

**RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE UM SOLO ARGILOSO
REFORÇADO COM FIBRAS DE SISAL SUPERFICIALMENTE TRATADAS**

**SHEAR STRENGTH OF A ARGILOUS SOIL REINFORCED WITH
TREATED SISAL FIBER**

Santiago, Gislene, *REDEMAT/UFOP e IFMG, Ouro Preto, Brasil,*
gislene.santiago@yahoo.com.br

Botaro, Vagner, *UFSCar, Sorocaba, Brasil, vagner@power.ufscar.br*

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho é analisar o comportamento mecânico de um solo argiloso reforçado com a inclusão aleatória de fibras curtas de sisal superficialmente tratadas com CAP (cimento asfáltico de petróleo). As amostras de solo reforçado e não-reforçado foram submetidas aos ensaios de compactação e cisalhamento direto. Com base nestes experimentos, conclui-se que a adição destas fibras apresenta melhorias significativas nas propriedades mecânicas do solo estudado, gerando um compósito interessante para a engenharia geotécnica. O polímero utilizado se mostrou aplicável a análise proposta, promovendo a diminuição da absorção de água das fibras de sisal.

ABSTRACT

This work aims at characterizing geotechnically the mixture of sisal treated fibers with CAP, randomly distributed into the argilous soil. The non-reinforced and reinforced soil samples were subjected to compaction and direct shear tests. Based on the experiments conducted, the conclusion is that the addition of sisal treated fibers presented significant improvements in the mechanical properties of this soil. The polymer used was shown quite applied to the proposed analysis, promoting decrease of the water absorption of the sisal fibers.

1. INTRODUÇÃO

A técnica de reforço de solos através da inclusão de fibras de aço, vidro, borracha e de plástico tem sido estudada por vários pesquisadores (Gray e Ohashi 1983, Al-Refeai, 1986, Bueno et al. 1997, Consoli et al. 2002, 2003-a, 2006, 2007, Casagrande et al. 2002, 2006, 2007, Donato et al. 2004 e Trindade et al. 2005). Esses trabalhos têm mostrado como eficiente é a utilização de materiais fibrosos como reforço de solos, gerando um compósito bastante atraente para a Engenharia Geotécnica.

Na última década houve um rápido desenvolvimento na área de compósitos reforçados por fibras vegetais (Botaro et al. 2008). As fibras celulósicas possuem muitas características que tornam seu uso vantajoso como: baixo custo, baixa densidade, resistência específica e módulo elevados, não são abrasivas, não são tóxicas, podem ser facilmente modificadas por agentes químicos, são abundantes e provém de fontes renováveis. Suas propriedades mecânicas são comparáveis a de outros reforços comumente empregados. As fibras vegetais são bem mais baratas do que as fibras sintéticas e podem substituí-las em muitas aplicações. Dentre as fibras vegetais, o uso do sisal é particularmente interessante já que seus compósitos possuem elevada

resistência ao impacto além de moderada resistência à tração e em flexão quando comparados a compósitos reforçados por outras fibras vegetais (Kuruvilla et al. 2000).

A rápida absorção e desorção de água e a biodegradabilidade do sisal podem representar características negativas. Assim, um estudo do efeito do tratamento superficial nas fibras de sisal, visando diminuir sua higroscopicidade e aumentar sua durabilidade torna-se necessário para que essas fibras possam substituir com sucesso as fibras sintéticas.

O betume ou CAP (cimento asfáltico de petróleo), apresenta propriedades aglutinantes e impermeabilizantes, e possui características de flexibilidade, durabilidade e alta resistência à ação da maioria dos ácidos, sais e álcalis. O CAP normalmente utilizado em pavimentação no Brasil é o CAP 50/70, antes chamado de CAP 20.

Neste contexto, o objetivo do trabalho foi analisar geotecnicamente, em laboratório, misturas de um solo argiloso com fibras de sisal, distribuídas aleatoriamente e tratadas com CAP solubilizado, com vistas a aplicações em obras de Engenharia Civil.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Material Utilizado

Foi utilizado um solo laterítico, a partir de amostras deformadas coletadas do horizonte B de uma jazida situada às margens da rodovia MG 129 - Km130, no município de Antônio Pereira, MG, Brasil. A jazida escolhida apresenta um corte de aproximadamente 2,5m de altura, com perfil de horizonte B latossólico. Esse solo pode ser considerado como argiloso, de baixa plasticidade (LL=30,4% e IP=11,6%), com cerca de 78% das partículas passando na peneira 200 (<0,074 mm). O material pode ser classificado como CL no Sistema Unificado.

