

UTILIZAÇÃO DE REJEITO DE PNEU DE BORRACHA EM REFORÇO DE SOLOS PARA ATERROS RODOVIÁRIOS NO MUNICÍPIO DE CHAPECÓ/SC

Eliane Fátima De Bastiani Sychocki Gemelli

Engenheira Civil

elianegemelli@unochapeco.edu.br

Marieli Biondo Lopes

Professora do curso de Engenharia Civil na Universidade Comunitária da Região de Chapecó-
Unochapecó

engmary@unochapeco.edu.br

Bárbara Karina Kronbauer

Acadêmica do curso de Engenharia Civil na Universidade Comunitária da Região de Chapecó-
Unochapecó

barbara.kronbauer@unochapeco.edu.br

Jaqueline Andressa Bertella

Acadêmica do curso de Engenharia Civil na Universidade Comunitária da Região de Chapecó-
Unochapecó

jaquebertella@unochapeco.edu.br

Resumo. *Buscando uma alternativa correta para o destino final aos pneus inservíveis, a construção civil tem proposto métodos para a utilização destes resíduos. Este trabalho tem por objetivo estudar a aplicação de rejeito de pneu de borracha no reforço de solos de obras rodoviárias no município de Chapecó/SC. O resíduo de borracha foi adicionado à amostras de solo natural nos teores de 5, 15 e 20%, analisando-se o comportamento destas misturas nos seus índices de consistência, granulometria, compactação e resistência ao cisalhamento. Os resultados mostraram reduções de 4% da massa específica seca máxima, e 40% na capacidade de suporte do solo com acréscimo do resíduo de pneu, porém, mesmo com aumento no ISC, este ainda está abaixo das recomendações, inviabilizando o seu uso pra base e sub-base. Através do ensaio de cisalhamento direto que foi realizado nas amostras saturadas e não saturadas, observou-se que houve um aumento*

na resistência ao cisalhamento em 15% com o acréscimo de resíduo, principalmente para as amostras saturadas.

Palavras-chave: *Resíduos. Sustentabilidade. Pavimentação.*

1. INTRODUÇÃO

Segundo Sinpec (2011), o pneu tornou-se um elemento indispensável para veículos automotores ou não. No momento em que ocorre o desgaste total do pneu, este se torna inservível, e por ser um elemento que demora para decompor-se, o seu descarte deve ser realizado de forma sustentável.

Nos centros urbanos, o destino final desse material é realizado em aterros a céu aberto o que provoca proliferação de roedores, insetos e doenças como dengue, zika vírus e

chikungunya, estas transmitidas pelo mosquito *Aedes aegypti*.

Nos últimos anos, novas tecnologias estão sendo desenvolvidas para minimizar os impactos ambientais causados pela má disposição dos resíduos, unificando as questões ambientais com a melhoria de propriedades de materiais naturais, como os solos.

A construção de pavimentos rodoviários exige a escolha de materiais nobres para atender aos critérios normativos de suporte, e, atualmente constata-se a escassez destes materiais nobres nos cortes obrigatórios, sendo necessária a busca por novas jazidas. Estas novas áreas de empréstimos, contudo, provocam maior degradação ambiental, além de aumentar o custo da operação de terraplanagem devida a elevada distância de transporte.

A fim de apresentar uma solução para reduzir os custos e melhorar o tratamento do solo, o presente trabalho trata da utilização de resíduos de pneus inservíveis em solo do município de Chapecó/SC, tendo como principal objetivo comparar os resultados de resistência e suporte entre amostra de solo natural e compósito solo-borracha.

2. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

A grande competição econômica e a elevada busca do mercado fazem com que a produção industrial cresça em ritmo acelerado aumentando a produção de resíduos. Uma preocupação da sociedade atualmente está no descarte desses materiais, em que sua maior parte, não são descartados adequadamente ocasionando prejuízos ao meio ambiente e a sociedade (SILVA; SILVA, 2013).

De acordo com Lagarinhos (2011), uma forma de minimizar os impactos ambientais é a reciclagem do resíduo. O pneu inservível pode ser reutilizado de diversas formas, como: muros de contenção, móveis, confecção de

tatames, e, reforço de solos através da estabilização granulométrica.

