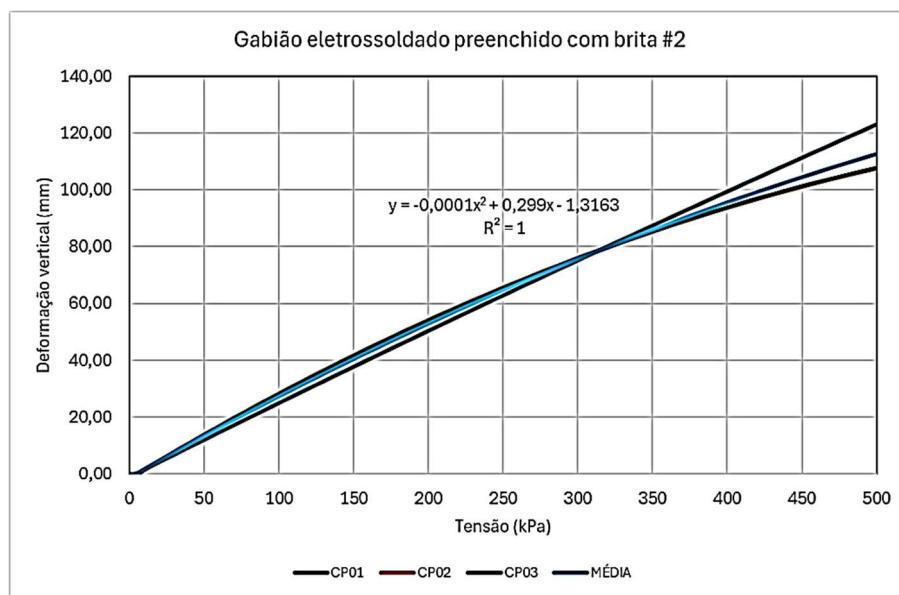


Figura 54. Curva tensão versus deformação vertical – Brita #2. Fonte: Dados da Pesquisa

Nos dois gráficos apresentados nas figuras 4.15 e 4.15, os ajustes das regressões apresentaram coeficiente de determinação $R^2=1,0$, indicando um excelente ajuste entre os modelos matemáticos e os dados experimentais. Isso sugere que as equações fornecem uma descrição confiável do comportamento mecânico dos gabiões sob carregamento vertical.

A partir dessas curvas, é possível estimar deformações iniciais para gabiões eletrossoldados preenchidos com esses materiais, permitindo sua aplicação em projetos

básicos ou emergenciais, como no dimensionamento preliminar de barreiras de retenção de detritos, estruturas de contenção ou reforço de taludes.

Essas curvas, em princípio, podem servir como referência para prever o comportamento estrutural de gabiões sob diferentes níveis de carregamento vertical, auxiliando na concepção de soluções mais seguras e eficientes para engenharia geotécnica.

5 CONCLUSÃO

O estudo realizado sobre os gabiões eletrossoldados preenchidos com areia média compacta e brita #2 permitiu compreender suas características mecânicas e sua viabilidade para aplicações estruturais e geotécnicas.

Os ensaios de compressão demonstraram que ambos os materiais apresentam comportamentos distintos quando confinados, influenciando diretamente a resistência e a deformabilidade dos gabiões. A areia média compacta, quando adequadamente compactada, demonstrou maior resistência inicial, com deformações proporcionais ao carregamento aplicado, tornando sua resposta mecânica previsível sob cargas progressivas.

Entretanto, sob tensões elevadas, houve uma redução da rigidez e um aumento expressivo da deformação, exigindo um controle rigoroso da compactação para evitar deslocamentos excessivos. Já os gabiões preenchidos com brita #2 apresentaram um comportamento mais estável e resistente, com menor deformabilidade mesmo em altas tensões. A brita, devido ao maior intertravamento entre as partículas e menor propensão à compactação adicional, garantiu um confinamento eficiente, proporcionando maior capacidade de suporte à carga e menor risco de recalques excessivos.

