

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE UM MURO DE PNEUS

Ana C. C. F. Sieira ⁽¹⁾, Alberto S. F. J. Sayão ⁽¹⁾, Denise M. S. Gerscovich ⁽²⁾ e Luciano V. Medeiros ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil.

⁽²⁾ Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil.

RESUMO - Este trabalho descreve a metodologia e apresenta os resultados de uma análise numérica do comportamento de um muro experimental de pneus. O muro apresentou 60m de comprimento e 4m de altura, tendo sido construído com camadas horizontais de pneus, amarrados entre si e preenchidos com solo compactado. Um maciço de solo compactado com 6m de altura foi colocado como retro-aterro do muro de pneus. O muro foi executado com 4 seções instrumentadas, com características diferentes quanto à geometria, amarração e configuração dos pneus. O comportamento tensão-deformação do material solo-pneus é analisado, comparando-se os resultados da instrumentação de campo com os valores previstos numericamente para duas seções com geometrias distintas. Os resultados da análise indicam que é adequada a estabilidade do muro de pneus com seção transversal constante, com largura de 3 pneus. A técnica de estabilização de encostas com o uso de solo-pneus mostra-se portanto uma alternativa atraente sob o ponto de vista técnico e que utiliza um lixo indesejável para o meio ambiente.

ABSTRACT - This paper describes the methodology and results of a numerical analysis of the construction of a 60m long and 4m high experimental scrap tire retaining wall. The wall was made of horizontal layers of tires, tied together and are filled with compacted soil. A 6m compacted soil was placed as backfill of the tire wall. The experimental wall has four instrumented sections, with distinct geometry, tying system and tires configuration. The stress strain behavior of two soil-tire sections has been analyzed in detail, comparing field measurements with numerical predictions. The results show that a constant wall width comprising a minimum of 3 tires satisfies stability requirements. The use of scrap tires retaining walls is an attractive alternative which provides efficient mechanical performance and promotes the use of an undesirable waste disposal.

1 – INTRODUÇÃO

Pneus usados constituem um lixo urbano indesejável, que se acumula em grandes proporções principalmente em áreas urbanas. A utilização de pneus usados em obras de engenharia civil tem se desenvolvido nos últimos anos. Experiências de utilização de pneus como elemento de reforço de aterros, como barreiras contra impactos ou ruídos, e como elemento de redistribuição de tensões em dutos enterrados, têm sido relatadas na literatura (Long, 1990, Schlosser et al, 1994).

Um amplo projeto de pesquisa foi desenvolvido na PUC-Rio com o propósito de estudar a reutilização de pneus usados na construção de muros de arrimo. Construiu-se, então, um muro de contenção instrumentado, composto de 4 seções transversais independentes, cada seção medindo 15m de comprimento. O muro alcançou 4m de altura, sendo constituído por camadas horizontais de pneus preenchidos com solo residual compactado e amarrados entre si com corda ou arame. Neste projeto foram utilizados pneus cortados e inteiros (Figura 1), com aproximadamente 0,60m de diâmetro e 0,20m de largura de banda de rolamento, dimensões correspondentes a pneus de automóveis. Em três seções, a amarração dos pneus foi feita com corda de polipropileno de 6mm de diâmetro. Em uma única seção, utilizou-se arame de gabiões protegido com uma cobertura plástica de PVC. Ao término da construção do muro, foi adicionada, ao retro-aterro, uma sobrecarga de 2m de altura de solo. A instrumentação adotada consistiu de inclinômetros, extensômetros magnéticos verticais e células de pressão.

Maiores detalhes sobre os aspectos construtivos e a instrumentação de campo estão apresentados em Medeiros et al (1997 e 1999) e Garga et al (1999).



Figura 1 – Pneu inteiro e cortado

Com o objetivo de estabelecer a magnitude dos parâmetros de deformabilidade do material solo-pneu e tendo em vista a impossibilidade prática de realização de ensaios de laboratório com este material, foram realizadas simulações numéricas do processo construtivo do muro, através de um programa de elementos finitos para análise de tensões e deformações. Nas análises, os deslocamentos horizontais previstos numericamente foram confrontados com os medidos no campo e os parâmetros de deformabilidade do material solo-pneus foram ajustados de forma a reproduzir, da melhor forma possível, os deslocamentos do muro.