2.1 Reforço de solos com a utilização de pneus inservíveis

Segundo Rissoli & Araújo (2014), o uso de pneus inservíveis em obras geotécnicas é variado. A opção por utilizar este resíduo deve-se à suas características, como baixo peso específico, baixa condutividade térmica, propriedades granulométricas e de aderência.

Um dos desafios é garantir que o solo possua resistência suficiente para resistir as solicitações impostas. Em casos em que o solo presente no local em que deseja-se construir ou pavimentar não atenda aos requisitos da obra, é necessário algum tipo de intervenção (BOLAÑOS; CASAGRANDE, 2013).

Para Amprino (2011), a utilização deste resíduo como reforço apresenta vantagens como baixo custo por unidade, não prejudica os lençóis freáticos e aquíferos e tem alta durabilidade. Sua mistura ao solo pode elevar a resistência ao cisalhamento tornando o produto técnico e ambientalmente satisfatório.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Localização e coleta das amostras

A amostra denominada de Solo Natural foi coletada em um talude de corte obrigatório, demonstrado na Fig. 1, localizado na Avenida Ernani Sander, trecho que liga a Avenida Leopoldo Sander ao Aeroporto Serafim Enoss Bertaso e a SC 480 no município de Chapecó/SC.



Figura 1. Talude utilizado para coleta do solo.

O resíduo de borracha utilizado foi doado por duas empresas de recapagens de pneus, do município. Após a coleta do resíduo este foi moído em laboratório para posterior aplicação nas misturas. Os aspectos físicos do material podem ser analisados pela Fig. 2.



Figura 2. Resíduo de borracha utilizado.

Para esta pesquisa os materiais utilizados foram separados em quatro amostras diferentes conforme a Tabela 1. As porcentagens de resíduo adicionado são relacionadas à massa de solo natural seco ao ar.

Tabela 1. Nomenclatura das amostras.

Nomenclatura	% Borracha adicionado	
	ao solo	
Solo Natural	0	
Mistura 1	5	
Mistura 2	15	
Mistura 3	20	

3.2 Granulometria das amostras

A preparação da amostra de solo foi realizada de acordo com o método ME 041 (DNER, 1994), e o método de ensaio seguiu o prescrito na ME 051 (DNER, 1994). Realizaram-se os ensaios de peneiramento grosso, ensaio de sedimentação e granulometria fina na amostra de Solo Natural.

Para as misturas acrescidas do resíduo, Mistura 1, 2 e 3, e para o resíduo, passaram-se material em cada peneira do conjunto indicados pela norma DNER – ME 051/94, obtendo as massas retidas em cada peneira, conforme demonstrado na Fig. 3.

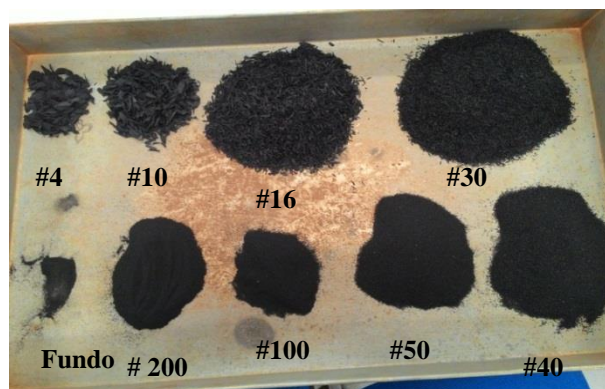


Figura 3. Granulometria do resíduo de pneus inservíveis.

3.3 Massa específica dos grãos

O ensaio de massa específica foi realizado com base na NBR 6508 (ABNT, 2016), sendo aplicado vácuo para a exclusão dos vazios e somente realizado para o Solo Natural.

3.4 Limites de consistência

O ensaio de Limite de Liquidez foi executado conforme ME 122 (DNER, 1994), onde obteve-se o teor de umidade no qual o solo passa do estado plástico para o estado líquido.

O ensaio de Limite de Plasticidade foi executado conforme ME 082 (DNER, 1994), o qual indica o teor de umidade na transição do estado plástico para o semi-sólido.

3.5 Compactação

O ensaio de compactação foi realizado conforme ME 162 (DNER, 1994), utilizando-se a energia de Proctor Normal, com o objetivo de determinar a massa específica seca máxima ($\rho_{m\acute{a}x}$), umidade ótima (w_{otm}) de todas as amostras.

