

Investigação Sobre o Comportamento Geotécnico de Misturas de Solo com Resíduos de Pneus

Manuela Cassiano de Macedo

Universidade de Pernambuco-UPE, Recife, Brasil, mcm_pec@poli.br

Stela Fucale

Universidade de Pernambuco-UPE, Recife, Brasil, sfucale@yahoo.com.br

Silvio Romero de Melo Ferreira

Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, Recife, Brasil, sr.mf@hotmail.com

RESUMO: O fortalecimento de uma consciência ambiental junto à sociedade e a preocupação com o futuro do planeta proporcionou, nos últimos anos, um maior enfoque às questões relacionadas ao meio ambiente. Dentre elas, pode-se mencionar a gestão consciente de resíduos tais quais os pneus, que possuem uma configuração complexa devido a suas características físicas e químicas, exigindo um gerenciamento específico quanto a sua destinação final. Como alternativa para o prolongamento da vida útil e, conseqüentemente, o adiamento do descarte de pneus, surge o processo de recapagem, o qual também promove a produção de materiais residuais, denominados desbastes, que ainda não possuem uma destinação final adequada. Diante disso, este trabalho tem por objetivo analisar o comportamento geotécnico de um solo existente em área de morros do Recife-PE, a partir da inserção de resíduos provenientes da atividade de recapagem de pneu, por meio de misturas com teores de 10 e 30% em relação ao peso do solo seco. Desta forma, foram feitos ensaios de caracterização física (análise granulométrica, limites de liquidez e de plasticidade, peso específico dos grãos e ensaios de compactação) e mecânica (ensaios de cisalhamento direto), sendo realizados tanto no solo quanto nos resíduos de pneus e nas misturas predeterminadas, a fim de se conhecer as características individuais destes materiais e avaliar possíveis alterações deste resíduo nas propriedades do solo. A partir dos resultados obtidos foi possível perceber que tanto o solo quanto os resíduos de pneus possuem uma distribuição granulométrica predominantemente arenosa. Nos ensaios de compactação verificou-se que as misturas solo-pneus proporcionaram uma gradativa diminuição no peso específico seco máximo em relação ao solo puro a partir do aumento do teor de resíduos. Para os ensaios de cisalhamento foi observado que o solo apresentou um comportamento de resistência de pico, diferentemente das misturas que mostraram uma tendência de crescimento de resistência ao longo do deslocamento horizontal, comportamento plástico com endurecimento, mais precisamente nas tensões de consolidação de 150 kPa e 200 kPa, demonstrando a influência das tensões aplicadas e dos deslocamentos efetuados nos resultados obtidos. Com isso, busca-se ter um conhecimento mais aprofundado em relação a inserção destes resíduos ao solo.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduo de pneus, Melhoramento do solo, Comportamento Geotécnico.

1 INTRODUÇÃO

Índices cada vez mais alarmantes reafirmam dia após dia a crise ambiental instalada mundialmente, fazendo com que mudanças urgentes sejam necessárias e pondo no centro

das discussões as questões relacionadas ao meio ambiente. Sem dúvida a gestão adequada de resíduos sólidos se configura como um dos pontos de grande preocupação devido aos prejuízos gerados direta e indiretamente ao espaço urbano e a saúde pública.

Inserido neste contexto, está a questão relacionada aos pneus inservíveis que apresentam uma configuração complexa devido às suas características físicas e químicas. O pneu é um elemento que acompanha a sociedade desde o início da era automotiva. Contudo, apenas recentemente entrou na pauta de discussões devido aos efeitos nocivos provenientes de seu descarte inadequado.

Sabe-se que a geração mundial de pneus inservíveis vem aumentando em ritmo acelerado, de modo geral, fruto da expansão da indústria automobilística. Em 2009 constatou-se que, em média, no mundo, um total de 3 bilhões de pneus inservíveis foram depositados de forma ilegal no meio ambiente (WANG *et al.*, 2009). Dessa forma, a disposição destes resíduos vem tornando-se um enorme problema nos centros urbanos. A fim de regulamentar o descarte deste tipo de resíduo, foi aprovada no Brasil a Resolução nº 416/09 do CONAMA (BRASIL, 2009), que tem por objetivo dispor sobre a destinação final de forma ambientalmente adequada e segura dos pneumáticos.

