

Mecanismo de Ruptura de Reforço de Solos com Pneus

Denise M. S. Gerscovich

Departamento de Estruturas e Fundações, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Alberto S. F. J. Sayão e Fernando A. F. do Valle

Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, RJ, Brasil

RESUMO: Pneus usados constituem-se em uma matéria-prima abundante e de custo reduzido. A técnica de utilização de pneus em obras geotécnicas vem sendo difundida no Brasil desde meados dos anos 90. No caso de utilização como elemento de reforço, os pneus (cortados ou inteiros) podem ser dispostos em plano horizontal e amarrados entre si, formando uma malha de reforço. A sobrecarga atuando no reforço provém do confinamento provocado pela altura do aterro de solo, construído sobre a malha de pneus. Os resultados de campanha de ensaios de arrancamento em malhas de pneus, instrumentadas, possibilitaram a idealização do mecanismo de ruptura por arrancamento. Os resultados foram comparados com proposições de outros autores e se mostraram adequados para a campanha realizada.

PALAVRAS-CHAVE: pneus, solo reforçado, ensaio de arrancamento.

1 INTRODUÇÃO

A introdução de elementos resistentes no solo, com certa orientação, é uma maneira eficaz de melhorar as características de um maciço, aumentando assim sua resistência e diminuindo sua deformabilidade. O princípio básico de solos reforçados consiste na transferência de esforços atuantes no maciço para os elementos de reforço.

Pneus usados são resíduos urbanos, produzidos e descartados em grandes quantidades, particularmente em regiões densamente ocupadas. Na engenharia, a reutilização de pneus inteiros ou processados, surge como uma opção cada vez mais incentivada. Em obras de contenção, os pneus podem ser amarrados, dispostos em camadas horizontais e preenchidos com solo. Este conjunto produz um material capaz de suportar altas tensões trativas no plano horizontal. Uma das bandas laterais pode ser removida, facilitando o processo de preenchimento interno com solo.

O projeto de uma estrutura de solo reforçado requer o conhecimento da resistência na interface solo – reforço. Esta interação depende

basicamente das propriedades físicas do solo e das do reforço. No caso de pneus, os mecanismos de interação são constituídos pelo atrito entre o solo confinado no interior do pneu em relação às camadas superior e inferior, atrito entre a superfície lateral dos pneus e o solo e a resistência passiva a qual é mobilizada ao longo da superfície do reforço, normal à direção da força de arrancamento. A parcela de contribuição de cada um destes fenômenos é dependente não apenas da máxima força passiva e de atrito que poderá ser mobilizada, como principalmente do deslocamento relativo solo-reforço, necessário para mobilizar cada uma destas parcelas.

Há na literatura algumas proposições para estimativa da resistência ao arrancamento por unidade de largura de reforços O'Shaughnessy (1997) observou que, no caso de pneus, há predominância dos mecanismos de atrito, em razão da falta de elementos transversais. Sob condições drenadas, o autor propôs uma estimativa da resistência unitária ao arrancamento para reforços com pneus (P_r), dada por:

$$P_r = \frac{5}{3} \cdot \alpha_b \cdot \tan \phi' \cdot \sigma'_v \cdot L_e \quad (1)$$

onde α_b = coeficiente de aderência, dado pela relação entre a área de contato do reforço e a área total; ϕ' = coeficiente de atrito efetivo do solo. L_e = comprimento efetivo do reforço na zona resistente (situada além da superfície potencial de ruptura); σ'_v = tensão vertical efetiva na superfície do reforço;

O presente trabalho tem por objetivo sugerir metodologia para avaliação da resistência ao arrancamento de malhas de pneus. Esta foi baseada em resultados de ensaios de arrancamento no campo, com medidas de deslocamento interno..

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A campanha de ensaios de arrancamento de pneus foi executada em área localizada em Jacarepaguá, zona oeste do município do Rio de Janeiro. Foram utilizados pneus de automóveis, já desgastados, sem mais utilidade para uso como elementos de rodagem. A Figura 1 ilustra o sistema de arrancamento utilizado para a execução dos ensaios.

