

Estudo da Resistência ao Cisalhamento Direto em Misturas Compactadas de Solo Residual Maduro e Resíduo Fibroso PRFV

Cáio Machado da Silva ¹; Cátia de Paula Martins ²

Resumo – O Polímero Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV) é um material compósito amplamente utilizado em diversos setores industriais devido às suas características como alta resistência mecânica à corrosão. No entanto, existem desafios ambientais devido à sua não biodegradabilidade e à produção significativa de resíduos, com cerca de 18 mil toneladas geradas anualmente no Brasil. Para lidar com esse problema, uma alternativa surge na utilização desses resíduos como reforço de solos, visando melhorar suas propriedades mecânicas e de suporte. Esse estudo avaliou a resistência ao cisalhamento de misturas de solo residual com diferentes teores de PRFV por meio de ensaios de Cisalhamento Direto. Como ensaiado, os resultados mostraram redução no ângulo de atrito e coesão do solo com a adição desta fibra, não contribuindo assim para a melhoria do comportamento mecânico. Isso pode ser atribuído à baixa aderência entre as fibras e o solo, dificultando a transferência de tensões. Com isso, o estudo sugere que o resíduo de PRFV não se mostrou eficaz como reforço do solo residual, destacando a necessidade de mais estudos para avaliar seu potencial.

Abstract – The Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) is a composite material widely used in various industrial sectors due to its characteristics with high mechanical strength and corrosion resistance. However, there are environmental challenges due to its non-biodegradability and significant waste production, with about 18 thousand tons generated annually in Brazil. To address this issue, an alternative arises in the use of these wastes as soil reinforcement, aiming to improve their mechanical and support properties. This study evaluated the shear strength of residual soil mixtures with different levels of waste through Direct Shear Strength tests. The results showed a reduction in soil friction angle and cohesion with the addition of fibers, indicating a decrease in mechanical behavior. This can be attributed to the low adhesion between fibers and soil, hindering stress transfer. Despite the results, the study suggests that GFRP waste did not prove effective as reinforcement for residual soil, highlighting the need for further research to assess its potential.

Palavras-Chave – Resíduos Fibroso PRFV, Solo residual, Cisalhamento direto

¹ Bacharel em Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, (31) 97595-5646, caio.machado@engenharia.ufjf.br

² Docente, Universidade Federal de Juiz de Fora, (32) 99801-6051, catia.martins@ufjf.br

1. INTRODUÇÃO

A Engenharia Geotécnica desempenha um papel fundamental na Engenharia Civil, investigando as propriedades do solo para diversas aplicações como projetos de taludes, muros de arrimo, escavações e fundações, assim como obras relacionadas a barragens, pavimentação, túneis e Geotecnia Ambiental. Este último ramo específico da Engenharia Geotécnica visa mitigar os impactos ambientais, incluindo a monitorização e prevenção da contaminação do solo e águas subterrâneas, a recuperação de áreas degradadas e a reutilização de resíduos em obras geotécnicas (BOSCOV, 2008).

A utilização de reforço de solos com fibras ressalta a importância da resistência à tração das fibras para a estabilização do solo. Diversos tipos de fibras são utilizadas, sendo crucial considerar fatores como teor e comprimento da fibra, bem como a aderência entre as fibras e a matriz (HEINECK, 2002; GUEDES PINTO, 2008). O compósito de Poliéster Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV) é apresentado como um material amplamente utilizado devido às suas altas propriedades mecânicas, porém com significativo impacto ambiental pois, além de não ser degradável, a indústria gera uma grande quantidade de resíduos na produção em forma de pó e aparas (ORTH et al. 2012; GARCIA, 2009).

Neste contexto, considerando o grande volume de resíduos disponíveis, torna-se interessante explorar a reutilização do resíduo fibroso de PRFV como um material alternativo na área da Geotecnia, por meio da incorporação em misturas solo-fibras. Desta forma, este artigo propõe analisar a inclusão de resíduos de Poliéster Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV) em solos residuais, com o intuito de aprimorar suas características e fomentar a reutilização de materiais em aspectos relacionados a resistência ao cisalhamento do solo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

