

PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS DE MISTURAS DE SOLO RESIDUAL DE BASALTO COM RESÍDUOS DE BORRACHA DE PNEUS

Geotechnical properties of mixtures of basalt residual soil with tire rubber waste

Manuella de Morais *
Felipe Ogliari Bandeira **
Mauro Leandro Menegotto ***

RESUMO – O presente trabalho tem por objetivo avaliar o comportamento hidráulico e mecânico de misturas de um solo argiloso residual de basalto com resíduos de borracha de pneus para utilização em obras geotécnicas. Assim, foram submetidas a ensaios de compactação, permeabilidade e cisalhamento direto, amostras de solo argiloso e de misturas contendo teores de 5%, 10%, 15% e 20% de resíduos de borracha de pneus. Os ensaios de compactação demonstraram que o peso específico seco máximo e o teor de umidade ótimo das misturas apresentam redução com o aumento do teor de resíduo. O coeficiente de permeabilidade mostrou-se crescente com o incremento do resíduo de borracha. Nos ensaios de cisalhamento direto, as misturas apresentaram maior ângulo de atrito interno e menor coesão, quando comparadas ao solo puro. Verificou-se que a utilização dos resíduos de borracha de pneus misturados ao solo deve ser criteriosa, sendo recomendada principalmente como material de enchimento leve ou em obras que possuam critérios de permeabilidade e resistência pouco restritivos.

SYNOPSIS – The paper aims to evaluate the hydraulic and mechanical behavior of mixtures of a clayey basalt residual soil with waste tire rubber for use in geotechnical works. Thus, samples of clay soil and mixtures containing 5%, 10%, 15% and 20% of tire rubber waste were submitted to compaction, permeability and direct shear tests. In the compaction tests, the values of the maximum dry density and the optimum water content of mixtures showed a reduction with increased residue content. The coefficient of permeability presented higher values with the increase of the quantity of waste tire rubber into the mixture. In the direct shear tests, mixtures presented greater angle of shearing resistance and less cohesion intercept, when compared to the pure soil. It was found that the use of waste tire rubber mixed with soil should be insightful, being recommended primarily as light filler material or in works that have permeability and resistance criteria little restrictive.

Palavras Chave – Resíduos de borracha de pneus, coeficiente de permeabilidade, resistência ao cisalhamento.

Keywords – Waste tire rubber, coefficient of permeability, shear strength.

1 – INTRODUÇÃO

A disposição final de resíduos sólidos é um problema evidente em muitas regiões do Brasil, visto que, em diversos casos, os resíduos são dispostos de forma inadequada, tornando-se potenciais degradadores do meio ambiente, podendo comprometer a saúde pública e a qualidade ambiental em

* Professora Substituta, Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul – Campus Chapecó. E-mail: manuellademorais@gmail.com

** Engenheiro Ambiental. Mestrando do Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade do Estado de Santa Catarina – Lages. E-mail: bandeira.felipeog@gmail.com

*** Professor Adjunto, Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul – Campus Chapecó. E-mail: mauro.menegotto@uffs.edu.br

magnitudes imensuráveis. Por outro lado, a utilização de materiais recicláveis em obras de engenharia tem sido uma área em constante desenvolvimento (Machin *et al.*, 2017), com o intuito de promover a destinação ambientalmente correta dos resíduos e diminuir a quantidade de recursos naturais extraídos do ambiente.

Um dos resíduos que apresentam maior dificuldade para a disposição final adequada são os pneus, os quais ocupam grande volume e, por isso, podem comprometer a estabilidade do aterro de resíduos se não forem dispostos em condições apropriadas. Em alguns países, a disposição final de pneus em aterros sanitários não é permitida (Oboirien e North, 2017) devido a elevada resistência deste material à biodegradação (Landi *et al.*, 2016), característica que potencializa o impacto negativo deste resíduo no ambiente.