2 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

O solo local foi utilizado tanto para preenchimento dos pneus quanto para execução do retro-aterro. O material pode ser classificado como um silte areno-argiloso, proveniente do intemperismo de rocha gnáissica. Ensaios de caracterização, realizados por Fontes (1997), indicaram valores médios de densidade dos grãos (G_s), limites de Atterberg (LP e LL), índice de plasticidade (IP) e teor de umidade natural (ω), conforme apresentado na tabela 1. Nesta tabela estão incluídos os índices de compactação de campo.

Tabela 1 - Caracterização do solo

Ensaio de Laboratório					Compactação de Campo		
G_s	LP (%)	LL (%)	IP (%)	ω (%)	γ (kN/m^3)	S (%)	e
2,724	31,0	46,0	15,0	20,0	17,5	65	0,833

Ensaio de laboratório triaxial e de cisalhamento direto indicaram parâmetros de resistência médios de intercepto coesivo (c') e ângulo de atrito (ϕ') iguais a 13kPa e 29°, respectivamente. Estes valores foram observados para a condição de umidade de campo; no caso de saturação, a coesão torna-se nula (Fontes, 1997).

Quanto ao material solo-pneus, as características de deformabilidade e resistência não foram determinadas experimentalmente, devido à dificuldade de realização de ensaios com este tipo de material. Estas dificuldades estão relacionadas às grandes dimensões de uma amostra representativa do conjunto solo-pneus.

O peso específico do material solo-pneu foi possível de ser determinado através de ensaios de densidade *in situ*, tendo sido observado um valor médio da ordem de 16 kN/m^3 (Sieira, 1998).

3 - SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A incerteza no estabelecimento dos parâmetros de deformabilidade do muro determinou a necessidade de realização da simulação numérica da construção em 2 etapas: análise do muro isoladamente e análise do conjunto muro/retro-aterro. Na primeira etapa o empuxo gerado pelo retro-aterro foi substituído por forças nodais equivalentes. Nesta etapa, os parâmetros de deformabilidade do conjunto solo-pneus foram estabelecidos de forma a se reproduzir os deslocamentos horizontais observados no interior do muro. Uma vez definidos estes parâmetros, simulou-se a construção do conjunto muro/retro-aterro, comparando-se mais uma vez os deslocamentos horizontais previstos com os observados.

Para estados planos de tensão e deformação em material homogêneo de comportamento elástico, as tensões em geral não dependem dos parâmetros de deformabilidade (E, ν) do material. Assim sendo, é recomendável adotar em estudos que envolvam simulação numérica de processos construtivos, a validação das análises a partir da previsão adequada das deformações observadas no campo.

As análises foram realizadas utilizando o programa de elementos finitos GESSDA, desenvolvido na PUC-Rio. Este programa utiliza elementos isoparamétricos de 4 nós e incorpora o modelo hiperbólico para reproduzir o comportamento tensão vs deformação dos materiais. O programa permite a simulação das etapas construtivas, através de técnica incremental (Murrugarra, 1996).

Na primeira etapa, utilizou-se uma malha de elementos finitos constituída por 243 elementos planos de 4 nós, dispostos em 16 camadas. Esta malha corresponde às seções do muro experimental construídas com 6 pneus na base e 4 pneus no topo. Na segunda etapa a malha era constituída de 451 elementos. A Figura 2 apresenta as geometrias correspondentes ao final da construção do muro.