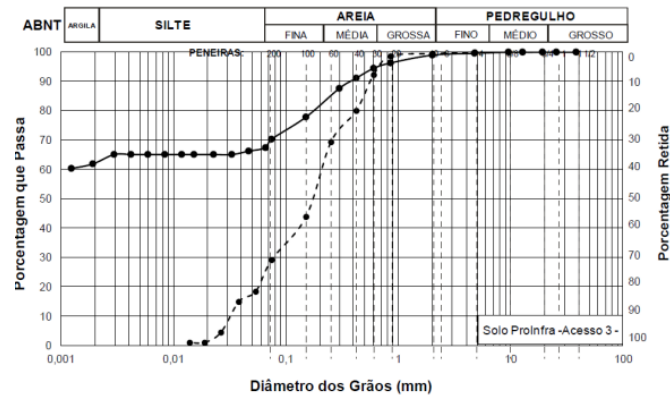
2.1.1. Solo

O solo utilizado no presente artigo se caracteriza como um solo residual e laterítico argiloso. As amostras foram recolhidas no campus da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), em um talude (Figura 1) próximo a Pró-Reitoria de Infraestrutura de Gestão (PROINFRA).



Figura 1. Talude da PROINFRA (Fonte: MELO, 2020)

Segundo Oliveira Junior (2014), o solo apresenta massa específica dos grãos de $2,82 \text{ g/cm}^3$. A composição granulométrica obtida por Silva e Leite (2015), contendo 63% de argila, 31% de areia, 4% de silte e 2% de pedregulho, conforme Figura 2. A Figura 2, também apresenta a curva granulométrica sem uso de defloculante (linha tracejada), que gera uma classificação de areia siltosa.



2.1.3 Mistura Solo-Fibra

A mistura entre o solo e a fibra seguiram a proporção de 0,5% da massa do material em relação a massa de solo corresponde. Após adotado 0,5% como referência, também foi proposta a realização com a proporção de 0,75% para verificar se existe um possível aumento das propriedades.

2.2. Métodos

2.2.1 Ensaio de Compactação

O ensaio de compactação é descrito pela NBR 7182 da ABNT (2016a), onde o objetivo é determinar a relação entre a massa específica aparente seca (ρ_d) e o teor de umidade (ω) de um corpo de prova compactado a uma determinada energia. Para o ensaio este trabalho, foi realizado o ensaio sem reuso de material, na energia Normal.

A adoção da Energia Normal nos ensaios de compactação e na moldagem dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto se justifica por sua ampla utilização em estudos geotécnicos de caracterização de solos, permitindo maior comparabilidade com resultados disponíveis na literatura. Além disso, trata-se de um procedimento normatizado, representando condições de compactação comumente aplicadas em campo, especialmente em obras de pequeno porte ou de caráter experimental, como neste estudo.

O solo foi previamente preparado, conforme a na norma NBR 6457 da ABNT (2016b), e umidade higroscópica medida, é realizada a mistura com os resíduos para os teores determinados de 0,5% e 0,75% de massa de fibra em relação à massa total de solo.



Figura 5. Corpo de Prova compactado (Fonte: Autor, 2022)

2.2.2 Cisalhamento Direto

O Ensaio de Cisalhamento Direto (CD) é padronizado pela norma ASTM D3080. No estudo em questão, somente as misturas de solo com fibra PRFV foram submetidas a esse ensaio. Os corpos de prova (CPs) foram moldados com parâmetros de compactação na Energia Normal, sem reutilização de material, utilizando um cilindro Proctor. Após a moldagem, os CPs foram transferidos para um anel de cisalhamento e em seguida colocados na caixa de cisalhamento junto com papel filtro, pedras porosas e placas ranhuradas. A caixa foi então acoplada à prensa, e o ensaio seguiu três etapas: inundação, adensamento e cisalhamento. Durante a etapa de adensamento, os CPs foram submetidos a diferentes tensões de carregamento (25 kPa, 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa), com registro do deslocamento vertical até a estabilização das deformações. A velocidade de cisalhamento máxima foi definida conforme a norma ASTM D3080, sendo 0,1 mm/min para a maioria dos ensaios, exceto um CP da mistura de 0,75% e tensão de carregamento de 100 kPa, que foi ensaiado a 0,05 mm/min para verificar possíveis influências da velocidade. Os dados do ensaio foram monitorados automaticamente, permitindo a obtenção da envoltória linear de resistência em termos de tensões efetivas normais e tensões cisalhantes máximas, e a determinação dos parâmetros de resistência, como o intercepto coesivo (c') e o ângulo de atrito (ϕ'). A Figura 6 mostra os CPs levados à ruptura, respectivamente.