Como opção viável para diminuição no volume de pneus descartados, a recapagem de pneus surge prolongando a vida útil dos pneumáticos. Entretanto, é válido salientar que mesmo tal atividade causa a produção de resíduos, conhecidos como desbastes, sem ainda uma destinação específica adequada.

Assim sendo, várias pesquisas vem sendo feitas a fim de dar novos usos a estes resíduos, dentre elas a possibilidade de aplicação em obras geotécnicas como material alternativo para melhoramento do solo, tema abordado por diversos autores (ATTOM, 2006; CETIN *et al.*, 2006; OIKONOMOU & MAVRIDOU, 2009; HAZARIKA *et al.*, 2010; TAPAS & BALESHWAR, 2013). De acordo com Tapas & Baleshwar (2013), os pneus possuem propriedades que tornam seu uso viável, pois têm alta resistência, elevada durabilidade, baixo custo e uma menor densidade relativa a outros materiais, podendo ser utilizado tanto inteiro, aos pedaços ou triturados, sozinhos ou misturados ao solo.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental da pesquisa dividiu-se em três etapas. A primeira etapa consistiu na coleta e preparação dos materiais; a segunda correspondeu a caracterização física tanto das amostras individualmente quanto das misturas solo-pneu; e, por fim, a terceira compreendeu a execução de ensaios de cisalhamento direto.

2.1 Coleta de Materiais

2.1.1 Solo

O solo utilizado no presente estudo foi obtido no bairro denominado Nova Descoberta em Recife-PE, mais precisamente na encosta do Alto Reservatório, área que possui histórico significativo de deslizamentos e se configura por apresentar uma ocupação desordenada sem qualquer planejamento urbano, provocando alterações tais como cortes e aterros com ausência de critérios técnicos, promovendo e fortalecendo com isso os problemas de erosão e deslizamentos já existentes.

Sendo assim, foram coletados aproximadamente 200 kg de solo, localizados próximos à superfície do terreno, sendo, então, acondicionados em sacos plásticos para evitar a perda do material mais fino e alocados, posteriormente, para sacos de ráfia que foram transportados para o Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (POLI/UPE).

2.1.2 Resíduo de pneus

O resíduo de pneus adotado nesta pesquisa consiste em um subproduto resultante do processo de recapagem de pneus, mais conhecido como desbastes, ou seja, fibras de borracha de pneus que normalmente são descartadas. Este material foi adquirido de uma empresa renovadora de pneus, localizada no município de Jaboatão dos Guararapes - PE.

Foram coletados 80 Kg de resíduos que foram acondicionados em sacos plásticos e levados para o LMS-POLI/UPE. A amostra caracteriza-se por apresentar uma estrutura isenta de materiais têxteis e tiras de aço sendo constituída apenas pela borracha, possuindo um

formato alongado que se assemelha às fibras comumente utilizadas em projetos geotécnicos, como pode ser observado na Figura 1.



Figura 1. Amostra de resíduos de pneus coletada

2.2 Ensaios de caracterização física

Para conhecimento das características físicas do solo, do resíduo de pneus, assim como das misturas foram realizados diversos ensaios de acordo com as propriedades de cada material, dentre eles:

- Análise Granulométrica – NBR 7181 (ABNT, 1984a);
- Limite de Liquidez – NBR 6459 (ABNT, 1984b);
- Limite de Plasticidade – NBR 7180 (ABNT, 1984c);
- Massa Específica dos grãos – NBR 6508 (ABNT, 1984d); e
- Compactação NBR 7182 (ABNT, 1986).

Para realização dos ensaios predeterminados nesta pesquisa, os materiais passaram por uma preparação prévia. Dessa forma, as amostras foram secas ao ar e posteriormente foram passadas na peneira nº 4 (4,8 mm) para retirada de possíveis grãos com tamanhos maiores. Em seguida, as misturas foram preparadas. Na Tabela 1 apresenta-se a identificação das amostras estudadas, assim como as proporções das misturas.

Tabela 1. Misturas preparadas para pesquisa

Mistura	Solo (%)	Resíduo de pneu (%)
Solo	100	0
S90P10	90	10
S70P30	70	30
Pneu	0	100

2.3 Ensaios de Cisalhamento Direto

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados tanto na matriz do solo natural quanto nas misturas de solo-pneu preestabelecidas. A velocidade foi calculada de modo que em 3h de ensaio fosse alcançado 15mm de deslocamento horizontal, assim sendo a velocidade média padrão determinada para o ensaio foi de 0,083 mm/min.