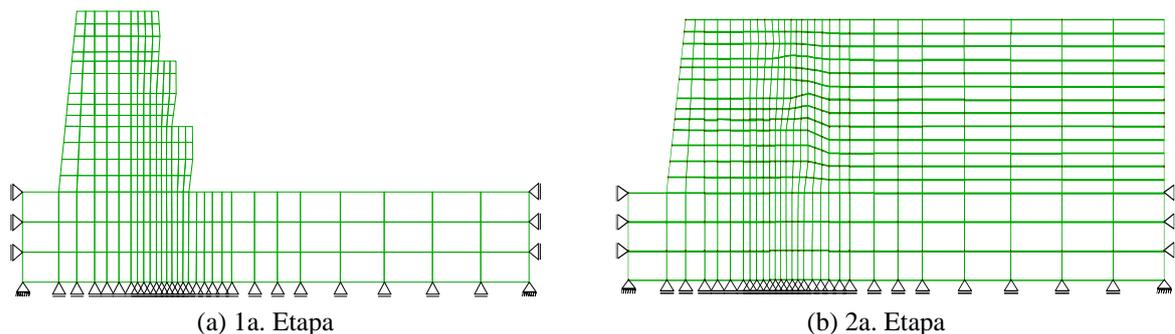


Figura 2- Malha de elementos finitos

3.1 – 1ª. ETAPA: SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO MURO

Nesta etapa, os módulos de deformabilidade (E) do material solo-pneus foram estabelecidos em função da reprodução dos deslocamentos horizontais medidos pela instrumentação instalada no interior do muro.

O material solo-pneus foi considerado como linear-elástico e subdividido em 7 camadas horizontais distintas, para se identificar uma possível variação do módulo de Young (E) com a altura do muro. O coeficiente de Poisson (ν) foi mantido constante e igual a 0,35, pois a magnitude das deformações mostrou-se pouco afetada por variações deste parâmetro. O empuxo no muro provocado pelo retro-aterro foi substituído por forças nodais equivalentes, cuja magnitude foi determinada segundo as considerações da teoria clássica de Coulomb. Admitiu-se uma distribuição linear das tensões horizontais com a profundidade e um ângulo de atrito solo-muro (δ) igual a $2/3$ do ângulo de atrito do solo (ϕ').

A Figura 3 apresenta a comparação entre os deslocamentos previstos (1ª. Etapa) e os observados no campo, para o final de construção do muro. Estes resultados foram obtidos em uma seção executada com pneus cortados, amarrados com corda de polipropileno e com seção transversal de largura variável, com 6 pneus na base e 4 pneus no topo. Neste caso, um módulo de deformabilidade (E) constante ao longo da altura do muro e igual a 2,5MPa foi o que melhor reproduziu os resultados experimentais.

Nas demais seções, os módulos de deformabilidade (E) variaram entre 1,8 a 3,0, sendo estas diferenças atribuídas aos diferentes processos de amarração ou de configuração dos pneus. Em todos os casos, estes valores foram considerados constantes ao longo da altura do muro (Sieira, 1998).

3.2 – 2ª. ETAPA: SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO CONJUNTO MURO/RETRO-ATERRO

Após estabelecidos de forma confiável os parâmetros de deformabilidade (E, ν) do muro de solo-pneus, realizou-se uma segunda etapa de análise, ampliando-se a geometria da malha de forma a incorporar o retroaterro.

O comportamento tensão vs deformação do solo do retro-aterro, simulado através do modelo hiperbólico, foi reproduzido a partir dos parâmetros indicados na Tabela 2. Estes parâmetros foram calculados a partir de ensaios triaxiais, reportados por Fontes (1997).

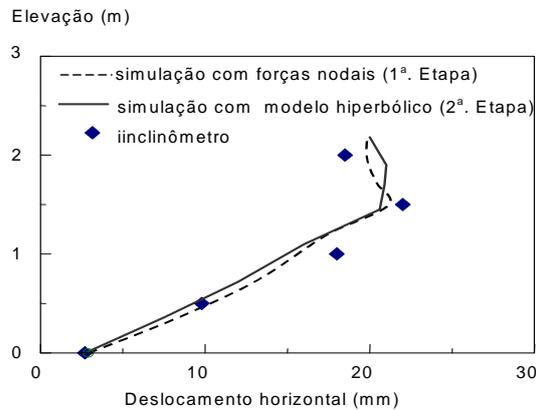


Figura 3 – Deslocamentos horizontais: medidos e previstos (Final de Construção)