Figura 6. Corpo de Prova levado à ruptura (Fonte: Autor, 2022)

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Compactação

Através do ensaio de compactação, na Energia Normal e no cilindro pequeno, foi possível obter a curva de compactação das misturas solo – fibra PRFV e os seus correspondentes parâmetros. Nas Figuras 24 e 25 estão apresentadas as curvas de compactação para as misturas de 0,5% e 0,75%, respectivamente. Assim, para a mistura de 0,5%, a massa específica aparente seca máxima ($\rho_{d,m\acute{a}x}$) encontrada foi de 1,564 g/cm³ e o teor de umidade ótimo ($w_{\acute{o}t}$) de 25,18%. Enquanto que, para a mistura de 0,75%, o $w_{\acute{o}t}$ foi igual a 25,77% e a $\rho_{d,m\acute{a}x}$ igual a 1,576g/cm³. Com isso, é possível observar para as misturas que, à medida que se acrescentava fibra PRFV, os valores se mantiveram próximos.

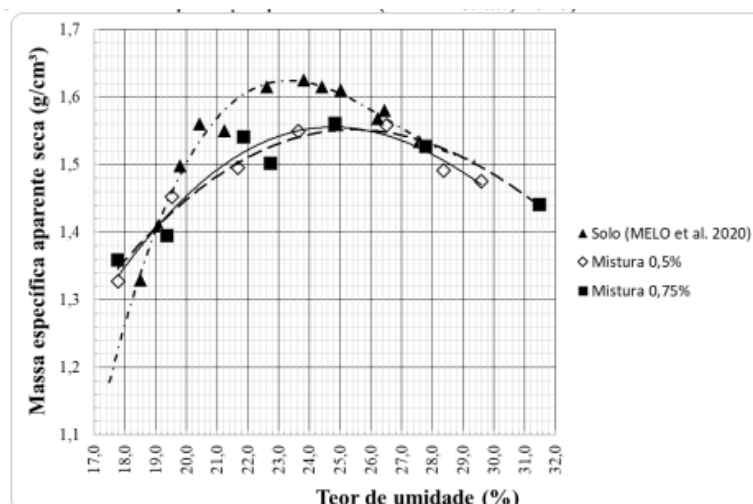


Figura 7 - Curvas de compactação para o solo (MELO et al., 2020) e misturas solo - fibra PRFV (fonte: Autor, 2023)

3.2. Curvas de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal

Conforme apresentado nas Figuras 7 e 8, as curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para as misturas de 0,50% e 0,75% não mostram picos de resistência bem definidos, em que a tensão cisalhante é máxima, para as tensões normais investigadas.

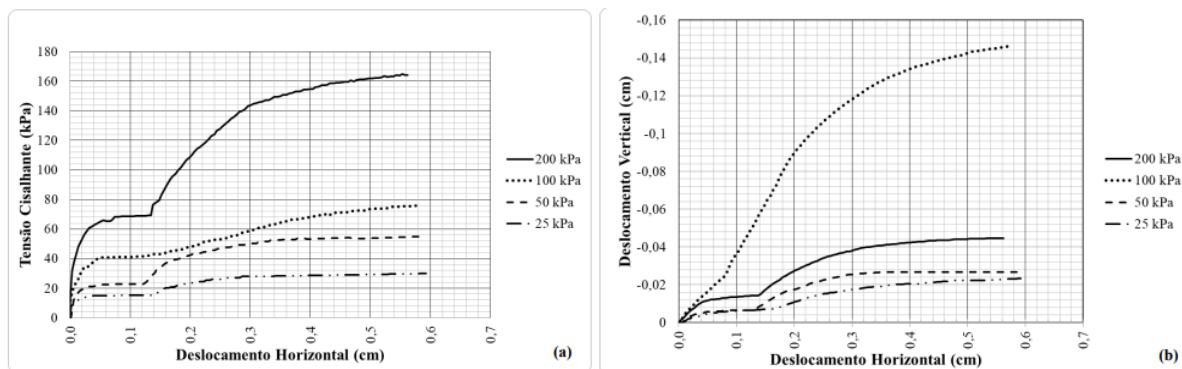


Figura 8 - Mistura de 0,50% - (a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal; (b) Deslocamento vertical versus deslocamento horizontal (Fonte: Autor, 2022)

