

# Influência da Inserção de Fibras de Borracha de Pneu no Comportamento Mecânico de um Solo Arenoso

Natalia Andrea Durán Jaramillo

PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, nataliaaduranj@gmail.com

Michéle D. T. Casagrande

PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, michele\_casagrande@puc-rio.br

**RESUMO:** A destinação inadequada de pneus inservíveis constitui um passivo ambiental que resulta em sério risco ao meio ambiente e a saúde da população. No Brasil, a legislação ambiental estabelece que os fabricantes e importadores de pneus devem coletar e dar uma adequada disposição final a estes resíduos. Assim foi criado um sistema de empresas recicladoras de pneus que adotaram a técnica da trituração em diferentes granulometrias com o objetivo de satisfazer este requerimento e aproveitar a borracha de pneu em diversas aplicações. Na engenharia civil, existem situações em que os solos disponíveis no local da obra não atendem todas as exigências do projeto e tem-se como alternativa para viabilização do seu uso a melhora de suas propriedades. Sabe-se que as características de resistência e deformabilidade dos solos podem ser melhoradas devido as propriedades únicas da borracha de pneu entre as quais destacam-se sua alta compressibilidade e baixo peso específico. O presente estudo experimental visa determinar a influência da inserção de fibras de pneu no comportamento mecânico de um solo arenoso. A maioria das pesquisas já realizadas tem utilizado apenas a borracha em granulometrias mais finas (na faixa de tamanho de 2 mm até 6 mm). Com isso planteou-se a possibilidade de empregar fibras de borracha de pneu com comprimento médio de 10 mm. Como parte do programa experimental, as fibras de pneu e o solo puro foram individualmente caracterizados mediante análise granulométrica e determinação dos índices físicos. Em seguida ensaios triaxiais consolidados e isotropicamente drenados foram executados no solo puro e em misturas com 0%, 5% e 10% de fibra de pneu em relação ao peso do solo seco. Além disso, foi analisada a condutividade hidráulica no solo puro e nas misturas com o objetivo de estudar as alterações que ocorrem nesta propriedade pelo aumento do teor das fibras de pneu. Como resultado observou-se que a adição das fibras de borracha favoreceu as propriedades mecânicas e hidráulicas do solo provocando um incremento na coesão aparente e ângulo de atrito interno do solo, assim como também foram obtidos resultados satisfatórios nas medidas de condutividade hidráulica. Pelos resultados obtidos e devido ao baixo peso específico da borracha de pneu, considera-se que a sua utilização em obras geotécnicas, tais como aterros rodoviários, taludes artificiais, estruturas de contenção, entre outros, tem uma grande vantagem econômica e ambiental.

**PALAVRAS-CHAVE:** Reforço, solos, fibras, borracha de pneu.

## 1 INTRODUÇÃO

A gestão integrada dos resíduos sólidos e especialmente dos pneus inservíveis, tem exigido a implementação de tecnologias ambientalmente corretas com o objetivo de tornar o desenvolvimento da sociedade humana,

um processo sustentável. No Brasil, a Resolução CONAMA nº 416/2009 estabelece que, para cada pneu novo comercializado, as empresas fabricantes ou importadoras deverão dar destinação adequada a um pneu inservível (relação 1:1). Segundo o Relatório de Pneumáticos do ano 2015, o cumprimento da

meta nacional de destinação de pneumáticos inservíveis chegou a 97,6%, indicando que tanto fabricantes quanto importadores têm-se responsabilizado frente à problemática ligada a este tipo de resíduos. As práticas de destinação mais comuns são a utilização dos pneus inservíveis em fornos de clínquer como substituto parcial de combustíveis, (coprocessamento) e a fabricação de borracha moída em diferente granulometria, (granulação). Contudo, o emprego deste material como técnica de reforço de solos, continua sendo matéria de estudo.

Várias pesquisas internacionais têm estudado as possibilidades de utilizar pedaços de pneu em aplicações da engenharia civil tais como aterros rodoviários, camadas de aterros sanitários, aterros temporários e estruturas de contenção sob solos fracos.

Segundo Humphrey (1999), a utilização de chips de pneu em projetos de engenharia é viável devido a sua baixa densidade, alta durabilidade, alto isolamento térmico e em muitos casos, menor custo comparado com outros materiais.

Zornberg et al. (2004), avaliaram o efeito da adição de pedaços de pneu na resistência ao cisalhamento de um solo granular, com o fim de definir o teor ótimo e a melhor relação de aspecto (comprimento/largura), dos pedaços de pneu.