O reforço deste solo foi viabilizado mediante o emprego de fibras de sisal de distribuição aleatória, com diâmetro médio de 150µm, cortadas com guilhotina (do tipo empregado para corte de papel), em comprimentos de 10, 15, 20 e 25 mm. Estas fibras foram adquiridas no município de Cachoeira do Brumado, MG, na forma de fios. As fibras de comprimento 15mm foram impermeabilizadas com solução de CAP.

As amostras de solo, no estado natural (SN) e quando estabilizadas com fibras naturais e tratadas, foram caracterizadas geotecnicamente via ensaios de compactação e cisalhamento direto.

2.2 Preparação de Amostras e Programa de Ensaios

2.2.1 Impermeabilização das Fibras

Para diminuir a higroscopicidade das fibras de sisal e aumentar sua durabilidade, foi realizado um tratamento superficial com solução de CAP, visando sua aplicabilidade como elemento inibidor do processo de absorção de água. As fibras de sisal, depois de lavadas com água, secas ao ar e cortadas, foram modificadas superficialmente pela imersão nesta solução e a seguir levadas ao agitador (Máquina Fisaton) por 2 horas. O betume (CAP 50/70) foi aquecido a 150°C o tempo necessário para que se torne líquido e solubilizado em percloroetileno.

2.2.2 Ensaios de Compactação

Os ensaios de compactação foram realizados na energia do ensaio Proctor Normal, conforme metodologia descrita na norma NBR 7182 (1986), para fins de determinação do peso específico aparente seco máximo (γ_{dmax}) e da umidade ótima (wot) do solo estudado e de suas misturas com fibras de sisal com comprimentos de 10, 15, 20 e 25 mm. Os teores de fibras empregados foram de 0,25%; 0,50%; 0,75% e 1%, em relação ao peso de solo seco, ou seja, foram analisadas 16 misturas (4 percentuais x 4 comprimentos). Objetivou-se também, determinar o teor e comprimento ótimo de fibras (mistura ótima).

Adicionalmente aos ensaios realizados com as fibras no estado natural, foram realizados ensaios com fibras tratadas com solução de CAP, considerando-se a mistura ótima previamente determinada, (teor de fibras 0,50% e comprimento de 15 mm, amostra FST15-050). Este tipo de análise objetivou avaliar como o tratamento dado às fibras poderia reduzir o efeito da absorção de água bem como verificar a influência do tratamento na densidade seca da mistura.

2.2.3 Ensaios de Cisalhamento Direto

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados em amostras de solo não reforçado, e reforçado com fibras naturais e tratadas. Considerou-se teor de fibras 0,50% e comprimento de 15 mm, mistura ótima determinada nos ensaios de compactação. O material foi compactado com soquete em cinco camadas, sendo aplicados doze golpes por camada, num molde cilíndrico de 152 mm de diâmetro e 115 mm de altura, na energia do Proctor normal. A umidade de moldagem adotada foi 18,5% para as amostras SN e FST15-050 e 20% para a amostra FS15-050, pré-definidas nos ensaios de compactação. Utilizou-se a velocidade 0,04mm/min para todos os corpos de prova ensaiados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 mostra a análise superficial das fibras de sisal, natural e tratadas com CAP, por intermédio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), onde verifica-se claramente a deposição do filme polimérico sobre a superfície da fibra, indicando a eficiência da impermeabilização.