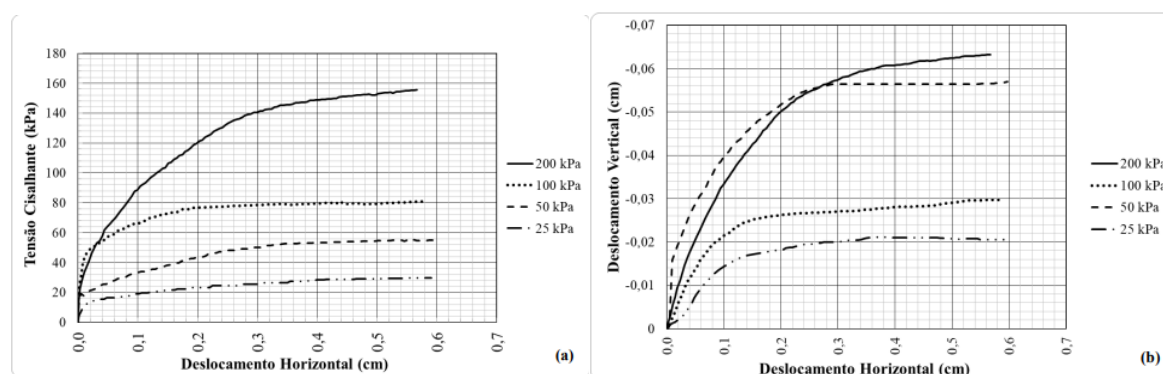


Figura 9 - Mistura de 0,75% - (a) Tensão cisalhante versus deslocamento horizontal; (b) Deslocamento vertical versus deslocamento horizontal (Fonte: Autor, 2022)

Para as amostras de mistura com 0,50% de fibra PRFV, foram observadas duas rupturas aparentes durante o ensaio de Resistência ao Cisalhamento Direto (RCD): uma entre 0,02 cm e 0,1 cm de deslocamento horizontal, e outra entre 0,3 cm e 0,55 cm. Este comportamento pode ser atribuído à heterogeneidade das misturas solo-fibra PRFV, conforme destacado por Rocha (2019), e está de acordo com estudos anteriores que relatam dificuldades na transferência de tensões devido à baixa aderência entre solo e fibra (SANTOS et al., 2019). Além disso, os resultados evidenciaram que, independentemente da tensão normal aplicada, houve dilatação dos corpos de prova durante o cisalhamento, sugerindo uma complexa interação entre as fibras e a matriz de solo.

3.2.1 Curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para o solo e misturas, por cada tensão normal investigada

Os resultados obtidos para o solo foram fornecidos por Abrantes (comunicação pessoal, 20 de junho de 2023) e utilizados neste estudo. As curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para as misturas e para o solo foram compiladas (Figura 9) e mostraram diferentes intervalos de ruptura para cada material. Enquanto o solo rompeu entre 0,15 cm e 0,5 cm, as misturas apresentaram rupturas em diferentes intervalos, destacando-se a "primeira ruptura aparente" entre 0,02 cm e 0,1 cm para a mistura de 0,50%.