Özkul e Baykal (2007) estudaram o comportamento mecânico de compósitos de argila-fibra de borracha sob condição drenada e não drenada. Os resultados mostraram que a resistência pico das misturas são superiores a da argila pura quanto testadas a pressões confinantes efetivas na faixa de 200 – 300 kPa.

O presente trabalho visa determinar a influência da inserção de fibras de borracha de pneu com comprimento médio de 10 mm, no comportamento mecânico de uma areia, visando a valorização e uso deste tipo de resíduo na execução de obras de engenharia.

## 2 MATERIAIS

### 2.1 Solo

O solo utilizado neste trabalho, corresponde a uma areia fina, limpa e de granulometria uniforme. As amostras de areia foram coletadas em uma jazida localizada no município de Itaboraí/RJ. De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos solos (SUCS), as areias com menos de 5% de finos, apresentando  $C_u < 6$  e  $1 < C_c < 3$ , como o material em questão, são classificadas como SP.

Os índices físicos e curva granulométrica do solo arenoso são apresentados na Tabela 1 e na Figura 1, respectivamente.

Tabela 1. Índices físicos do solo arenoso.

| Índices Físicos                      | Solo Arenoso |
|--------------------------------------|--------------|
| Densidade real dos grãos (Gs)        | 2,65         |
| Coeficiente de uniformidade (Cu)     | 2,9          |
| Coeficiente de Curvatura (Cc)        | 1,0          |
| Diâmetro efetivo (D10)               | 0,238 mm     |
| Diâmetro médio (D50)                 | 0,60 mm      |
| Índice de vazios ( <i>e mínimo</i> ) | 0,71         |
| Índice de vazios ( <i>e máximo</i> ) | 0,96         |

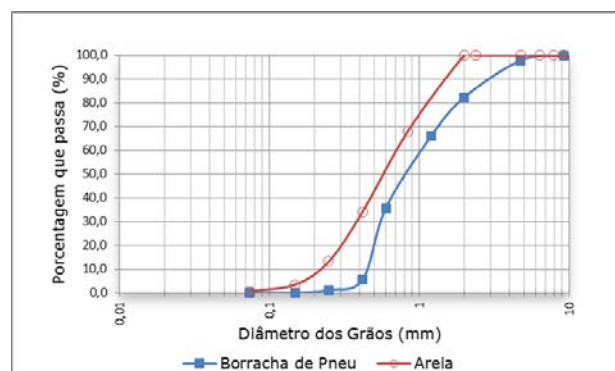


Figura 1. Curva granulométrica da areia e borracha de pneu.

### 2.2 Fibras de borracha de pneu

A borracha de pneu usada nesta pesquisa é proveniente da trituração de pneus inservíveis de caminhão. A borracha em raspa de pneus é coletada em moedoras mecânicas, passando por um processo de seleção e classificação do material. No laboratório, a borracha reciclada, é passada nas peneiras # 4 (4.75 mm) e # 10 (2.0 mm), fazendo uma analogia ao comportamento da borracha como um agregado graúdo. Em seguida é selecionada a borracha que ficou retida na malha de 2.0 mm, com a qual foi possível garantir que as fibras apresentassem um comprimento médio de 10 mm.

## 2.1 Misturas Solo – Fibras de borracha de pneu

Foram preparadas misturas com diferentes teores de fibras de borracha, com o objetivo de determinar o teor ótimo para inserção deste material como reforço. Os compósitos foram elaborados com teores de 5% e 10% de fibras de borracha de pneu em relação ao peso do solo seco.

## 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 3.1 Caracterização Física

Ensaio de caracterização foram executados para determinar as propriedades índice do solo arenoso. Foram determinados índice de vazios máximo ( $e_{\max}$ ), índice de vazios ( $e_{\min}$ ) e densidade real dos grãos ( $G_s$ ). A curva de distribuição granulométrica foi realizada com o objetivo de classificar o material de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS).