Tabela 3 – Parâmetros do modelo hiperbólico para o retro-aterro

K	K_{ur}	K_b	n	m	R_f	c'(kPa)	φ'(°)	Δφ'(°)
31,69	63,00	13,72	0,76	0,62	0,67	0	29	0

Os resultados desta análise estão apresentados na Figura 3, em conjunto com os resultados da 1ª. etapa (simulação do retro-aterro por forças nodais equivalentes) e com as medições de campo. Estes resultados indicam que o modelo hiperbólico permite uma reprodução adequada do comportamento do conjunto muro/retro-aterro. Adicionalmente, observa-se que os empuxos ativos na face do muro de solo-pneus podem ser satisfatoriamente estimados a partir do método clássico de Coulomb.

A Figura 4 apresenta uma comparação entre as tensões horizontais previstas pela simulação e as observadas nas células de carga no campo. Estes resultados correspondem à situação de final de construção do muro. Como era de se esperar, as tensões horizontais foram reproduzidas adequadamente.

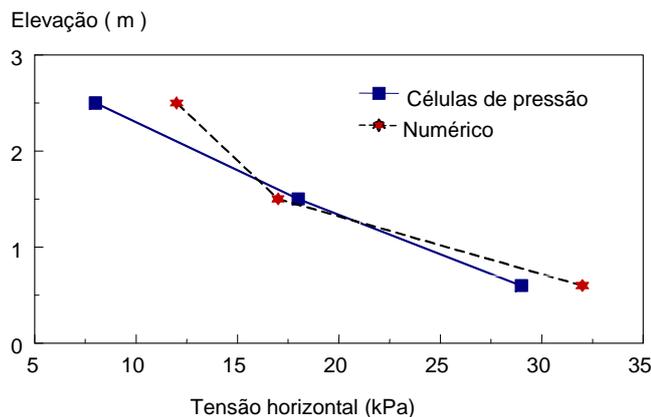


Figura 4 - Tensão Horizontal: Medidas e Previstas (Final de Construção)

4 – ANÁLISE NUMÉRICA DO PROJETO DO MURO

Uma das seções do muro experimental foi construída com geometria mais esbelta, apresentando uma largura constante de 3 pneus. Nesta seção, a estimativa do módulo de deformabilidade (E) não pode ser executada de acordo com a metodologia descrita anteriormente. Os inclinômetros instalados nesta seção foram danificados durante a construção. Assim sendo, estabeleceu-se como critério adotar, para esta seção, o mesmo módulo de deformabilidade (E) de 2,5MPa, obtido para a seção com geometria variável (largura de 6 pneus na base e 4 pneus no topo). Esta abordagem teve como princípio, o fato de que ambas as seções foram executadas com o mesmo arranjo; isto é, pneus cortados e amarrados entre si com corda de polipropileno.

Análises numéricas foram então realizadas, em ambas as seções, observando os níveis de tensões normais e cisalhantes desenvolvidos no interior do muro. Para se verificar o desenvolvimento de regiões de plastificação, arbitrou-se para o material solo-pneus os mesmos parâmetros de resistência obtidos no solo do retro-aterro. O ângulo de atrito (ϕ') foi considerado igual a 29° e o intercepto coesivo (c') variando entre 0 e 13kPa. Para verificar as regiões que poderiam estar no estado limite de ruptura, foi utilizado o parâmetro R (razão de ruptura), definido por:

$$R = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{mob}} \quad (1)$$

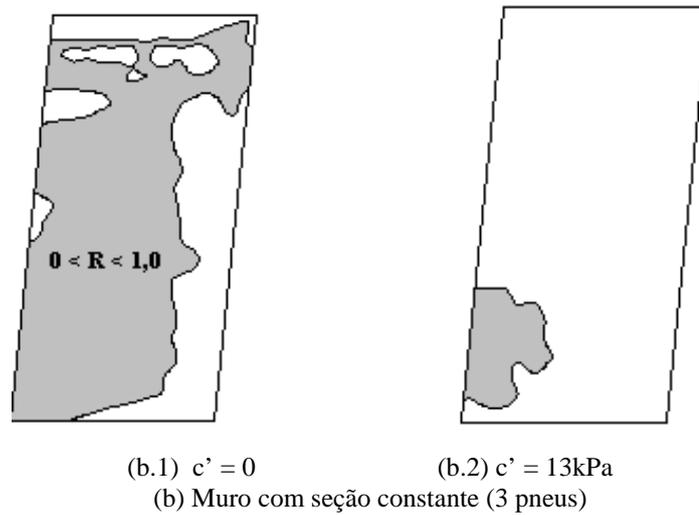
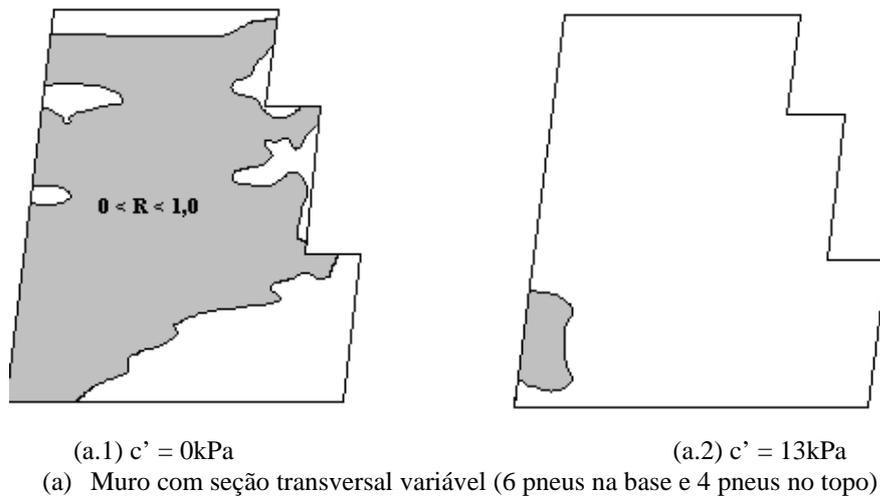
onde, $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ é a tensão desviadora na ruptura e $(\sigma_1 - \sigma_3)_{mob}$ é a tensão desviadora mobilizada. Neste caso, valores de $R \leq 1$ correspondem à condição de ruptura ou de instabilidade localizada.

A figura 5 apresenta os resultados desta análise, para ambas as seções e para duas condições limites de intercepto coesivo. Considerando que o desenvolvimento de tensões é pouco influenciado pelos parâmetros de deformabilidade (E, ν) adotados, as diferenças entre os diagramas apresentados nesta figura se devem principalmente à geometria da seção e independem da configuração de pneus e/ou amarração adotada.

Independente da geometria do muro, a existência de uma pequena coesão reduz significativamente a amplitude da região plastificada (região sombreada). Esta redução é tanto maior quanto maior for a largura da seção. No caso hipotético de intercepto de coesão nulo, a ruptura dos muros seria iminente. Convém ressaltar que a adoção dos parâmetros de resistência do solo para representar o conjunto solo-pneus é uma abordagem bastante conservadora. A presença de pneus amarrados entre si no interior do muro certamente fornece ao conjunto uma resistência ao cisalhamento superior à do solo propriamente dito. Em particular, pode-se afirmar que ocorre um incremento substancial no parâmetro de coesão (c') do conjunto solo-pneus. (Long, 1990)

Os resultados obtidos nesta simulação são de particular interesse para a prática da engenharia geotécnica, pois demonstram que muros de solo-pneus com geometria mais esbelta podem se apresentar como uma alternativa segura de contenção de taludes.

Para se avaliar a influência da largura do muro nos deslocamentos previstos, realizou-se um estudo paramétrico para seções retangulares, cuja largura variou de 2 a 6 pneus. Os resultados, apresentados na figura 6, consideram o muro com altura de 4m e sobrecarga de 2m. Nota-se que há uma variação significativa dos deslocamentos quando a largura da base passa de 2,5 para 2 pneus. Assim sendo, sugere-se que 2,5 pneus (aproximadamente 1,5m de largura) seja a largura mínima teoricamente adequada para a seção do muro em questão. Para menores larguras, os deslocamentos aumentam em grande proporção, o que permite concluir que a seção seria levada à ruptura.