Adotou-se o ensaio rápido adensado, tomando-se como parâmetro de compactação das amostras a umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo, com a aplicação das tensões de 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa e 200 kPa.

É válido salientar que as amostras de solo-pneu possuem um grande volume devido às características físicas da fibra de pneu. Assim sendo, foram encontradas dificuldades na moldagem dos corpos de prova diretamente na caixa de cisalhamento, desta forma houve a necessidade de se projetar um molde com tamanho compatível com as dimensões internas da caixa, permitindo a transferência deste material para a mesma.

O procedimento para a confecção destes corpos de prova se deu da seguinte forma: primeiramente as amostras foram preparadas de acordo a porcentagem de fibras, homogeneizadas e adicionadas água até alcançar a umidade ótima. Posteriormente, foi calculada a quantidade em peso de amostra necessária de acordo com o volume do molde, o peso específico aparente seco máximo do material e a umidade ótima. De posse deste valor, este foi dividido em duas camadas como procedimento para facilitar a moldagem, resultando em corpos de prova de 101,6 mm x 101,6 mm e 40 mm de altura.

3 RESULTADOS

3.1 Análise Granulométrica

Na Figura 2 são apresentadas as curvas granulométricas tanto para as amostras puras (solo e fibra de pneu) quanto para as misturas solo-pneu. Percebe-se que, de modo geral, as amostras possuem uma distribuição de suas partículas predominantemente compreendidas entre as frações de 4,8 mm e 0,05 mm, o que correspondente a areia. O solo apresenta 80% de seus grãos delimitadas dentro desta faixa, enquanto que os resíduos de pneus 99,23%. Quanto às misturas, observa-se uma visível distinção entre estas a medida que se aumenta o teor de resíduo de pneus, tornando-se mais granular, comportamento esperado devido às dimensões das fibras.

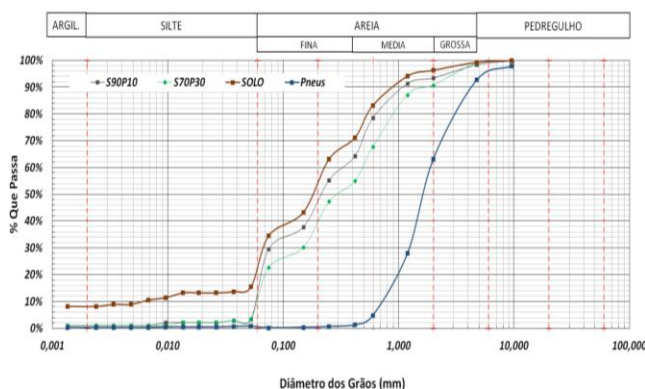


Figura 2. Curvas granulométricas das amostras e misturas solo-pneu

3.2 Densidade Real dos Grãos

Analizando-se os resultados do ensaio de densidade real, observou-se que o solo apresenta uma densidade real dos grãos de 2,66. Para o resíduo de pneu o valor encontrado foi de 1,08, resultado típico esperado para o material. Em relação às misturas de solo-pneu com 10% e 30% de resíduo, percebe-se que estas possuem uma tendência na diminuição da densidade a partir da adição das fibras de pneus ao solo, apresentado respectivamente os resultados de 2,46 e 2,16, comportamento compatível devido às características do material que possuem uma densidade bastante inferior ao solo.

3.3 Limites de Consistência

No que se refere aos ensaios de limite de consistência, o solo demonstrou um comportamento fracamente plástico segundo o índice de plasticidade apresentado um valor de 6,14. A fibra de pneu devido a sua estrutura, assim como as mistura solo-pneu não apresentam LL, LP e LC.

3.4 Compactação

As curvas de compactação do solo e das misturas solo-pneu são apresentadas na Figura 3. Vale salientar que para os resíduos de pneu puro não foi possível realizar o ensaio devido às características do material. Para o solo obteve-se umidade ótima de 15% e peso específico aparente seco máximo de 18,8 kN/m³.