Os ensaios realizados seguiram os métodos indicados pelas seguintes normas:

- NBR 7181/1984 – Análise granulométrica
- NBR 6508/1984 – Determinação da densidade real dos grãos
- ABNT/MB 3388 – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos
- ABNT/MB 3324 – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos

### 3.2 Ensaio Triaxial Consolidado Isotropicamente Drenado (CID)

Ensaio triaxiais CID foram realizados no solo arenoso e nas misturas com 5% e 10% de fibras de borracha de pneu. A preparação dos corpos de prova do solo arenoso e misturas foi realizada por compactação diretamente dentro da membrana de borracha aderida a um molde cilíndrico tripartido com diâmetro de 4 cm e altura de 9,12 cm. A umidade e densidade

relativa adotadas foram de 10% e 50% respectivamente. Para cada mistura foram executados três ensaios triaxiais em diferentes níveis de tensão confinante efetiva.

Os corpos de prova foram saturados usando as técnicas de contrapressão e percolação de água através do corpo de prova. O grau de saturação foi estimado pelo parâmetro de Skempton, considerando-se saturado para valores maiores ou iguais a 0,96. De acordo com Head (1986), a máxima velocidade de deformação na fase de cisalhamento foi determinada usando a seguinte expressão:

$$V = \frac{E_F \cdot L}{100 T_F} \quad (1)$$

Em que  $V$  representa a velocidade máxima de cisalhamento em (mm/min),  $E_F$  a deformação axial estimada na ruptura em (%),  $L$  a altura do corpo de prova em (mm) e  $T_F$  o tempo mínimo de ruptura.

### 3.3 Condutividade Hidráulica

Concluído o processo de saturação de um corpo de prova instalado dentro da câmara triaxial, realizou-se uma percolação adicional para acompanhar os dados de vazão de água passando através do corpo de prova, com o fim de simular o ensaio de permeabilidade de carga constante no qual mantém-se um fluxo de água permanente e vertical, sob uma carga total constante, através do solo e mediu-se o volume de água que fluía por unidade de tempo. De acordo com a lei empírica de Darcy:

$$k = \frac{q \cdot l}{A \cdot h} \quad (2)$$

em que  $q$  é a vazão,  $A$  é a área da seção transversal de solo que corresponde ao fluxo  $q$ ,  $k$  é o coeficiente de condutividade hidráulica,  $h$  é a carga total e  $l$  o comprimento da amostra do solo.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISE

### 4.1 Ensaio Triaxial Consolidado Isotropicamente Drenado (CID)

A Figura 2a mostra o comportamento observado que a relação tensão deformação das misturas de solo – fibras de borracha. Observa-se que os compósitos se comportam da mesma maneira do que a areia pura, aumentando a resistência ao cisalhamento à medida que os corpos de prova são deformados, exceto quando são aplicadas baixas tensões de confinamento, onde ocorre uma leve queda na resistência após atingir um nível de deformação próximo de 10%. Com isto, verifica-se que a inserção das fibras de borracha de pneu, não provoca mudanças na rigidez da matriz do solo, mas sim influencia positivamente a resistência ao cisalhamento do solo. Ambos os teores de fibra de borracha adicionada ao solo puro, 5% e 10%, favoreceram as características de resistência do solo arenoso, excedendo o máximo valor de tensão desviadora registrado nos ensaios feitos com o solo puro.

Em todas as curvas tensão-deformação da areia reforçada, verifica-se um rápido crescimento na resistência do solo, especialmente quando empregasse o teor de 10% de fibra de borracha de pneu. No entanto, observa-se que no início do cisalhamento a mistura com 5% de fibra de borracha, apresenta uma menor deformação axial do que a mistura com 10% de fibra de borracha.

A Figura 2b, mostra a deformação volumétrica vs deformação axial dos corpos de prova elaborados com 0%, 5% e 10% de fibra de borracha de pneu. Neste gráfico evidencia-se que ao usar tensões de confinamento de baixas a moderadas (isto é 50 kPa a 100 kPa) no solo reforçado, os corpos de prova contraem-se apenas no início do cisalhamento e continuam dilatando até o fim do ensaio.

Özkul e Baykal (2007) indicam que dita contração inicial poderia ser o resultado de diferenças do conteúdo de água na matriz do compósito e/ou devido a compressão das fibras de borracha entre elas mesmas. Contudo, um corpo de prova feito sem reforço, submetido as mesmas tensões de confinamento, apresenta um

comportamento contrativo em toda a fase de cisalhamento.