3.6 Índice de suporte califórnia

Para a realização do ensaio de ISC as amostras de solo foram preparadas de acordo com a ME 041 (DNER, 1994) e o ensaio executado conforme ME 049 (DNER, 1994).

A finalidade deste ensaio é determinar a capacidade de suporte do solo. Este ensaio foi executado para todas as amostras estudadas, e a Fig. 4 apresenta a deformação de algumas amostras após ensaio.



Figura 4. Amostras após ensaio.

3.7 Cisalhamento direto

O ensaio de cisalhamento é o método mais utilizado, e tem como base a metodologia de Coulomb, onde é aplicado uma tensão em um plano e analisado a tensão de cisalhamento que provocou a ruptura.

Para este ensaio as amostras foram confeccionadas em um cilindro Proctor Normal com 10 cm de diâmetro interno e rompidas com tensões normais de 100, 200 e 300 kPa. Todas as amostras apresentadas na Tabela 1 foram cisalhadas considerando saturação e não saturação, sob as mesmas tensões.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Granulometria do solo natural e amostras

O resultado da análise granulométrica das amostras e para o resíduo de borracha é apresentado pela Fig. 5.

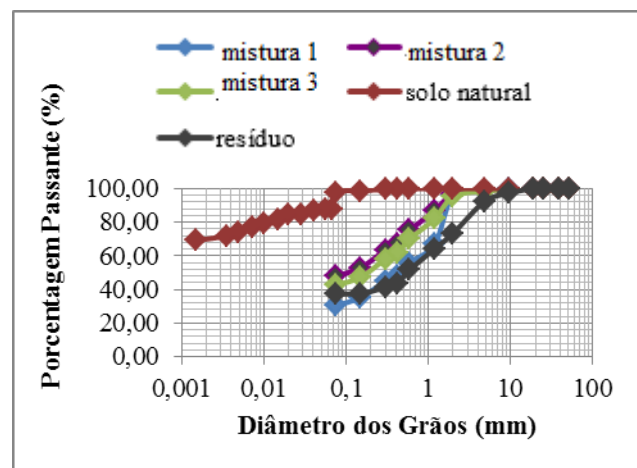


Figura 5. Curvas granulométricas.

O solo natural apresenta em sua composição 70,2% de argila, 17,3% de silte e 11,1% de areia, com determinação textural classificada como argila silto arenosa.

4.2 Massa específica dos grãos e limites de consistência

O resultado dos ensaios de massa específica, limite de liquidez e limite de plasticidade das amostras são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Caracterização física das amostras.

Tipo	LL (%)	LP (%)	IP (%)	$\gamma_{d.máx}$ (g/cm ³)
Solo Natural	58,5	45,5	12,98	2,58
Mistura 1	54,5	45,9	8,55	-
Mistura 2	48,3	43,8	4,58	-
Mistura 3	49,6	42,9	6,71	-

Segundo a classificação de Burmister (1949), pode-se observar que todas as amostras apresentaram os valores dos índices de plasticidade, média a baixa plasticidade.

Verifica-se que o índice de plasticidade é reduzido na adição do resíduo de borracha. Para a Mistura 1, que apresenta 5% de resíduo incorporado, a redução foi de 34%. Já, nas Misturas 2 e 3, a redução foi de 65% e 48%, respectivamente.. Conclui-se ainda, que a diminuição do IP não é proporcional ao teor de borracha, mas sim, ao tamanho das suas partículas, uma vez que a Mistura 2 (que possui 15% de adição) apresentou o menor índice de plasticidade, quando comparada com a Mistura 3 (20% de adição).

4.3 Compactação

As curvas do ensaio de compactação Proctor Normal obtidas para o Solo Natural e Misturas 1, 2 e 3 são apresentados através da Fig. 6.

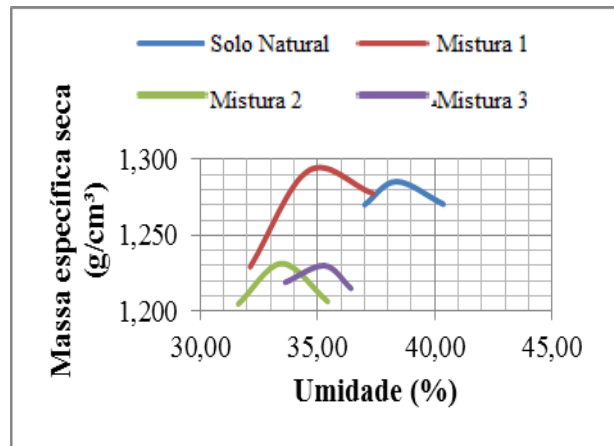


Figura 6. Curvas de compactação.