A curva tensão-deformação obtida para cada tipo de preenchimento demonstrou ser uma ferramenta essencial para estimativas iniciais de deformação, permitindo prever o comportamento mecânico dos gabiões sob diferentes cargas aplicadas. Esse método pode ser particularmente útil na concepção de estruturas emergenciais, como barreiras de contenção de detritos, estabilização de taludes e muros de arrimo temporários, fornecendo diretrizes rápidas para projetos que exigem respostas ágeis e soluções estruturais confiáveis.

O uso de gabiões eletrossoldados demonstra grande potencial para a infraestrutura urbana sustentável, sendo aplicável a obras de drenagem, contenção e reforço de encostas, além de desempenhar um papel importante na proteção contra erosões e inundações. Sua versatilidade e facilidade de montagem fazem dessa tecnologia uma alternativa eficiente e de baixo custo para diversas aplicações em engenharia civil e infraestrutura urbana.

A utilização de areia e brita como material de preenchimento somente é viável em gabiões de malha eletrossoldada, uma vez que a rigidez da malha garante o confinamento adequado desses materiais granulares, evitando deformações excessivas e

mantendo a integridade estrutural do gabião. Nos gabiões de malha hexagonal dupla torção, esse tipo de preenchimento não é indicado, pois a flexibilidade da malha compromete a contenção eficiente dos materiais de menor granulometria.

Todavia, para evitar a perda de material por entre as aberturas da malha eletrossoldada, é essencial a utilização de uma manta geotêxtil não tecida como revestimento interno do gabião, garantindo o confinamento adequado do material de enchimento e prevenindo a migração de partículas finas.

Além de suas vantagens estruturais e mecânicas, o gabião eletrossoldado preenchido com areia e brita pode ser considerado uma solução sustentável, pois se trata de um método de construção a seco, reduzindo o consumo de água e evitando processos de cura de materiais cimentícios.

A utilização de materiais granulares de baixo impacto ambiental, como areia e brita, reforça sua viabilidade ecológica, pois são abundantes, possuem baixa pegada de carbono e podem ser reaproveitados ou reciclados ao final da vida útil da estrutura. Essas características tornam os gabiões uma alternativa sustentável para cidades que buscam reduzir o impacto ambiental das construções, promovendo infraestrutura mais resiliente e ecológica.

A inserção dos gabiões eletrossoldados na infraestrutura das cidades sustentáveis se mostra uma escolha estratégica devido às suas vantagens ambientais, econômicas e técnicas. Primeiramente, seu baixo impacto ambiental é evidenciado pelo uso de materiais naturais e recicláveis, além de eliminar a necessidade de cimento e grandes volumes de concreto, reduzindo as emissões de CO₂ associadas à construção civil.

Em segundo lugar, sua montagem rápida e eficiente permite sua aplicação em obras emergenciais, como a contenção de deslizamentos de terra, barreiras para resíduos sólidos e recuperação de margens de rios afetadas por enchentes.

Além disso, a possibilidade de integração com vegetação e soluções baseadas na natureza (SBN) permite o uso dos gabiões como estruturas drenantes e permeáveis, reduzindo impactos ambientais e contribuindo para sistemas de drenagem sustentável.

Os módulos de rigidez, tangente e secante determinados a partir dos ensaios forneceram informações essenciais para a caracterização estrutural dos gabiões. O módulo de rigidez permitiu avaliar a resistência global da estrutura, enquanto o módulo tangente indicou a rigidez instantânea do material sob diferentes condições de carregamento. Já o módulo secante possibilitou uma análise da rigidez média do sistema ao longo de um intervalo de carregamento, permitindo estimativas mais precisas para a

modelagem estrutural e previsão de recalques. Dessa forma, a obtenção desses parâmetros possibilita a comparação entre materiais de preenchimento, facilitando a escolha mais adequada para cada aplicação.