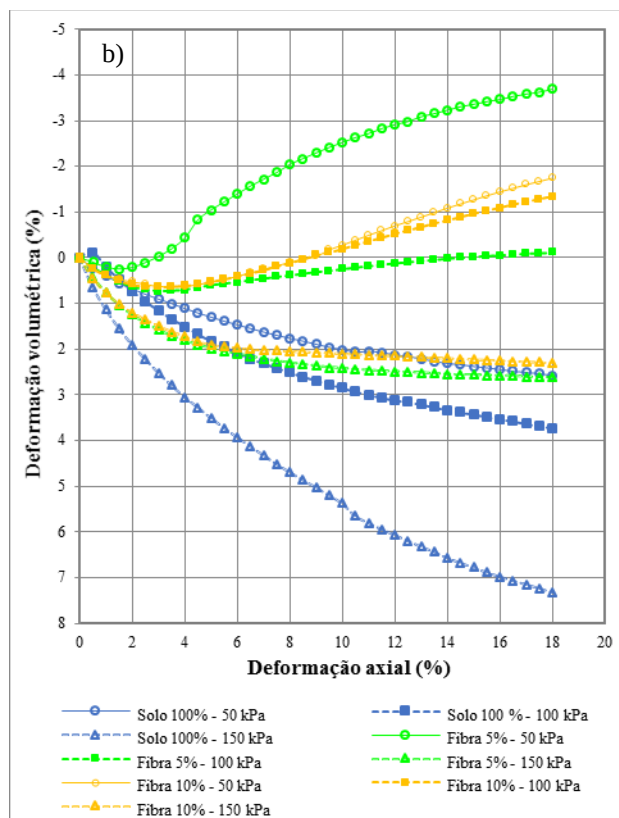
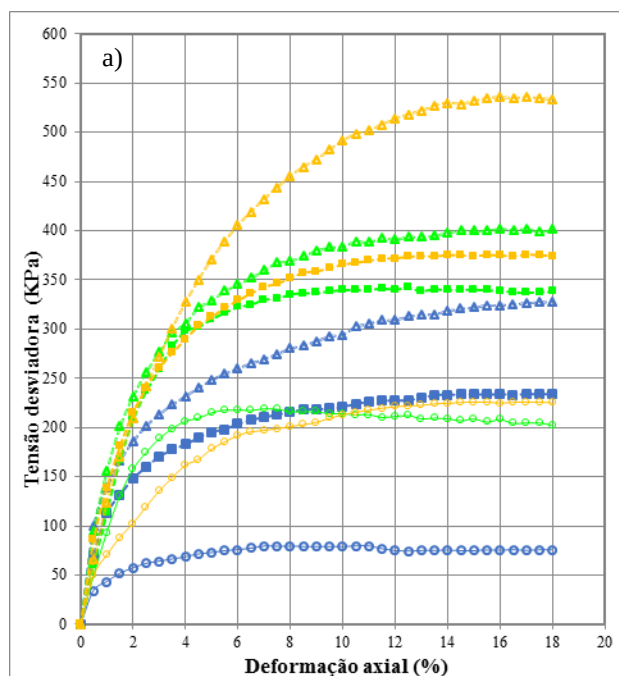


Figura 2. a) comportamento tensão-deformação das misturas de solo-fibra de pneu. b) deformação volumétrica vs deformação axial das misturas de solo-fibra de pneu.

Os compósitos ensaiados a uma tensão confinante efetiva de 150 kPa, apresentaram compressão durante todo o ensaio, porém, chegaram a menores níveis de deformação volumétrica em comparação com o solo puro.

#### 4.2 Envoltória de Mohr – Coulomb e Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento

As envoltórias de ruptura do solo puro e misturas plotadas no espaço  $p':q$ , são mostradas na Figura 3. Observa-se que todas as envoltórias apresentam um comportamento linear.

No solo arenoso foi encontrado um ângulo de atrito interno de  $31,50^\circ$  e intercepto coesivo nulo. Ao inserir 5% de fibra de borracha de pneu no solo puro, obtém-se um ângulo de atrito interno, de  $27,35^\circ$ , que é um valor inferior ao registrado no solo puro, porém, evidencia-se um aumento no intercepto coesivo, passando de 0 a 33,78 kPa, ou seja o solo apresenta um comportamento coesivo com a inserção de borracha.

Para a mistura com 10% de fibra de borracha de pneu, ambos os parâmetros de resistência registram valores acima dos obtidos no solo puro,  $36,29^\circ$  e 18,61 kPa respectivamente. No entanto observa-se que o intercepto coesivo diminuiu a metade em relação ao valor obtido para a mistura com 5% de fibra de borracha de pneu.