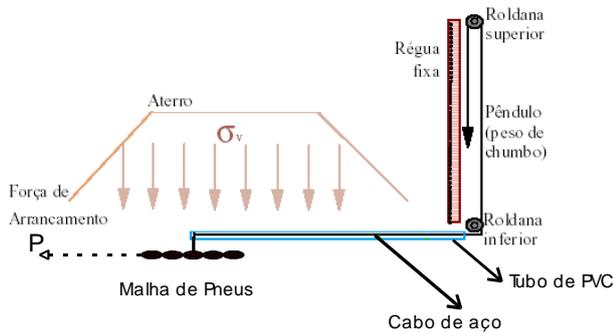


Figura 1 - Sistema de arrancamento e de medição de deslocamentos internos

O aterro foi executado com uma areia quartzosa grossa a média (SW). A compactação do solo foi executada manualmente. O índice de vazios (e) do solo arenoso compactado foi de 0,71 e o peso específico total igual a $16,8 \text{ kN/m}^3$. Resultados de ensaios de cisalhamento direto forneceram $c'=0$ e $\phi'=36,2^\circ$, para a faixa de umidade de campo.

As alturas de sobrecarga variaram de 0,5m a 2,5m, correspondendo a tensões verticais de confinamento entre 8,4kPa e 42kPa.

O deslocamento horizontal da linha frontal de pneus foi monitorado através de uma fita milimetrada. Os deslocamentos internos foram

medidos através de *tell-tails*, posicionados em até 3 pontos na malha de pneus (Figura 1). A Figura 2 mostra a localização dos *tell-tails* nas diversas configurações de malha de pneus.

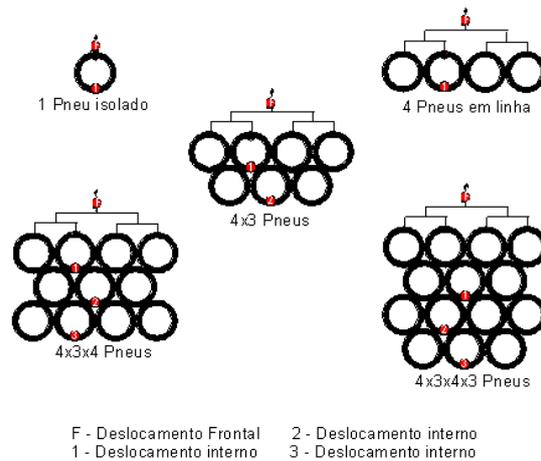


Figura 2 - Posicionamento dos medidores internos (*tell-tails*) nas diferentes configurações de malhas de pneus

Resultados de carga de arrancamento, normalizados em função da altura de sobrecarga, estão mostrados na Figura 3. Nesta figura, apresentam-se, também, os resultados de O'Schaughnessy e Garga (2000). Verifica-se que, independente do solo utilizado, as curvas convergem assintoticamente para um valor aproximado de 6 kN/pneu.

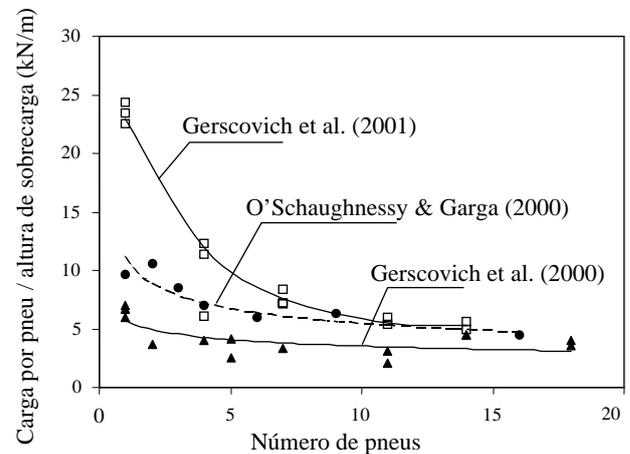


Figura 3 - Carga por pneu normalizada em relação a altura de sobrecarga

Maiores detalhes sobre os ensaios podem ser encontrados em Valle (2004), Gerscovich et al. (2001) e Gerscovich et al. (2000).