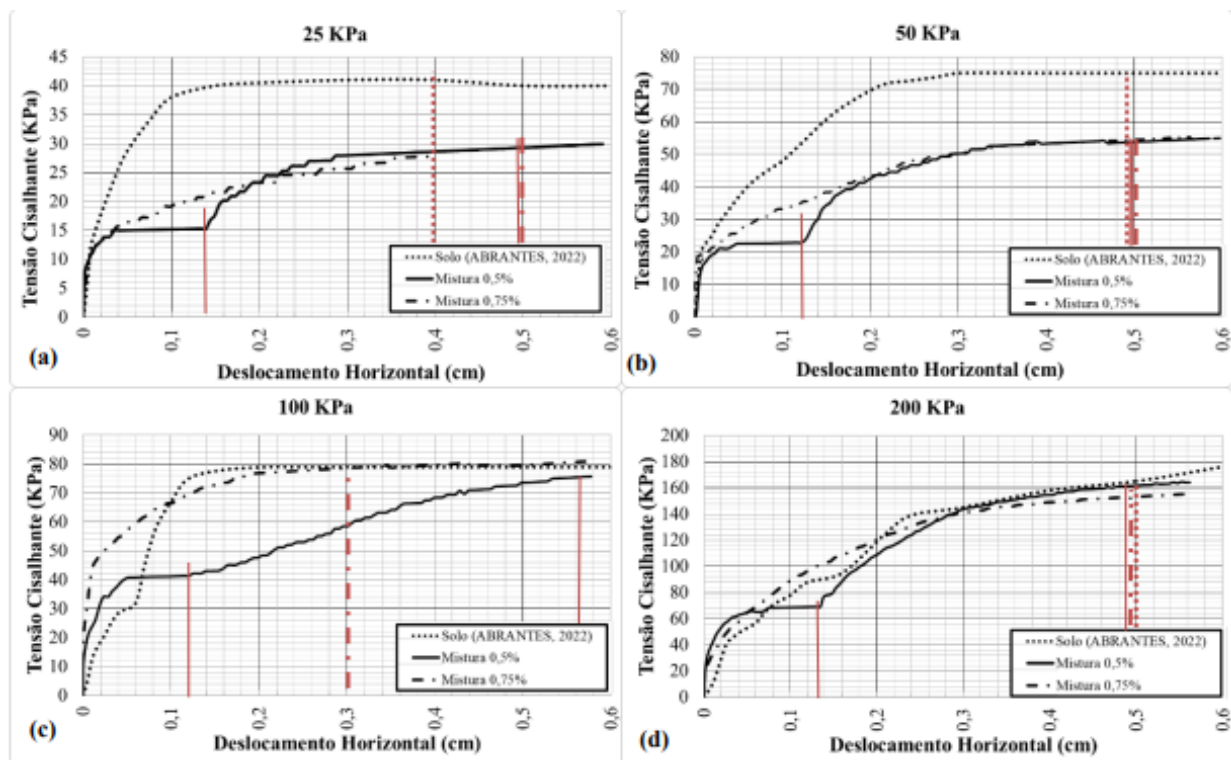


Figura 10 - Curva de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal das misturas e solo, para cada tensão normal investigada: (a) 25 kPa; (b) 50 kPa; (c) 100 kPa; (d) 200 kPa (Fonte: Autor, 2022)

3.2.2. Testes experimentais em CP's submetidos a uma mesma tensão normal e a diferentes valores de velocidade de cisalhamento

Dois corpos de prova (CPs) moldados para a mistura de 0,75% foram submetidos à tensão normal de 100 kPa e cisalhados para as velocidades de 0,1 mm/min e 0,05 mm/min, a fim de avaliar a influência da velocidade no comportamento da curva de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal. As curvas resultantes mostram um comportamento similar, com a curva correspondente à velocidade de 0,05 mm/min posicionando-se ligeiramente abaixo daquela de 0,1 mm/min. Ambas as curvas atingiram valores de tensões cisalhantes máximas próximas a 80 kPa (0,01 mm/min) e 70 kPa (0,05 mm/min), com uma redução de 12,50% da tensão cisalhante máxima com a diminuição da velocidade de cisalhamento.

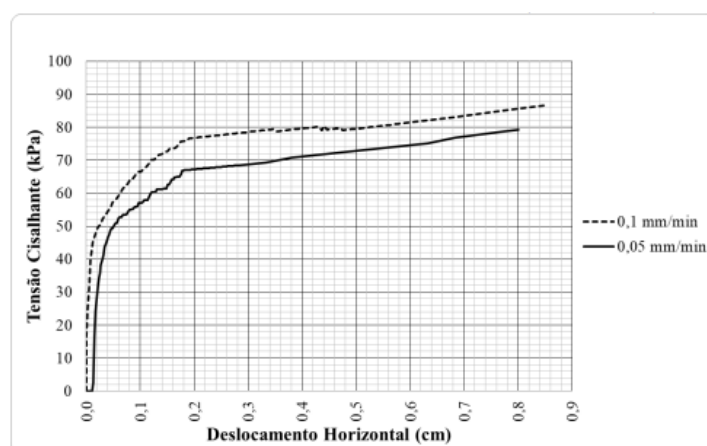


Figura 11 - Curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para os CP's submetidos à tensão normal de 100 kPa e às velocidades de cisalhamento de 0,1 mm/min e 0,05mm/min (Fonte: Autor, 2022)

3.3 Envoltórias de resistência

Analisando as envoltórias de resistência, observou-se que as misturas de 0,50% e 0,75% apresentaram traçados semelhantes, com valores próximos para o ângulo de atrito. No entanto, o intercepto coesivo foi ligeiramente maior para a mistura de 0,75%. Comparando com os resultados do solo, nota-se que a adição de fibras PRFV reduziu tanto o intercepto coesivo quanto o ângulo de atrito, em concordância com estudos anteriores de Santos et al. (2019), Feuerharmel (2000).