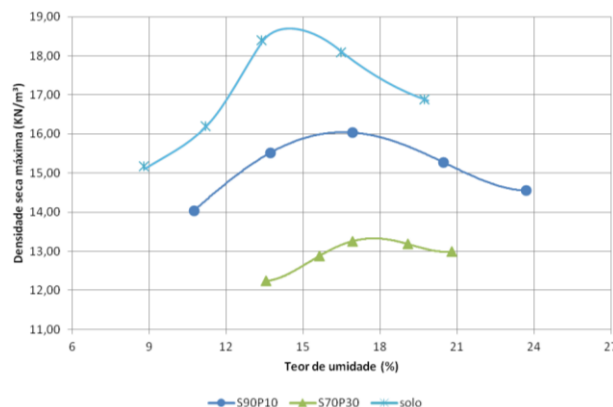


Figura 3. Curvas de compactação do solo e das misturas Solo-pneu

Avaliando-se as curvas de compactação para as misturas de solo com resíduos de pneus, observa-se uma clara distinção entre as amostras, com o efeito da diminuição do peso específico a medida que é adicionado mais resíduos. Comportamento semelhante foi observado nos estudos de Franco (2012), que apresentou uma variação de 18,8 kN/m³ para 12,2 kN/m³ em relação a amostra de solo puro e a mistura solo-pneu na proporção de 50% de resíduo de pneus

3.5 Resistência ao Cisalhamento

Para o ensaio de cisalhamento direto são apresentadas as curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal assim como o deslocamento vertical versus o deslocamento horizontal, tanto para o solo natural quanto para

as misturas do solo com os diferentes teores de resíduo, conforme Figuras 4, 5 e 6. Com isso é possível observar o efeito da inserção das fibras de pneu ao solo.

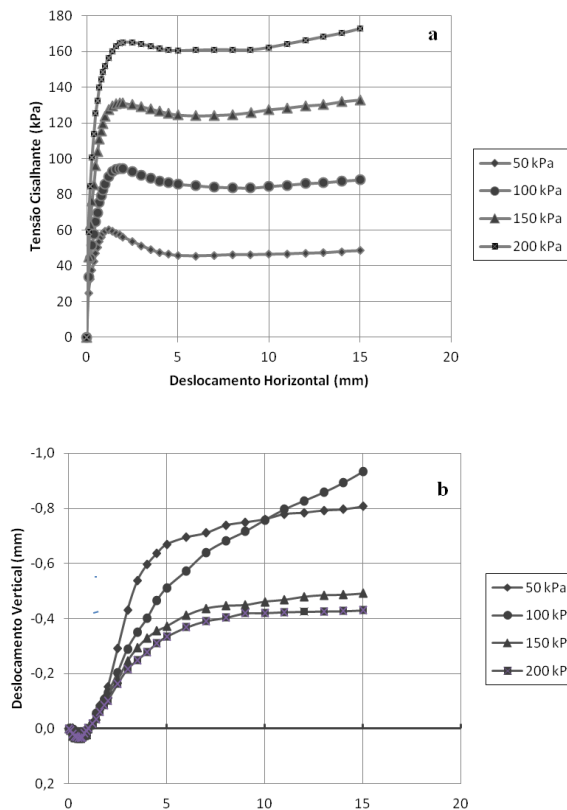


Figura 4. Tensão Cisalhante versus Deslocamento Vertical (a); Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal (b) - Solo.

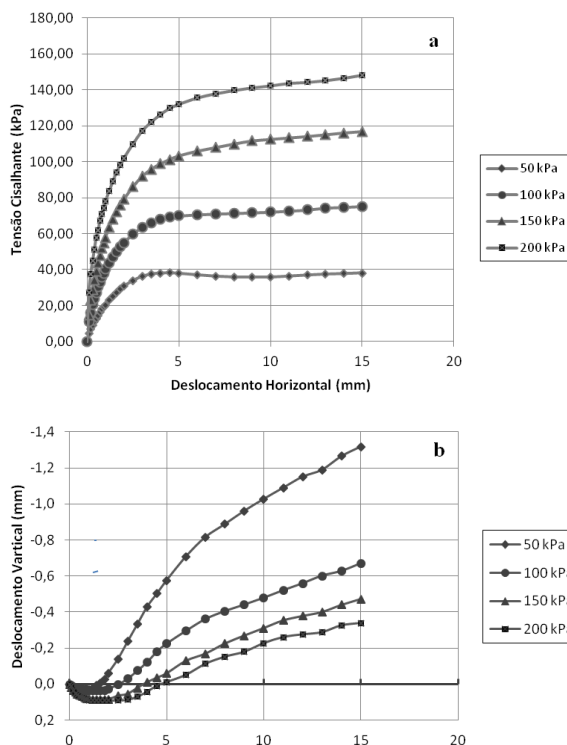


Figura 5. Tensão Cisalhante versus Deslocamento Vertical (a); Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal (b) - Solo com 10% de resíduos.