Através da Fig. 6 é possível observar que a incorporação de resíduo diminuiu a massa específica seca máxima das amostras assim como a umidade, ou seja, manteve-se praticamente na mesma densidade que a amostra do Solo Natural. Conclui-se, que as partículas de pneu adicionadas ao solo, reduzem a massa específica seca máxima em até 4%.

A Tabela 3 apresenta os resultados do ensaio de compactação para as amostras.

Tabela 3. Resultados ensaio de compactação.

Amostra	w _{ót.} (%)	ρ (g/cm ³)
Solo Natural	38,36	1,285
Mistura 1	34,62	1,293
Mistura 2	33,47	1,231
Mistura 3	35,30	1,230

Apesar da massa específica seca máxima ser diminuída com o acréscimo de borracha, observa-se na Tabela 3 que o teor de umidade ótimo também é reduzido, em até 13%, no caso da Mistura 2. Da mesma forma que na análise do índice de plasticidade, conclui-se que a redução da umidade não se dá pela porcentagem da adição, mas sim, pela granulometria do material aplicado.

4.4 Índice suporte Califórnia

Após a realização dos ensaios para determinação do ISC para cada uma das amostras traçou-se as curvas de pressão \times penetração. Para as Misturas 2 e 3 houve a necessidade de corrigir as curvas, pois apresentaram concavidade voltada para cima.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos através do ensaio de ISC na energia Proctor Normal, bem como a expansão das amostras e a quantidade de água absorvida pelas mesmas.

Tabela 4. Resultados dos ensaios de ISC.

Amostra	CBR (%)	Expansão (%)	Água absorv. (g)
Solo Natural	17,90	1,71	30
Mistura 1	10,7	2,42	50
Mistura 2	8,8	18,27	167
Mistura 3	9,1	11,73	103

Conclui-se com a Tabela 4 que a adição de resíduo não aumenta a capacidade de suporte, e que a medida que o teor aumenta, a capacidade de suporte diminui.

A diminuição da capacidade de suporte deve-se ao aumento na expansão e conseqüentemente a quantidade de água absorvida resultado do grande número de vazios, devido à dificuldade dos materiais (solo e borracha) se integrarem um ao outro durante a homogeneização da mistura. Estes são dois materiais não aglomerantes, o que pode caracterizar em um grande número de vazios.

4.5 Cisalhamento direto

O ensaio de cisalhamento direto foi realizado para amostras não saturadas e saturadas com o intuito de comparar e avaliar os resultados das tensões cisalhantes máximas nas duas situações para o Solo Natural e demais Misturas.

Através das leituras obtidas durante a

realização dos ensaios foi possível obter os gráficos de tensão cisalhante (kgf/cm^2) \times deformação (mm), no qual é possível observar o comportamento da curva de cisalhamento em cada estágio do ensaio. A Fig. 7 apresenta a curva de cisalhamento para o Solo Natural não saturado nas tensões de 100, 200 e 300 kPa e a Fig. 8 apresenta as curvas de cisalhamento para o Solo Natural saturado.

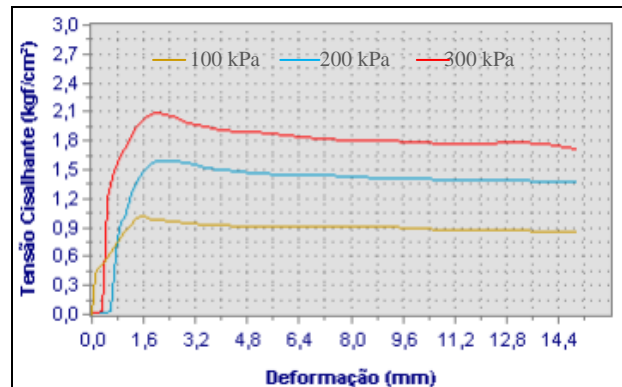


Figura 7. Curva tensão \times deformação/ Solo Natural não saturada.