2.1 Medidas de deslocamento

A Figura 4 mostra a mobilização dos deslocamentos internos em um ensaio de arrancamento. Verifica-se que a ruptura ocorre para diferentes valores de deslocamentos internos. Quanto mais próximo do ponto de aplicação da força de arrancamento, maior é o deslocamento interno medido. Isto mostra que a malha se deforma não uniformemente durante o arrancamento. Há uma distribuição decrescente de deformações, desde o elemento frontal (mais próximo ao ponto de aplicação do esforço de arrancamento) até o mais distante.

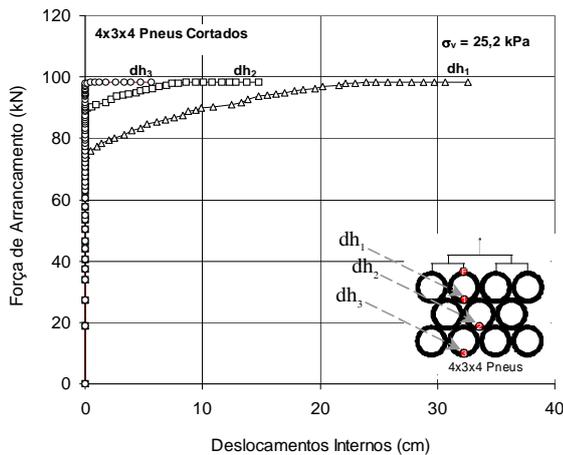


Figura 4 - Força de arrancamento vs deslocamentos internos: 4x3x4 pneus cortados sob σ'_v de 25,2 kPa

Observando os deslocamentos internos em função do deslocamento frontal (Figura 5), verifica-se que o deslocamento do ponto 1 (dh_1) tem início após o deslocamento frontal (dh_f) ultrapassar 20cm. Os deslocamentos frontais são observados logo no início do ensaio, sem que haja nenhuma medição de deslocamento interno. Isto evidencia que os pneus da primeira linha estão se deformando para posteriormente sofrerem deslizamento. Após este processo ocorre a mobilização da segunda linha de pneus. Comportamento semelhante é observado nos demais pontos internos (2 e 3).

Quando a curva dh_1 segue paralela à curva dh_f , (Figura 5), não ocorrem deformações e sim deslocamentos de corpo rígido. Com isso, as distâncias entre as curvas servem também para indicar a magnitude das deformações sofridas entre os pontos de medição (“tell-tail”).

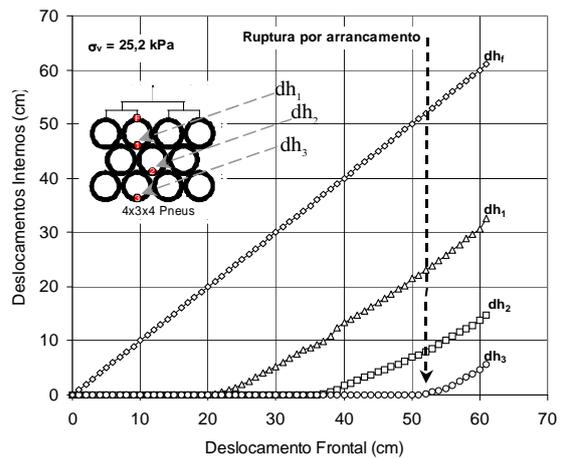


Figura 5 - Deslocamentos internos em malhas de 4x3x4 pneus cortados sob σ'_v de 25,2 kPa

A Figura 6 apresenta os deslocamentos internos, medidos no instante da ruptura, em função da posição do “tell-tail”, para duas condições de sobrecarga. Os resultados mostram a não linearidade da distribuição dos deslocamentos internos e o seu decréscimo com o aumento da distância entre o ponto de medição e o de aplicação da força.