Com base nos resultados obtidos, sugere-se que futuras pesquisas explorem o comportamento dos gabiões sob diferentes condições de confinamento, bem como a utilização de materiais alternativos de preenchimento, incluindo agregados reciclados oriundos de resíduos da construção civil (RCD).

Além disso, análises mais aprofundadas sobre a resistência ao cisalhamento e comportamento em ensaios triaxiais podem fornecer insights adicionais sobre a resposta mecânica desses sistemas sob solicitações complexas. Também seria relevante a realização de simulações numéricas e modelagens computacionais, permitindo previsões mais detalhadas do comportamento dos gabiões em diferentes cenários de aplicação.

Os ensaios realizados demonstraram que os gabiões eletrossoldados preenchidos com areia e brita apresentam um grande potencial para diversas aplicações estruturais e geotécnicas, destacando-se como uma alternativa eficiente e sustentável para obras emergenciais e infraestrutura urbana.

A partir das curvas tensão-deformação obtidas, é possível estimar de forma confiável as deformações esperadas para incrementos de carga, permitindo a aplicação desses resultados em projetos básicos e facilitando a tomada de decisões em situações de emergência. Dessa forma, os gabiões eletrossoldados se consolidam como uma tecnologia promissora para cidades sustentáveis, promovendo eficiência estrutural, segurança geotécnica e benefícios ambientais, tornando-se uma escolha estratégica para engenharia civil e infraestrutura urbana sustentável.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11682:2009** – Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13292:1995** – Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro, 1995.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6508:1984** – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7181:2016** – Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7182:1986** – Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986.
- BARROS, P. L. A. **Manual técnico de obras de contenção**. 1. ed. São Paulo: Maccaferri do Brasil, 2008.
- BARROS, P. L. A. **Obras de contenção: manual técnico**. Jundiaí: Maccaferri, 2010.
- BARROS, P. L. A.; FRACASSI, G.; DURAN, J. da S.; TEIXEIRA, M. A. **Obras de Contenção, Manual técnico Maccaferri**. São Paulo, 2017.
- BARROS, P. L. de A. **Obras de Contenção**. Jundiaí: Maccaferri do Brasil, 2017.
- BELGO ARAMES. **Conheça a solução Easyworks: Gabiões de alta performance**. Blog da Belgo Engenharia, 17 mai. 2023. Disponível em: <https://blog.belgo.com.br/engenharia/geotech/conheca-a-solucao-easyworks-gabioes-de-alta-performance/>. Acesso em: 21 jun. 2024.
- CAMELO, Diego Gonçalves. **Estudo da utilização de resíduos de construção civil para preenchimento de gabiões caixa**. 2019. 205 f. Dissertação (Mestrado em Cidades Inteligentes e Sustentáveis) – Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2019.
- CARDOSO, Letícia Mendonça. **Soluções sustentáveis associadas à engenharia de fundações e geotecnia: estudo de caso, reaproveitamento de estacas para contenção**.

2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Politécnico, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Macaé, 2022.

CODUTO, D.; KITCH, W.; YEUNG, M. **Foundation Design: Principles and Practices**. 3 ed. EUA: Pearson, 2015.

COFFERI, Felipe Pierdoná; HUHN, Rafael; BORDIGNON, Thomaz Gregory. OCUPAÇÃO DE ÁREAS DE RISCO PODENDO CAUSAR DESLIZAMENTOS. **Enaproc**, v. 1, n. 1, 2014.

COUTINHO, T. C. **Canais revestidos com gabiões tipo colchão: um estudo e verificação de seus critérios de estabilidade**. 2019. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

DA CRUZ, Lucilene Boniolo; BRAGHIN, Maíra Ferreira Lima. **Estudo da utilização da estrutura de contenção tipo Gabião**. Colloquium Exectarum, Presidente Prudente, SP: UNOESTE, v. 8, n. 4, p. 33-39, 2016. ISSN 2178-8332.