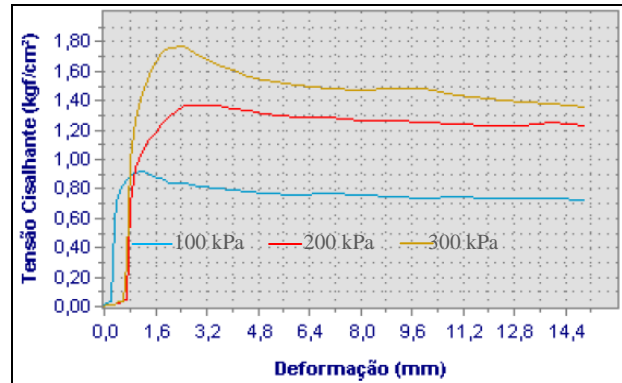


Figura 8. Curva tensão \times deformação/ Solo Natural saturada.

A amostra de Solo Natural quando saturada, apresentou uma resistência de cisalhamento menor quando comparada com a amostra Solo Natural não saturada. Isso explica-se pela tensão diminuída pelo aumento da poropressão na amostra.

As Figuras 9 e 10 apresentam a curva de cisalhamento para a Mistura 1 não saturadas e saturadas nas tensões de 100, 200 e 300 kPa.

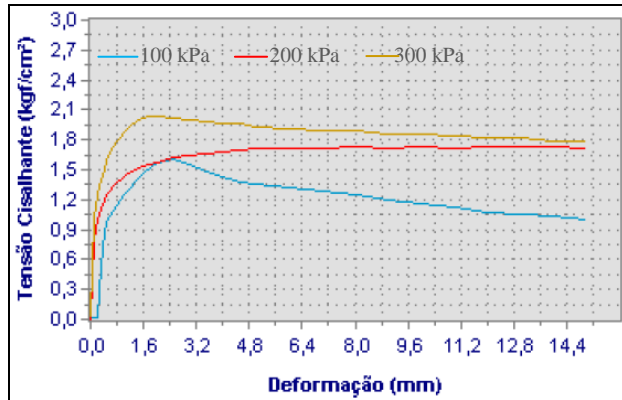


Figura 9. Curva tensão x deformação/ Mistura 1 não saturada.

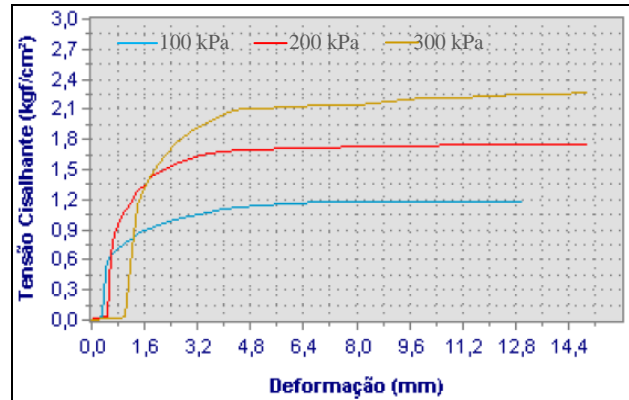


Figura 11. Curva tensão x deformação/ Mistura 2 não saturada.

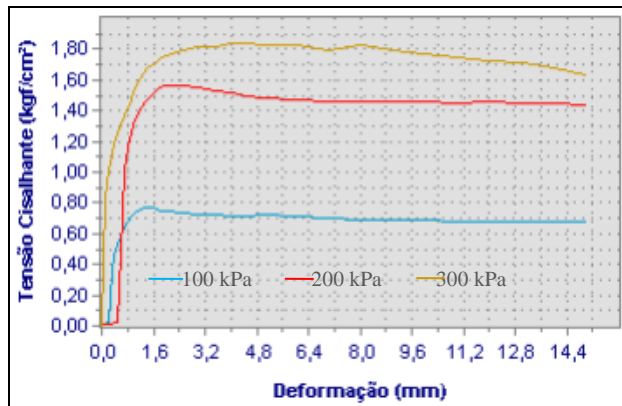


Figura 10. Curva tensão x deformação/ Mistura 1 saturada.