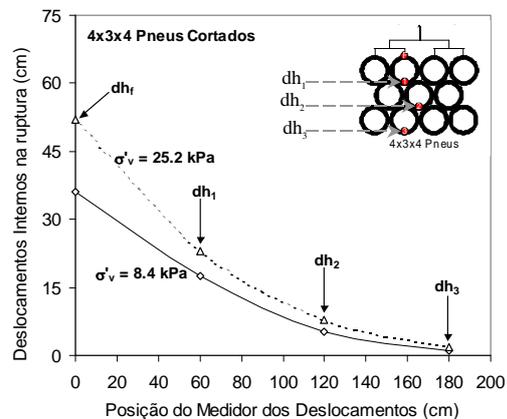


Figura 6 - Deslocamentos internos na ruptura: 4x3x4 pneus cortados

A Figura 7 mostra resultados de ensaios, cuja configuração da malha inclui 4 pneus na 1ª. linha. Nesta figura, estão assinalados os deslocamentos internos (δ_{in}) na ruptura fornecidos pelos “tell-tails”. Os índices $i=1, 2$ e 3 correspondem ao instante em que ocorreu o início de mobilização da linha ($i+1$) e os índices $n=a, b$ e c correspondem às diferentes configurações de pneus. Assim sendo, δ_{1b} indica o instante da ruptura para a 1ª linha de pneus da configuração b . Neste instante, inicia-se a mobilização da 2ª linha. Os resultados

mostram que a mobilização integral da 1ª linha, ocorre para valores de força de arrancamento e de deslocamento frontal, da ordem de 72kN e 19cm respectivamente; independente da configuração da malha de pneus. No instante da ruptura da 2ª linha, verifica-se uma força de arrancamento de aproximadamente 88 kN e um deslocamento frontal da ordem de 35 cm.

Comportamento semelhante foi observado para as demais malhas de pneus, com exceção do ensaio realizado com um único pneu isolado.

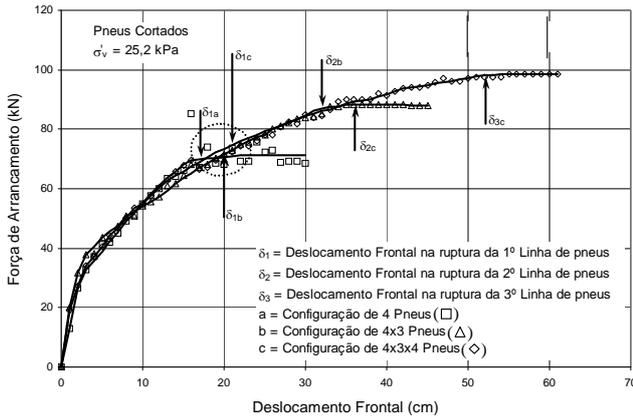


Figura 7 - Força de arrancamento vs deslocamento frontal para diversas malhas de pneus cortados sob σ'_v de 25,2kPa

3 MECANISMO DE ARRANCAMENTO

O mecanismo de arrancamento observado nos ensaios está esquematicamente representado na Figura 8. O ponto P_i indica a força de arrancamento responsável pela ruptura da linha i e δ_i o deslocamento correspondente. A força de arrancamento responsável pela ruptura da linha $i+1$ é dada pela diferença entre P_{i+1} e P_i , ou seja, ΔP_{i+1} . Analogamente, o acréscimo de deslocamento frontal até ocorrer a ruptura, é dado pela diferença entre δ_{i+1} e δ_i , ou seja, $\Delta \delta_{i+1}$.

Com base no comportamento da força de arrancamento e do deslocamento por linha de pneus, foram determinados os valores de ΔP_i associados à ruptura. Os resultados estão apresentados na Figura 9, em função da distância de embutimento do ponto de medição. Nesta figura, estão relacionadas duas malhas de 4x3x4x3 pneus inteiros e cortados, sob tensão vertical confinante de 16,8 e 25,2kPa, respectivamente. Observa-se que a força de

arrancamento necessária para romper a 1ª linha de pneus (distância de embutimento de 60cm) é significativamente superior à necessária para romper as linhas subsequentes. A partir da 2ª linha de pneus, as parcelas de força de arrancamento (ΔP) são aproximadamente constantes, da ordem de 15kN, independente da configuração da malha de pneus.