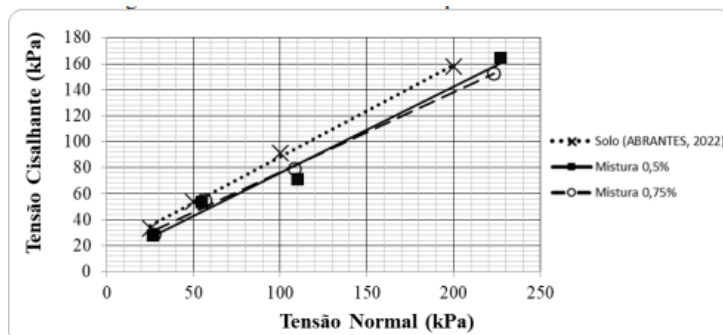


Figura 12 - Envoltórias de Resistência para o solo e misturas (Fonte: Autor, 2022)

Tabela 1. Valores dos parâmetros de resistência (ϕ' e c') para o solo e misturas (Autor, 2022)

Material	wótimo (%)	pd máx (g/cm ³)	ϕ' (°)	c' (kPa)
Solo (ABRANTES, comunicação pessoal, 20 de junho de 2023)	23,40	1,624	35,2	17,9
Mistura 0,50%	25,18	1,564	33,6	9,6
Mistura 0,75%	25,77	1,576	31,7	15

4. CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados obtidos para o solo e misturas solo-fibra PRFV, pôde-se inferir que:

Os CP's ensaiados para as misturas de 0,50% e 0,75% apresentaram dilatância, independente da tensão normal investigada.

Em relação à Resistência ao Cisalhamento Direto, observou-se que os valores de intercepto coesivo e ângulo de atrito foram menores para as misturas quando comparados àqueles do solo. O incremento de fibras PRFV ao solo levou à redução dos parâmetros de resistência, uma vez que podem acarretar na redução do contato grão a grão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) pelo apoio à realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira De Normas Técnicas (2016). NBR 6457: Amostra de solo: Preparação para ensaios de compactação e caracterização. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (2016). NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro.
- Associação Latino Americana De Materiais Compósitos (2012). Introdução aos Materiais Compósitos Termofixos. Associação Brasileira de Materiais Compósitos, São Paulo.
- ABRANTES, L. G. Estudos Geotécnicos de Misturas Solo-Borracha para Fins de Construção de Barreiras Sísmicas. Comunicação pessoal em data: 20 de junho de 2023.
- BOSCOV, M. E. G. (2008). Geotecnia Ambiental. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 248 p.
- FEUERHARMEL, M. R. (2000). Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, Porto Alegre, 133p.
- GARCÍA, S. (2009). Referencias históricas y evolución de los plásticos. Revista Iberoamericana de Polímeros, v. 10(1), p. 71-80.
- GUEDES PINTO, A. R. A. (2008). Fibras de curauá e sisal como reforço em matrizes de solo. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação do Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, 106p.
- HEINECK, K. S. (2002). Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 251p.
- MELO, J. A. P. (2020). Caracterização e determinação de parâmetros de compactação de misturas de solo argiloso laterítico com cinza de cavaco de eucalipto. Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, 84p.
- OLIVEIRA JUNIOR, M. R. (2014). Estabilidade de Talude do Campus da UFJF. Relatório de iniciação científica, Programa Jovens Talentos. Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 34p.
- ORTH, C. M.; BALDIN, N.; ZANOTELLI, C. T. (2012). Implicações do processo de fabricação do compósito plástico reforçado com fibra de vidro sobre o meio ambiente e a saúde do 76 trabalhador: o caso da indústria automobilística. Revista Produção Online, ABEPRO, Florianópolis, v.12 n. 2, 2012, p. 537-556.
- ROCHA, G. N.; CARVALHO JÚNIOR, F. H.; JUCÁ, J. F. T. (2019). Estudo da estabilidade de célula para viabilizar aumento de vida útil em aterro sanitário. VIII Congresso Brasileiro de Geossintéticos, Anais... São Paulo: EESC, p. 773-778.
- SILVA, I. N.; LEITE, M. L. (2015). Estudo da Erodibilidade de Solos por Ensaio Geotécnicos. Relatório de Pesquisa, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 70p.
- SANTOS, G. B. D.; SILVEIRA, M. R.; LODI, P. C.; GARCIA, R. R.; GIACOMETTI, W. B (2019). Avaliação da resistência mecânica de solo argiloso com inclusão de fibras de polipropileno. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 9., SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSINTÉTICOS, 8., 2019, São Carlos. Anais... São Carlos: [s.n.], 77, p. 411-417.