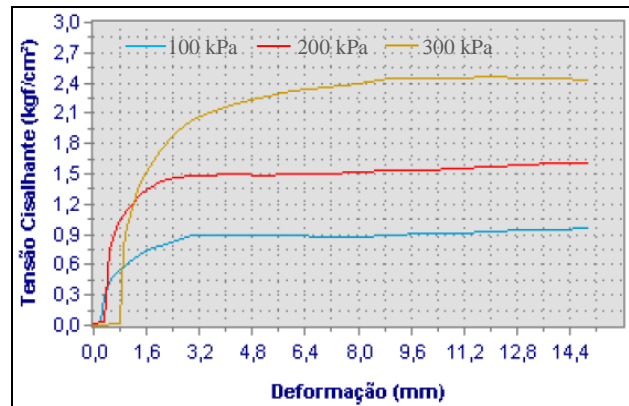


Figura 12. Curva tensão x deformação/ Mistura 2 saturada.

Na amostra com 5% de borracha, a resistência ao cisalhamento para a tensão de 300 kPa, manteve o comportamento da amostra natural, reduzindo o valor quando saturada.

As Figuras 11 e 12 apresentam a curva de cisalhamento para a Mistura 2 não saturada e saturadas nas tensões de 100, 200 e 300 kPa.

Nestas curvas, para as duas amostras percebe-se uma tensão de cisalhamento crescente, atingindo valores maiores que do Solo Natural. A deformação foi sensivelmente maior. A orientação das borrachas no plano de tensões parece estar ora paralela ao plano ora perpendicular.

As Figuras 13 e 14 apresentam a curva de cisalhamento para a Mistura 3 não saturadas e saturadas nas tensões de 100, 200 e 300 kPa.

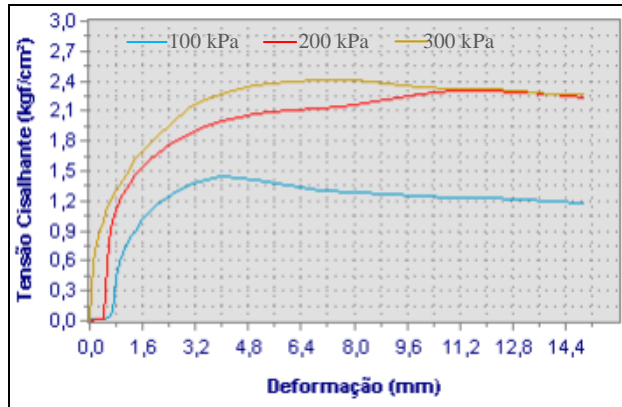


Figura 13. Curva tensão x deformação/ Mistura 3 não saturada.

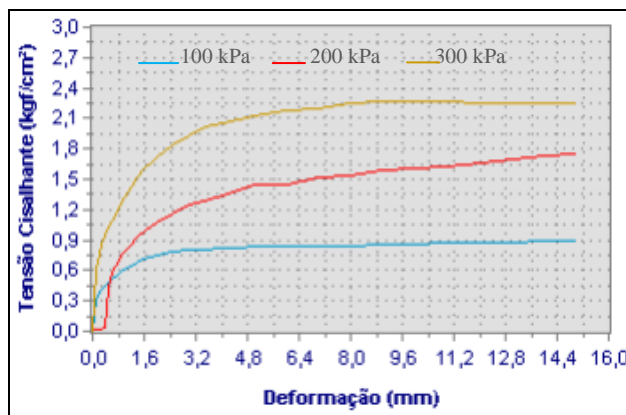


Figura 14. Curva tensão x deformação/ Mistura 3 saturada.

O comportamento das curvas de cisalhamento da Mistura 3 assemelham-se com as da Mistura 2, apresentando uma tensão residual.

As Tabelas 5 e 6 apresentam os parâmetros de resistência obtidos nos ensaios para todas as amostras.

Tabela 5. Parâmetros de resistência mecânica das amostras não saturadas.

TIPO	σ_N (kPa)	NÃO SATURADO		
		τ_C (kPa)	ϕ'	c' (kPa)
Solo Natural	100	102	28°	49
	200	160		
	300	210		
Mistura 1	100	161	12,1°	136
	200	174		
	300	204		
Mistura 2	100	118	27,3°	65
	200	176		
	300	227		
Mistura 3	100	154	25,5°	108
	200	231		
	300	242		

Tabela 6. Parâmetros de resistência mecânica das amostras saturadas.