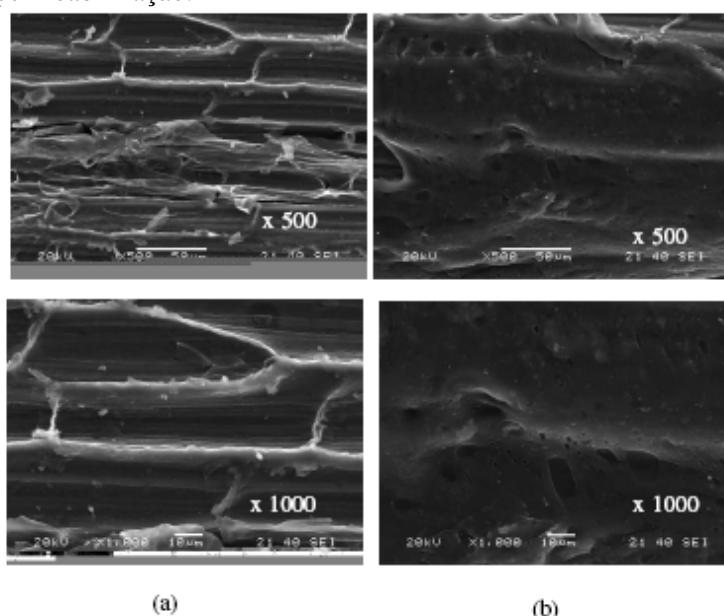


Figura 1 - MEV das Fibras Naturais (a) e Tratadas (b)

Os resultados obtidos nos ensaios de compactação permitiram avaliar o efeito da inclusão de fibras na estabilidade e na resistência mecânica do material.

A Figura 2 apresenta os resultados dos ensaios de compactação realizados para a mistura ótima com sisal natural e tratado, e do solo em seu estado natural, para efeito de comparação.

Observa-se nesta figura, um aumento do peso específico seco máximo para as amostras reforçadas em relação à amostra não reforçada, e ainda um pequeno aumento do peso específico seco máximo do fibrossolo com sisal tratado em relação ao fibrossolo com sisal natural. Pode ser verificado ainda que o tratamento proporcionou uma redução no valor do teor de umidade ótimo quando comparado com a fibra não tratada, evidenciando a eficiência da impermeabilização da fibra de sisal.

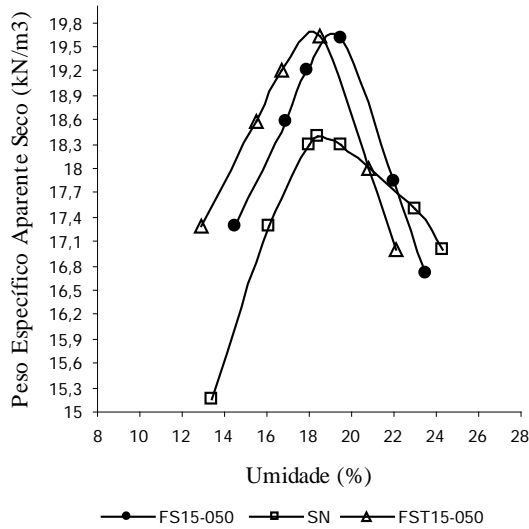


Figura 2 - Curvas de Compactação do Solo e das Misturas Solo-fibra 15 mm com Sisal Natural e Tratado

O Quadro 1 mostra os resultados dos ensaios de compactação para todas as misturas solo-fibra estudadas.

Quadro 1 - Umidade Ótima e Peso Específico Seco Máximo das misturas solo-fibra.

| Comprimentos | Teor de | Parâmetros | |
|--------------|-------------|-------------|--------------------------------------|
| | Fibra (%) | wot (%) | γ_{dmax} (kN/m ³) |
| 10 mm | 0,25 | 19,0 | 18,6 |
| | 0,50 | 19,4 | 18,9 |
| | 0,75 | 20,0 | 18,5 |
| | 1,0 | 20,5 | 18,5 |
| 15 mm | 0,25 | 19,0 | 19,0 |
| | 0,50 | 19,5 | 19,6 |
| | 0,75 | 20,0 | 18,6 |
| | 1,0 | 20,6 | 18,5 |
| 20 mm | 0,25 | 19,1 | 19,1 |
| | 0,50 | 19,6 | 19,2 |
| | 0,75 | 20,1 | 18,7 |
| | 1,0 | 20,6 | 18,4 |
| 25 mm | 0,25 | 19,1 | 19,0 |
| | 0,50 | 19,6 | 19,3 |
| | 0,75 | 20,2 | 18,5 |
| | 1,0 | 20,7 | 18,4 |

Observa-se neste quadro, que a adição de fibras, independente de seu comprimento ou porcentagem, proporcionou uma melhoria de desempenho do solo. Destaca-se a existência de uma condição ótima que forneceu um maior peso específico aparente seco máximo, referindo-se ao teor de fibras de 0,50% e um comprimento de 15 mm (amostra FS15-050).