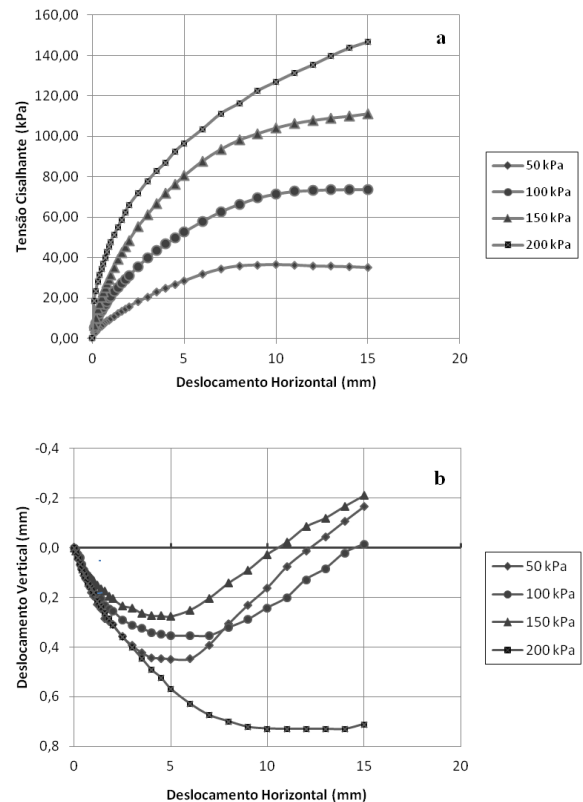


Figura 6. Tensão Cisalhante versus Deslocamento Vertical (a); Deslocamento Vertical versus Deslocamento Horizontal (b) - Solo com 30% de resíduos.

Analisando-se as curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, percebe-se que o solo apresenta um comportamento de pico definido indicando um acréscimo da tensão cisalhante até cerca de 2 mm de deslocamento horizontal, para todas as tensões normais aplicadas, e um decréscimo a partir deste percurso. É válido salientar que a partir de 10mm ocorre “falso” acréscimo de resistência ocasionado pelo efeito de rotação das tensões principais que por vezes ocorre durante o ensaio de cisalhamento.

Para as misturas tanto com 10% quanto com 30% de resíduos, o desenvolvimento da curva tensão cisalhante versus deslocamento horizontal é modificado quando comparado ao solo, apresentado um aumento de resistência ao longo do deslocamento horizontal. Percebe-se que para as tensões de 50 kPa e 100 kPa ocorre em certo ponto a estabilização ou uma pequena diminuição da resistência pós-pico

demonstrando um comportamento elasto-plástico.

Para as tensões de consolidação mais altas, 150 kPa e 200 kPa, observa-se que as misturas demonstram uma ausência de comportamento de pico, visualizando-se um crescimento da tensão cisalhante durante o deslocamento horizontal, indicando um comportamento plástico com endurecimento.

Em relação às curvas de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, percebe-se que o solo durante o deslocamento horizontal até no máximo 2 mm possui um comportamento de compressão e em seguida apresenta uma dilatância para todas as tensões normais aplicadas.

Para a mistura com 10% de resíduo, observa-se que o efeito de compressão aumenta proporcionalmente com a tensão aplicada, numa faixa que vai de 2 mm a 5 mm, sendo posteriormente dilatante.

O solo com 30% de resíduo, a compressão é mais expressiva até cerca de 6 mm apresentando dilatância a partir deste percurso, excetuando-se a tensão normal de 200 kPa, em que se observa um gradual aumento da compressão ao longo do deslocamento horizontal sem tão pouco apresentar dilatância.

Em relação as envoltórias de resistência, estas são apresentadas nas Figuras 7, 8 e 9 para os valores máximos de resistência do solo e das misturas, como também para os níveis de deslocamento de 5 mm e 10 mm a fim de se observar o efeito das fibras ao longo do deslocamento horizontal.