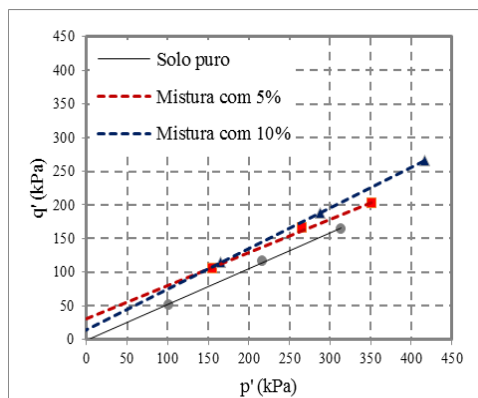


Figura 3. Envoltória e parâmetros de resistência do solo puro e misturas solo – fibra de borracha.

#### 4.3 Condutividade Hidráulica

O coeficiente de condutividade hidráulica (ou permeabilidade) depende principalmente do

tamanho médio dos poros, que, por sua vez, está relacionado com o tamanho das partículas (distribuição granulométrica), com a forma delas e com a estrutura do solo. Craig e Knappett (2012).

A partir da amostra do solo saturada, foram registradas as leituras do volume de água percolado num determinado tempo, no solo puro e misturas; utilizando-se a lei de Darcy, foram determinados os coeficientes de condutividade hidráulica mostrados na Tabela 2. Nota-se, que a medida que o teor de fibra de borracha é incrementado, acontece um aumento no coeficiente de condutividade hidráulica da areia, porém, o valor continua próximo ao coeficiente obtido para o solo puro.

Tabela 2. Valores de condutividade hidráulica do solo puro e misturas.

| Teor de fibra de borracha (%) | Condutividade hidráulica (m/s) |
|-------------------------------|--------------------------------|
| 0                             | $2,02 \times 10^{-5}$          |
| 5                             | $2,11 \times 10^{-5}$          |
| 10                            | $4,65 \times 10^{-5}$          |

#### CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo experimental sobre a viabilidade de uso do pneu reciclado como técnica de reforço de um solo arenoso. Com o fim desta pesquisa foi possível concluir que:

- O reforço causado pela adição das fibras de borracha de pneu no solo foi evidenciado com o aumento da resistência ao cisalhamento, atingindo valores mais altos quanto maior a tensão confinante efetiva imposta nos ensaios.
- O comportamento mecânico das misturas mostrou a tendência de melhorar a resistência ao cisalhamento com o aumento da porcentagem de fibra de borracha de pneu inserida no solo puro, evidenciado pelo aumento na coesão.
- Ajustando-se as envoltórias lineares do critério de ruptura de Mohr-Coulomb, foram obtidos, um ângulo de atrito interno máximo de  $36,29^\circ$  e intercepto coesivo de 18,61 kPa para a areia

reforçada com 10% de fibra de borracha, o que permite dizer que das misturas avaliadas, esta foi melhor de todas em relação aos parâmetros de resistência encontrados.

- A condutividade hidráulica da areia não sofreu uma alteração significativa com a adição das fibras de borracha.

## AGRADECIMENTOS

A Capes, CNPq pelo apoio financeiro prestado para a realização desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- ABNT:Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984d, 13 p.
- ABNT:Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6508: Graos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984c, 8 p.
- ABNT:Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12051. MB-3324: Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos. Rio de Janeiro, 1991c, 14 p.
- ABNT:Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12051. MB-3388: Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos. Rio de Janeiro, 1991c, 14 p.
- Head, K. (1986) *Manual of Soil Laboratory Testing: Effective Stress Test*, 2nd ed., Wiley, West Sussex, WS, England, 420 p.
- Humphrey, D. (1999) Civil engineering applications of tire shreds. *Proceedings of the Tire Industry Conference*, Hilton Head, South Carolina, USA, p. 1-16.
- Ibama. (2015) *Relatório de Pneumáticos Resolução CONAMA nº 416/09*, Diretoria de Qualidade Ambiental, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 75 p.
- Knappett, J.A. e Craig, R.F. (2012) *Craig Mecânica dos Solos*, 8 ed., LTC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 419 p.
- Özkul, Z.H. e Baykal, G. (2007). Shear Behavior of Compacted Rubber Fiber-Clay Composite in Drained and Undrained Loading, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 133, p. 767-781.
- Zornberg, J., Cabral, A., Viratjandr, C. (2004) Behavior of tire shred – sand mixtures, *Canadian Geotechnical Journal*, NRC, Vol. 41, p. 227-241.