As curvas relativas aos ensaios de cisalhamento direto realizados para as tensões normais 50, 100 e 200kPa nas amostras SN, FS15-050 e FST15-050, estão apresentadas nas Figuras 3, 4 e 5.

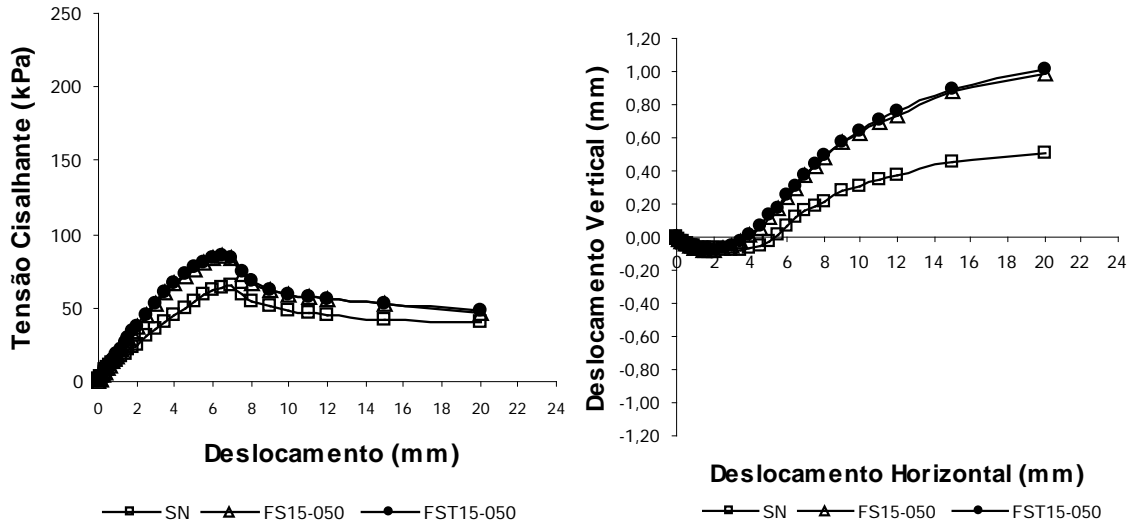


Figura 3 - Cisalhamento Direto ($\sigma=50\text{kPa}$)

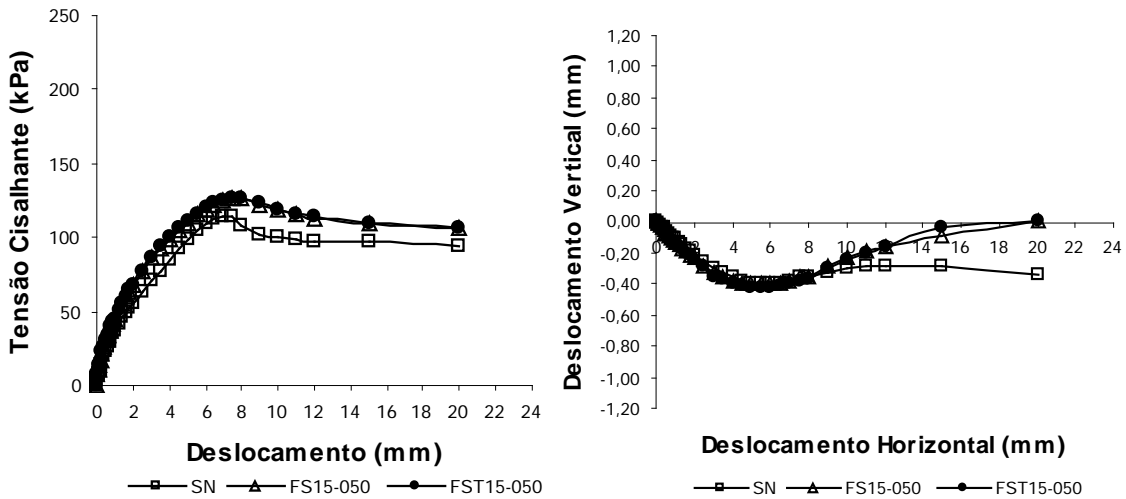


Figura 4 - Cisalhamento Direto ($\sigma=100\text{kPa}$)