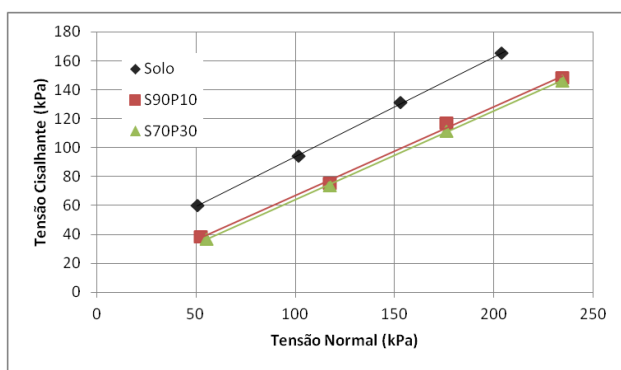


Figura 7. Envoltórias para valores máximos de resistência

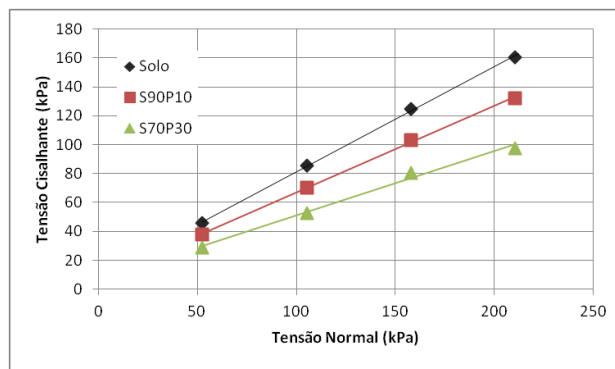


Figura 8. Envoltórias de resistência para deslocamento horizontal de 5 mm

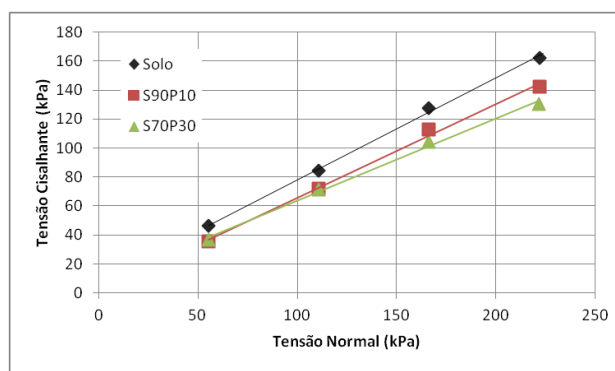


Figura 9. Envoltórias de resistência para deslocamento horizontal de 10 mm

Na Tabela 2 são indicados os parâmetros de resistência de acordo com os dados obtidos nas envoltórias de resistência máxima, e deslocamentos de 5 mm e 10 mm. É válido salientar que para as curvas com ausência de pico definido, o critério de ruptura adotado foi a partir do ponto em que a curva apresenta uma razoável inclinação constante como mostrado na Figura 10.

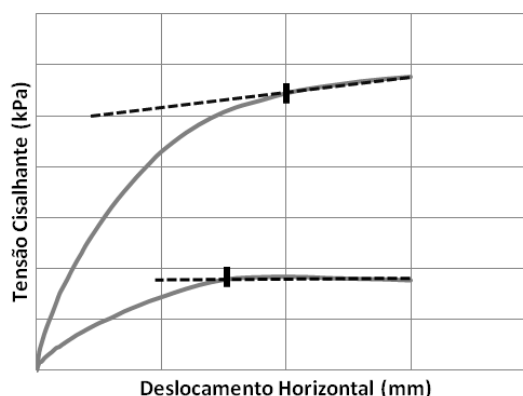


Figura 10. Definição da tensão de cisalhamento de ruptura (DE CAMPOS & CARRILLO, 1995)

Tabela 2. Valores de coesão e ângulo de atrito para a resistência máxima e os diferentes níveis de deslocamento do solo e das misturas

Material	Parâmetros Adotados		Deslocamento 5 mm		Deslocamento 10 mm	
	c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Solo	25,00	34	8,42	36	7,46	35
S90P10	5,15	32	6,77	31	0,67	33
S70P30	3,90	31	6,19	24	7,10	30

Analisando-se as envoltórias e os parâmetros de resistência obtidos percebe-se que, de modo geral, para os valores máximos de resistência, o ângulo de atrito do solo em relação as misturas não houve alterações expressivas. Do contrário, a coesão demonstrou uma diminuição de valor, influenciada de certo modo pelo resíduo, seja pela heterogeneidade do material que apresenta formas diversificadas; seja pela transformação do solo em uma matriz mais granular a partir da inserção das fibras.