TIPO	σ_N (kPa)	SATURADO		
		τ_C (kPa)	ϕ'	c' (kPa)
Solo Natural	100	92	22,7°	51
	200	138		
	300	178		
Mistura 1	100	78	26,5°	37
	200	158		
	300	184		
Mistura 2	100	96	36,3°	18
	200	196		
	300	246		
Mistura 3	100	98	34,1°	26
	200	175		
	300	228		

Através dos resultados apresentados nas Tabelas 5 e 6 é possível observar que as amostras com acréscimo de borracha não saturadas apresentam aumento no intercepto de coesão em relação ao solo natural, entretanto ocorre a diminuição no ângulo de atrito interno.

Para as amostras saturadas os valores se mostram contrários as amostras não saturadas, havendo um aumento no ângulo de atrito interno à medida que aumenta o teor de

resíduo. Porém, paralelamente a isso, ocorre a diminuição da coesão em relação ao solo natural.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve por finalidade analisar a eficiência de solos estabilizados granulometricamente com resíduos de borrachas de pneu, para utilização em obras de pavimentação no município de Chapecó/SC.

Em relação aos parâmetros de compactação, a adição de borracha diminuiu o teor de umidade ótima em 13%, comparando-se a amostra de Solo Natural com a Mistura 2. A massa específica seca máxima, foi diminuída em, aproximadamente, 4% com a adição de resíduos. Assim, com a mesma energia de compactação, a densificação do solo estabilizado com borracha é menor do que a amostra de Solo Natural.

Através dos ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC) é possível constatar que ocorre a diminuição do suporte do solo com o acréscimo de resíduo de borracha em até aproximadamente 40%, comparando a Mistura 1 com o Solo Natural. Observando assim, que nenhuma das Misturas obteve resultado satisfatório como uso de base ou sub-base de pavimentação.

A inserção de resíduo de pneus inservíveis influencia no comportamento mecânico do solo, uma vez que houve aumento da tensão cisalhante com o aumento do teor de resíduo. Esse aumento equivale a aproximadamente 15%, para $\sigma_N = 300$ kPa, comparando a Mistura 3 com o Solo Natural.

Conclui-se através desta pesquisa que os teores mais satisfatórios de adição de resíduo de pneus inservíveis ao solo é de 5% (Mistura 1) para compactação, pois foi a mistura que apresentou maior capacidade de suporte, apesar de ser menor em relação ao Solo Natural. E para cisalhamento, a Mistura 3 com acréscimo de 15% do resíduo. Para o primeiro

6. REFERÊNCIAS

Amprino, D. A. C. (2011). **Estudo e análise do comportamento de reforços e suas aplicações na Engenharia Geotécnica: Estudo de Misturas de Solo com a Adição de Borracha Moída de Pneus**. 20 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

ABNT (2016). **NBR 6508: Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, p. 08.

Bolaños, R. E. Z; Casagrande, M. T. (2013) **Comportamento Mecânico de um Solo Argiloso Reforçado com Fibras de Coco**. 17 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Burmister, D.M. Principles and Techniques of Soil Identification. Proceedings, Annual Highway Research Board Meeting, National Research Council, Washington, D. C., v.29, p. 402-433, 1949.

DNER-ME 041/94: **Solos – Preparação de amostras para ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER-ME 049/94: **Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER-ME 051/94: **Solos – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER-ME 082/94: **Solos – Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER-ME 122/94: **Solos – Determinação do limite de liquidez: Método de referência.** Rio de Janeiro, 1994.

DNER-ME 162/94: **Solos – Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas.** Rio de Janeiro, 1994.

Lagarinhos, C. A. F. (2011). **Reciclagem de pneus: análise do impacto da legislação ambiental através da logística reversa.** 293 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica do Estado de São Paulo, São Paulo, 2011

Rissoli, A. L. C; Araújo, G. L. S. (2014). Utilização de resíduos de pneus em obras geotécnicas. **Anais XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (XVII COBRAMSEG), ABMS, Goiânia.** v. 3. p. 1 – 8

Silva, A. L; Silva, L. C. A. (2013) **Logística reversa de pneus inservíveis: uma consciência socioambiental ou uma estratégia econômica para as empresas?** 23 f. TCC (Graduação) - Curso de Administração, Universidade Federal do Piauí, Picos, 2013.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS. SINPEC. 2011. Disponível em:
<<http://www.fiesp.com.br/sinpec/sobre-o-sinpec/historia-do-pneu>>. Acesso em: 17 out. 2016.