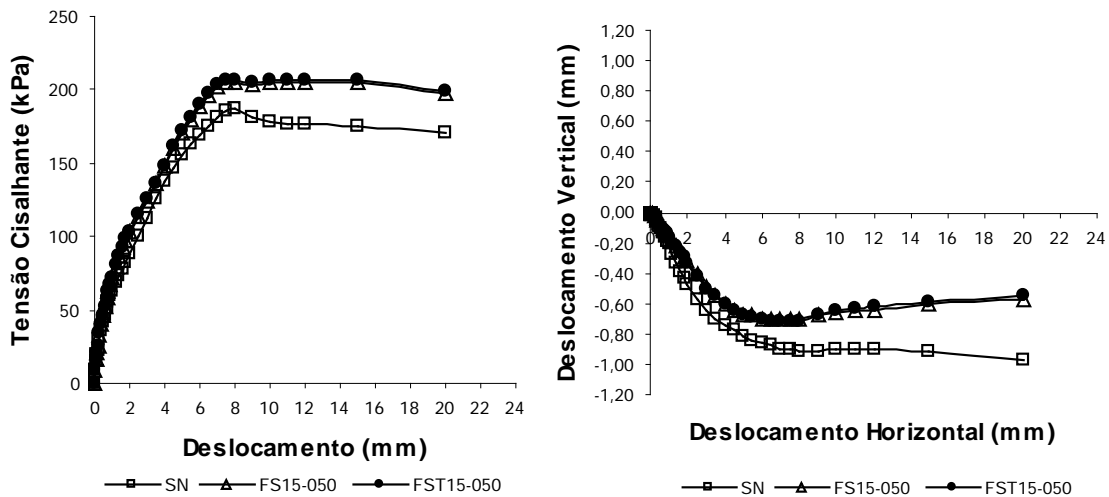


Figura 5 - Cisalhamento Direto ($\sigma=200\text{kPa}$)

Com base nesses resultados, avaliaram-se os parâmetros de resistência do material através do critério linear de Mohr-Coulomb. O Quadro 2 sistematiza os resultados obtidos, indicando os valores de tensão normal (σ), de cisalhamento na ruptura (τ_f), os ângulos de atrito (ϕ') e os interceptos de coesão (c').

Quadro 2 - Resultados dos Ensaio de Cisalhamento Direto

| Amostras | σ (kPa) | τ_f (kPa) | c' (kPa) | ϕ' (°) |
|-----------|-------------------|-------------------|---------------|----------------|
| SN | 50 | 64,73 | 28,46 | 38,84 |
| | 100 | 114,95 | | |
| | 200 | 187,49 | | |
| FS15-050 | 50 | 84,68 | 44,78 | 38,66 |
| | 100 | 127,97 | | |
| | 200 | 205,76 | | |
| FST15-050 | 50 | 85,32 | 45,70 | 38,80 |
| | 100 | 126,98 | | |
| | 200 | 206,22 | | |

Observa-se pelo Quadro 2, a comparação da resposta mecânica em termos de resistência ao cisalhamento do solo estudado e da mistura ótima solo-fibra natural e tratada, onde a inclusão das fibras promoveu ganho na resistência ao cisalhamento do solo, predominantemente no parâmetro coesão de intercepto.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados dos ensaios de compactação realizados no presente trabalho, determinou-se que o quantitativo e o comprimento ótimos de fibras de sisal para o solo em estudo foram, respectivamente, de 0,50% e 15 mm, sendo essa dosagem responsável por aumentos da ordem de 6,52% no peso específico seco máximo do solo.

Observou-se que o teor de umidade ótimo dos compósitos estudados aumentou com a adição de fibras. Este fato pode ser explicado pela higroscopicidade das fibras de sisal.