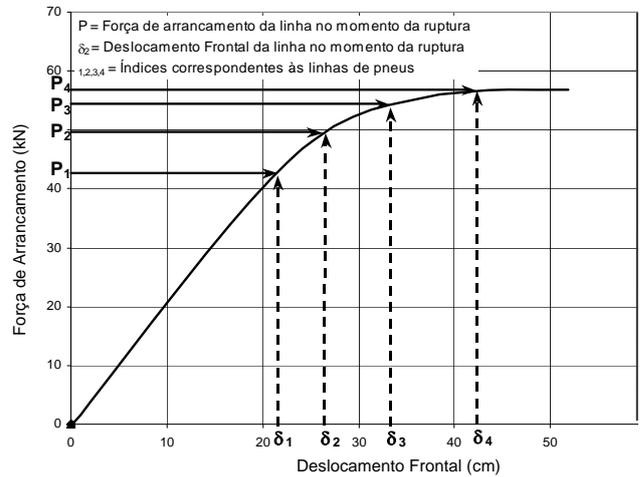


Figura 8 - Esquema das parcelas de força e deslocamento frontal na ruptura

A redução da força de arrancamento, necessária para provocar a ruptura das linhas subsequentes à primeira, pode ser atribuída ao efeito do empuxo passivo do solo, atuante somente na 1ª linha de pneus. Este empuxo é proveniente da presença de uma cunha frontal de solo à frente da malha de pneus. Adicionalmente, é possível que o amolgamento gerado durante o processo de mobilização progressiva das linhas de pneus contribua com uma redução nos parâmetros de resistência nos contatos solo-solo e solo-pneu.

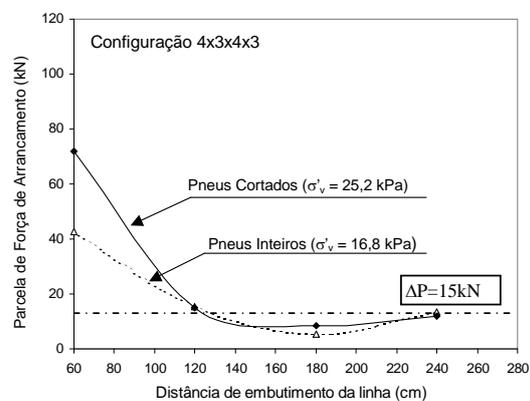


Figura 9 - Parcela de força de arrancamento por linha de pneu na ruptura vs distância de embutimento

3.1 Mobilização de Esforços

Com base na consideração de ruptura progressiva da malha de pneus, foi idealizado um mecanismo de mobilização de forças nos pneus durante o arrancamento, constituído de três parcelas de esforços, como ilustra a Figura 10.

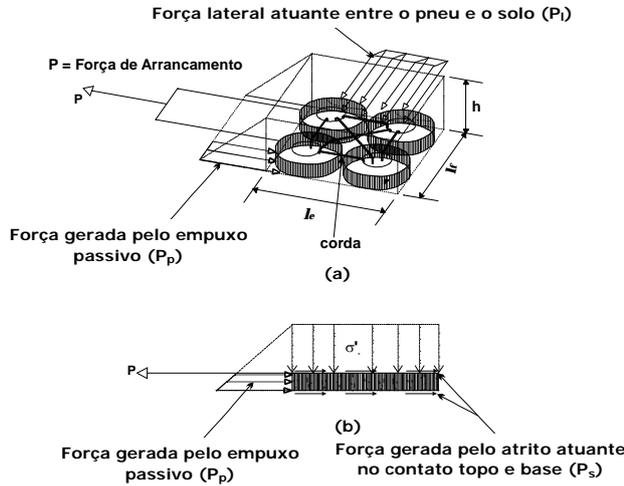


Figura 10 - Esquema das forças atuantes na malha de pneus

Para a primeira linha da malha de pneus, considera-se que as três parcelas de esforços contribuem para a resistência P_1 ; isto é

$$P_1 = P_p + 2P_l + 2P_s \quad (2)$$

onde P_p = força gerada pelo empuxo passivo na cunha frontal de solo; P_l = Força lateral gerada pelo atrito lateral; P_s = Força gerada no contato topo e base.