Em relação aos valores encontrados para os diferentes níveis de deslocamento horizontal, foi observado que o desenvolvimento do percurso não proporcionou para a mistura com 10% de resíduos uma constância de crescimento dos parâmetros de resistência havendo um decréscimo da coesão, ao passo que o ângulo de atrito apresentou um discreto aumento. Diferentemente da mistura com 30% de resíduos que demonstrou uma tendência de crescimento dos parâmetros a partir do deslocamento horizontal.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As propriedades físicas do solo são significativamente alteradas com a inserção do resíduo de pneus. Observa-se que as misturas tornam-se mais granulares a medida que o teor de resíduos é aumentado. Outro aspecto modificado é a densidade destas amostras que diminuem proporcionalmente ao aumento da porcentagem das fibras, o que proporciona também mudanças quanto à compactação resultando na diminuição do peso específico aparente seco máximo das misturas devido a quantidade de fibras de pneus inseridas.

Quanto ao cisalhamento direto, percebe-se que as limitações dos mecanismos do ensaio influenciam diretamente nos resultados. O

limite de deslocamento da caixa de cisalhamento não permite o conhecimento da resistência máxima das misturas, principalmente para as tensões de 150 kPa e 200 kPa.

Observa-se também que a mobilização das fibras sofre influências durante o ensaio, exigindo tensões e deslocamentos maiores para obtenção de resultados mais expressivos.

Percebe-se com isso uma tendência de acréscimo de resistência a partir da inserção do resíduo de pneu ao solo. Todavia, há a necessidade de um maior aprofundamento quanto aos resultados e uma complementariedade de outros ensaios para se obter a real dinâmica dessas fibras junto ao solo.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao grupo AMBITEC – Grupo de Pesquisa em Engenharia Aplicada ao Meio Ambiente – da Escola Politécnica de Pernambuco/Universidade de Pernambuco e ao CNPq, por financiar esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984a). Solo: Análise Granulométrica. *NBR 7181*. Rio de Janeiro, 10p.
- _____(1984b). Solo: Determinação do Limite de Liquidez. *NBR 6459*. Rio de Janeiro, 10p.
- _____(1984c). Solo: Determinação do Limite de Plasticidade. *NBR 7180*. Rio de Janeiro, 10p.
- _____(1984d). Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica. *NBR 7181*. Rio de Janeiro, 10p.
- _____(1986). Solos: Ensaio de Compactação. *NBR 7182*. Rio de Janeiro, 10p.
- Attom, M. F. (2006). The Use of Shredded Waste Tires to Improve the Geotechnical Engineering Properties of Sands. *Environmental geology*, v. 49, n. 4, p. 497-503.
- Brasil. Ministério do Meio Ambiente (2009). Resolução CONAMA 416, de 30 de setembro de 2009. Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília.
- Cetin, H.; Fener, M.; Gunaydin, O. (2006). Geotechnical Properties of Tire-cohesive Clayey Soil Mixtures as a Fill Material. *Engineering Geology*, v. 88, n. 1, p. 110-120.

- De Campos, T. M. P.; Carrillo, C. W. (1995). Direct Shear Testing on an Unsaturated Soil from Rio de Janeiro. In: *Proceeding of the First International Conference on Unsaturated Soils/ UNSAT'95/Paris/France/6-8 September 1995*. Vol. 1.
- Franco, K. L. B. (2012). *Caracterização d Comportamento Geotécnico de Misturas de Resíduo de Pneus e Solo Laterítico*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 139 p.
- Hazirika, H. et al. (2010). Multifaceted Potentials of Tire-derived Three Dimensional Geosynthetics in Geotechnical Applications and their Evaluation. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 28, n. 3, p. 303-315.
- Oikonomou, N.; Mavridou, S. (2009). The Use of Waste Tyre Rubber in Civil Engineering Works. *Sustainability of Construction Materials*, v.9, p. 213-238.
- Tapas, D.; baleshwar, S. (2013). Benefits and impacts of scrap tyre use in geotechnical engineering. *Journal of Environmental Research And Development*, v. 7, n. 3, p. 1262-1271.
- Wang, H.; et al. (2010). Review of Waste Tire Reuse & Recycling in China – current situation, problems countermeasures. *Advances in Natural Science*, v. 2, n. 1, p. 31-39.