DE MENDONÇA, Marcos Barreto; PINHEIRO, Mariana Talita Gomes. Estudo da percepção de risco associado a deslizamentos no bairro do Maceió, Niterói, RJ. **Revista de Educomunicação Ambiental**, v. 2, n. 2, p. 78-93, 2012.

DE SÁ BORGES, Alan. **Desafios da engenharia diante ao cenário nacional de enchentes e deslizamento de terra**. Revista FT, 2023.

DER. Departamento de Estradas de Rodagem. **Obra de estabilização de encosta ao lado de rodovia avança em União da Vitória**. 2024. Disponível em: <https://www.der.pr.gov.br/Noticia/Obra-de-estabilizacao-de-encosta-ao-lado-de-rodovia-avanca-em-Uniao-da-Vitoria>. Acesso em: 03 mar. 2025.

EC. **Evaluating the impact of nature-based solutions – A handbook for practitioners**. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021.

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DA ESTRUTURA DE CONTENÇÃO TIPO GABIÃO. **Colloquium Exectarum**, v. 8, n. 4, p. 33-39, 2017. ISSN: 2178-8332. Disponível em: <https://revistas.unoeste.br/index.php/ce/article/view/1898>. Acesso em: 4 jul. 2024.

G1 SANTOS. **Rodovia Mogi-Bertioga tem pistas liberadas após 21 dias de interdição**. 2018. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/santos-regiao/noticia/mogi->

[bertioga-tem-pistas-liberadas-apos-21-dias-de-interdicao.ghtml](#). Acesso em: 03 mar. 2025.

GIL, Antônio Carlos. Como classificar as pesquisas. **Como elaborar projetos de pesquisa**, v. 4, n. 1, p. 44-45, 2002.

GERSCOVICH, Denise M. S. **Estruturas de contenção: muros de arrimo**. Rio de Janeiro: UERJ, 2010.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 11. ed. São Paulo: Blucher, 2019.

JÚNIO, A. M. M.; VIANA, P. M. F. **Análise da estabilidade externa de um muro de gabião próximo ao viaduto marginal Botafogo**. Construindo, v. 8, n. 2, p. 1-15, 2016.

LEITE, Januária Cecília Pereira Simões; NETO, Mário Teixeira Reis. **Meio ambiente e os embates da construção civil**. Construindo, 2014.

MACCAFERRI. **Manual da Maccaferri sobre gabiões e disciplinas**. São Paulo: Maccaferri do Brasil, 2020. Disponível em: <https://dcc.ufpr.br/portal/wp-content/uploads/2020/11/1.-Estruturas-de-Madeira-Conceitos-Gerais.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2024.

MOLITERNO, A. **Caderno de Muros de Arrimo**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1980.

OLIVEIRA, Fabíola H. **Percepção de riscos ambientais e mudanças climáticas no Varjão-Distrito Federal**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

PEREIRA, G. L.; ALVES, L. T.; BARBOSA, L. B.; DE OLIVEIRA, C. B. **Correção e mudanças dos cursos dos rios com gabião para barragens**. Brazilian Journal of Animal and Environmental Research, v. 5, n. 4, p. 3491–3504, 2022. DOI: 10.34188/bjaerv5n4-003.

RAMOS, Maria Clara Alves Ferreira et al. **Caracterização tecnológica de resíduos de construção e demolição reciclados para aplicação em estruturas de contenção utilizando gabiões**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2022.

ROLNIK, R. **O que é cidade**. São Paulo: Brasiliense, 1988.

SANTOS JUNIOR, P. J. dos. **Análise teórico-numérico-experimental do comportamento mecânico dos gabiões em estruturas em São Paulo.** 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

TEIXEIRA, T. M. B. **Análise da influência das raízes de vetiver nos parâmetros de resistência dos solos com a profundidade.** 2017. Dissertação (Mestrado em Geotecnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

THIOLLENT, Michel. **Metodologia da pesquisa-ação.** São Paulo: Cortez, 2022.