Nota: Figuras fora de escala.

Figura 5 – Análise da instabilidade interna do muro

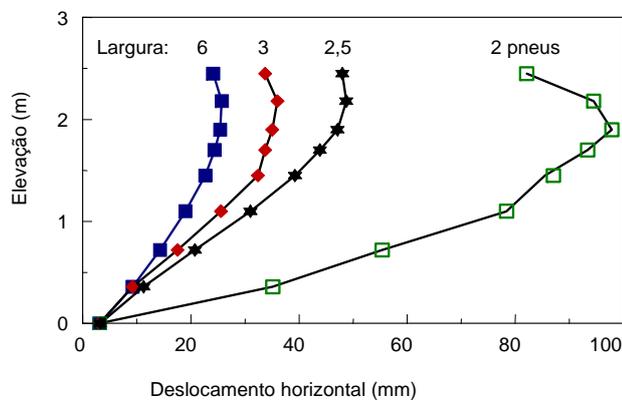


Figura 6 - Variação dos deslocamentos em função da largura do muro.

5 CONCLUSÕES

A metodologia adotada para a análise do muro experimental consistiu na utilização dos resultados de deslocamento, registrados pelos inclinômetros, como critério para calibração do comportamento tensão deformação do conjunto solo-muro.

No caso do projeto de muro solo-pneus, esta técnica é particularmente adequada, tendo em vista as dificuldades operacionais para se obter os parâmetros de deformabilidade do material que compõe o muro.

As análises numéricas sugerem que o conjunto solo-pneus pode ser representado como um material homogêneo, linear e elástico. A magnitude do módulo de Young (E) foi determinada como sendo da ordem de 2,5 MPa e o coeficiente de Poisson igual a 0,35.

Estudos paramétricos com relação às dimensões mínimas de projeto de muro solo-pneus indicaram pouca variação em termos de deslocamento horizontal, para seções de largura constante, superior a 3 pneus. Quanto à estabilidade desta estrutura, esta seção também se apresenta como uma alternativa segura para projetos de estabilização de encostas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IDRC (International Development Research Centre, Canadá) e à Fundação Geo-Rio (Prefeitura do Rio de Janeiro) pelo financiamento do projeto de pesquisa. Os engenheiros Luís O. Vieira e Márcia H. Andrade, da Geo-Rio, participaram ativamente dos trabalhos de campo. O professor V. K. Garga, da Universidade de Ottawa, Canadá, participou de todas as etapas desta pesquisa. Os autores agradecem ainda ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Brasil) e à FAPERJ (Fundação de Amparo e Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro) pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Fontes, A.E.B. (1997) - “*Ensaio de Campo e Laboratório no Retroaterro do Muro Experimental de Pneus*”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Brasil, 126p.

Garga, V.K.; Shaughnessy, V.O.; Medeiros, L.V.; Sayão A.S.F.J. (1999) - “*Behaviour of Scrap Tire Reinforced Retaining Walls: Canadian and Brazilian Experiences*”, 11th Panamerican Conf. on Soil Mechanics and Geotech. Engineering, Foz do Iguaçu, Brasil, vol. 3, p. 1199-1206.

Long, N.T. (1990) - “*The Pneusol*”. Publication GT44, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France, 76p.

Murrugarra, D.A.P. (1996) - “*Modelagem Numérica do Comportamento Estático e Sísmico de Barragens de Terra*”. Dissertação de Mestrado - PUC-Rio, 165pp.

Medeiros, L.V; Garga, V.K.; Gerscovich, D.M.S.; Sayão, A.S.F.J. and Andrade, M.H.N. (1999) - “*Analysis of the Instrumentation of a Scrap Tire Reinforced Retaining Wall*”. XI Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, vol.1 , p. 19-25.

Schlosser, F.; Soyez, B. and Wojnarowicz, M., (1994) - “*Aspects Geotechniques de la Gestion des Dechets Industriels en France*”. France. pp 91-100.

Sieira, A.C.C.F. (1998) - “*Análise do Comportamento de um Muro de Contenção Utilizando Pneus*”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Brasil, 110p.