Com relação ao tratamento dado às fibras, observou-se uma excelente adesão do polímero sobre sua superfície, como mostram as micrografias apresentadas na Figura 1.

No que diz respeito à resistência ao cisalhamento do solo e a mistura solo-fibra, pôde-se verificar que a adição de 0,50% de fibras de 15 mm promoveu ganho notável no parâmetro coesão de intercepto da ordem de 57,34% para o fibrossolo com fibras naturais e 60,58% para o fibrossolo com fibras tratadas e, praticamente, não causou alterações no parâmetro ângulo de atrito interno.

A partir do estudo apresentado, pode-se então concluir que o reforço do solo laterítico com fibras de sisal impermeabilizadas com CAP solubilizado aumenta consideravelmente a sua resistência mecânica, podendo ele se tornar uma alternativa técnica de interesse para aplicação em obras de Engenharia Civil.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (1986). *Solo: ensaio de compactação – Procedimento, NBR 7182/86*, 10p.
- Al-Refeai, T.O. (1986). Behavior of granular soils reinforced with discrete randomly oriented inclusions, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 10, n.4, p. 319-333.
- Botaro, V. R. ; Nicolai, F. N. P.; Lins V. (2008). Effect of saline degradation on the mechanical properties of vinyl ester matrix composites reinforced with glass and natural fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 108, p. 2494-2502.
- Bueno, B.S e Lima, D.C. (1997). Uso de Fibras Plásticas para Reforço de Solos Compactados, *I Simpósio Internacional de Pavimentação de Rodovias de Baixo Volume de Tráfego*, Rio de Janeiro, 1997.
- Casagrande, M.D.T.; Consoli, N.C. (2002). Estudo do comportamento de um solo residual areno-siltoso reforçado com fibras de polipropileno, *Solos e Rochas: Revista Latino-Americana de Geotecnia*, Vol. 25, n.3, p. 223-230.
- Casagrande, M. D. T., Coop, M. R.; Consoli, N. C. (2006). The behavior of a fiber-reinforced bentonite at large shear displacements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 132, p. 1505-1508.
- Casagrande, M. D. T. ; Coop, M. R.; Consoli, N. C. (2007). Behavior of a fiber-reinforced bentonite at large shear displacements (discussion closure paper). *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 133, p. 1635-1636, 2007.
- Consoli, N.C.; Montardo, J.P.; Prietto, P.D.M.; Pasa, G.S. (2002). Engineering Behavior of a Sand Reinforced with Plastic Waste. *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, ASCE, Vol. 128, n. 6, p. 462-472.
- Consoli, N.C.; Vendruscolo, M.A.; Prietto, P.D.M. (2003-a). Behavior of Plate Load Tests on Soil Layers Improved with Cement and Fiber, *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, ASCE, Vol. 128, p. 96-101.
- Consoli, N. C. ; Casagrande, M. D. T. ; Thome, A. ; Rosa, F. D. (2006). Comportamento de placas apoiadas em areia reforçada com fibras: Influência da densidade relativa. *Solos e Rochas*, v. 29, p. 273-280.
- Consoli, N. C. ; Heineck, K. S. ; Casagrande, M. D. T. ; Coop, M. R. (2007). Shear strength behavior of fiber-reinforced soils considering triaxial tests under distinct stress paths. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 133, p. 1466-1469.
- Donato, M. ; Foppa, D.; Ceratti, J. A. P. ; Consoli, N. C. (2004). Fibras de polipropileno como reforço para materiais geotécnicos. *Solos e Rochas*, v. 27, n. 2, p. 161-176.

- Gray, D.H.; Ohashi, H. (1983). Mechanics of fibers reinforced in sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 109, n. 3, p.35-353.
- Kuruvilla, J.; Medeiros, E.; Carvalho, L.H. (2000). Compósitos de Matriz Poliéster Reforçados por Fibras Curtas de Sisal, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, Vol. X, n.4, p. 136-141.
- Trindade, T.P.; Iasbik, I.; Lima, D.C.; Bueno, B.S.; Minette E. (2005). Latossolo vermelho-amarelo reforçado com fibras de polipropileno de distribuição aleatória: estudo realizado com amostras de grandes dimensões, *REM - Revista Escola de Minas*, Vol. 58, n. 1, p.33-38.