Nas linhas subsequentes não há contribuição empuxo passivo, isto é:

$$P_{i+1} = 2P_l + 2P_s \quad (3)$$

A parcela relativa ao empuxo passivo (Figura 10) pode ser estimada pela teoria de Rankine e a resultante expressa por:

$$P_p = \left\{ \left[\frac{1}{2} \cdot k_p \cdot \gamma_t \cdot (2h - h_p) \right] \cdot h_p \right\} \times \left\{ n_{pt} \cdot d_p \right\} \quad (4)$$

onde: k_p = coeficiente de empuxo passivo; γ_t = peso específico total; h = altura do aterro; h_p = altura do pneu. n_{pt} = número de pneus transversais ao arrancamento; d_p = diâmetro do pneu.

A componente da força lateral (Figura 10) atuante entre a lateral do pneu e o solo (P_l) pode também ser estimada pela teoria de Rankine e definida como:

$$P_l = \left\{ \left[\frac{1}{2} \cdot k_a \cdot \gamma_t \cdot (2h - h_p) \right] \cdot h_p \right\} \times \left\{ n_{pl} \cdot d_p \right\} \times \tan \delta \quad (5)$$

onde: k_a = coeficiente de empuxo ativo; γ_t = peso específico total; h = altura do aterro; h_p = altura do pneu; l_l = comprimento lateral da linha de pneus; δ = ângulo de atrito na interface solo-pneu n_{pl} = número de pneus longitudinais ao arrancamento; d_p = diâmetro do pneu. Como a sollicitação ao arrancamento ocorre progressivamente por linha de pneus n_{pl} é igual a 1.

A parcela P_s (Figura 10), composta pelo atrito proveniente do contato solo-solo contido na região interna do pneu com o solo circundante, pode ser determinada de acordo com a equação:

$$P_s = \left\{ \gamma_t \cdot h \right\} \times \left\{ l_f \cdot l_l \right\} \cdot \tan \delta \quad (6)$$

onde: γ_t = peso específico; h = altura do aterro; l_l = comprimento lateral da linha de pneus; l_f = comprimento frontal da linha de pneus; δ = ângulo de atrito na interface solo-pneu.

4 VERIFICAÇÃO DO MECANISMO

Com base no mecanismo de arrancamento proposto, a estimativa do ângulo de atrito na interface solo-pneu (δ) pôde ser feita independentemente para cada linha transversal de pneus.

A partir dos resultados experimentais, obtêm-se as parcelas de resistência atribuídas a cada linha transversal de pneus (ΔP_i) e com as eq. 2 a 6 estimam-se os valores de δ . Os resultados obtidos para todas as linhas de pneus cortados e inteiros e níveis de confinamento estão mostrados na Figura 11. Os pneus cortados apresentam valores de tangente (δ) levemente superiores aos inteiros, comprovando que a remoção de uma das bandas laterais do pneu gera um reforço ligeiramente mais resistente. Observa-se, também, a diminuição

de tangente (δ) de acordo com o crescimento de linha de pneus. Isto pode estar relacionado ao fato da resistência unitária ao arrancamento do pneu tender assintoticamente para um valor constante.

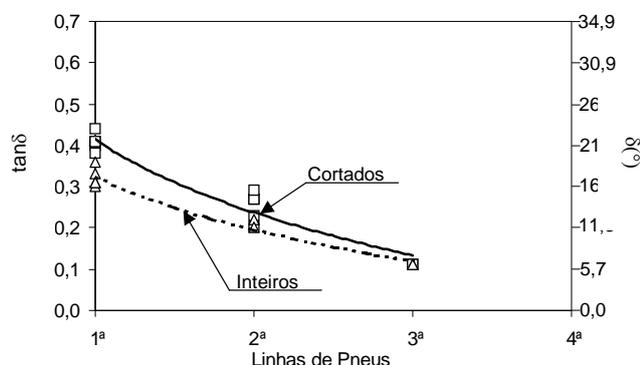


Figura 11 - Variação ângulo de atrito na interface solo-pneu (δ) por linhas de pneus

A aplicabilidade do mecanismo de transferência de carga, foi testada a partir da estimativa das forças de arrancamento para níveis de sobrecargas de 25,2kPa e 42kPa, tomando-se como base os resultados obtidos para a tensão confinante de 16,8kPa. Os resultados dos ensaios de arrancamento para $\sigma_v = 16,8\text{kPa}$ forneceram valores médios de $\tan \delta$ iguais a 0,33; 0,22 e 0,11, para a 1ª, 2ª e 3ª linhas, respectivamente. Os resultados desta extrapolação estão apresentados na Figura 12, em conjunto com previsões calculadas com base na proposição de O'Shaughnessy (1997) (Eq. 1). Observa-se clara concordância entre o modelo proposto neste trabalho os resultados obtidos no campo. Por sua vez, a Equação 1 revelou resultados acima dos determinados experimentalmente.

5 CONCLUSÕES

A análise dos resultados de ensaios de arrancamento, em solo arenoso, em diversas configurações de pneus, sob diferentes níveis de confinamento, indicou que a resistência unitária ao arrancamento de pneus é da ordem de 6kN/pneu.

A mobilização da resistência ao arrancamento de cada linha do reforço de pneus ocorre de forma progressiva, decrescendo de acordo com a distancia ao ponto de aplicação de carga. A primeira linha de pneus é responsável

pela maior parcela da resistência ao arrancamento da malha. Nesta linha, além das componentes de atrito, parte da resistência é fornecida pela ação do empuxo passivo.

O mecanismo de transferência de carga sugerido neste trabalho mostrou-se eficaz para previsão do comportamento das malhas de pneus sob condição de arrancamento.

Apesar da quantidade limitada de ensaios, os resultados aqui apresentados podem ser utilizados como primeira estimativa em projetos de reforço com pneus.

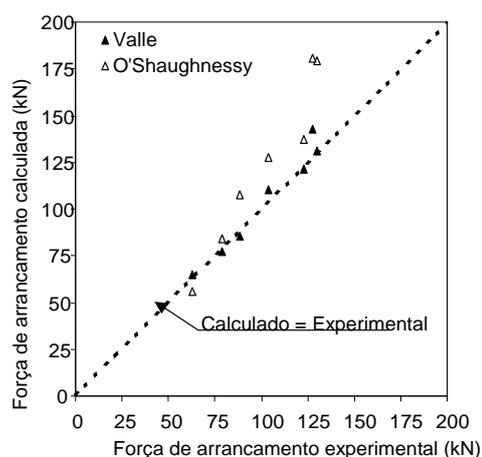


Figura 12 - Comparação entre as forças de arrancamento (calculadas) na ruptura

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de registrar os seus agradecimentos ao CNPq pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- Gerscovich, D.M.S.; Medeiros, L.V. de.; Sayão, A. S. F. (2001). Field Pullout Tests on Scrap Tire Reinforcement layers under different soil surcharges. *XV Internatinal Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* Istanbul, Balkema
- Gerscovich, D.M.S.; Medeiros, L.V. de.; Sayão, A. S. F. & Garga, V. K. (2000). Field Pullout Tests on Scrap Tire Arrangements. *Geotechnical & Geological Eng. Proc. Intern. Confer.*, Melbourne, Nov., CDROM.
- O'Shaughnessy, V. & Garga, V.K. (2000). Tire-reinforced Earthfill. Part2: Pull-out Behaviour and Reinforced Slope Design. *Can. Geot. J.* 37: 97-116
- O'Shaughnessy, V. (1997) – *Reinforcement of Earth Structures Using Scrap Tires*, Ph.D. Thesis, University of Ottawa, Canada, 372p