Outro problema associado é a quantidade de pneus fabricados, fato que é agravado pela insuficiência de meios de transporte de carga alternativos, como as ferrovias, por exemplo. Segundo a Associação Brasileira do Segmento de Reforma de Pneus (ANIP, 2016) a indústria brasileira de pneus, somente no primeiro semestre de 2016, vendeu cerca de 35 milhões de unidades de pneumáticos de passeio e de carga, sendo que, aproximadamente 22 milhões de unidades serviram para abastecer somente no mercado de reposição. Como consequência, ocorre de forma equivalente a geração de pneus usados, que englobam os reformados e os inservíveis. A Resolução nº 416 do CONAMA (Brasil, 2009) define como pneus inservíveis aqueles que apresentam danos irreparáveis em sua estrutura não se prestando mais à rodagem ou à reforma.

No Brasil, exigências sobre a destinação adequada de pneus inservíveis existem desde o ano de 1999, por meio da Resolução nº 258 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (Brasil, 1999), revogada pela Resolução nº 416 do CONAMA (Brasil, 2009), que dispõe sobre a prevenção da degradação ambiental causada pelos mesmos. Essa resolução considera que os pneus usados devem ser preferencialmente reutilizados, reformados e reciclados antes de sua disposição final adequada, prolongando sua vida útil.

Uma alternativa viável é o prolongamento da vida útil dos pneus através dos processos de recapagem e recauchutagem. No entanto, estes processos também geram resíduos que, se não passarem por manejo e destinação final adequados, podem vir a degradar o ambiente, e por isso são objeto deste estudo.

Outra solução para a destinação adequada dos pneus é a trituração, processo que provoca a redução do volume do resíduo e, com isso, permite utilizá-lo em diversas aplicações, inclusive como reforço de solo. Franco *et al.* (2011) ressalta que, devido aos resíduos de pneus possuírem valores baixos de peso específico e alta durabilidade, seu uso se torna interessante na composição de material de aterro em estruturas de contenção (Sayão *et al.*, 2009) e, também, para melhoramento dos parâmetros de resistência de solos de baixa capacidade de suporte (Edinçliler *et al.*, 2010).

Nota-se, com isso, o aumento da preocupação acerca da disposição inadequada e a busca por alternativas de reutilização ambientalmente viáveis dos resíduos de borracha de pneus (Cetin *et al.*, 2006; Lagarinhos e Tenório, 2013; Selung *et al.*, 2013; Rissoli e Araújo, 2014; Ramirez *et al.*, 2015; Mashiri *et al.*, 2015; Anvari *et al.*, 2017).

Desse modo, o presente trabalho visa avaliar o comportamento mecânico e hidráulico de misturas de resíduos de borracha de pneus, provenientes do processo de recauchutagem, com um solo argiloso residual de basalto, para utilização em obras geotécnicas.

2 – CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS DO SOLO DA REGIÃO DE CHAPECÓ

A região oeste do estado de Santa Catarina, onde se localiza o Município de Chapecó, possui afloramento de rochas da Formação Serra Geral, do Grupo São Bento, predominando rochas vulcânicas efusivas representadas por uma sucessão de derrames que cobrem cerca de 50% da superfície do estado. Destacam-se duas sequências: a) sequência básica, constituída por basaltos de coloração cinza escura a negra e com intercalações de arenitos intertrapeanos; b) sequência ácida

representada por riolitos e riodacitos (Scheibe, 1986). O solo resultante da evolução dessas rochas possui bastante fertilidade e altos teores de cálcio e magnésio. Ainda, os solos residuais de basalto apresentam textura argilosa de cor vermelha escura e com uma drenagem bem desenvolvida (Diemer *et al.*, 2008).

Menegotto *et al.* (2016) realizaram a caracterização geotécnica do solo da Área Experimental da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) - *Campus* Chapecó. Essa área localiza-se nas coordenadas geográficas 27° 07' 07,9" S e 52° 42' 25,7" W e apresenta uma altitude de 603 m em relação ao nível do mar. A caracterização foi realizada por meio de ensaios de laboratório em amostras deformadas de solo, coletadas com o auxílio de um trado holandês, e compreendeu a determinação do teor de umidade natural (w), peso específico dos sólidos (γ_s), limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), índice de plasticidade (IP) e composição granulométrica do solo. Uma síntese dos resultados obtidos, para a profundidade de 0,5 m, é apresentada no Quadro 1. Com os resultados dos ensaios de caracterização, pode-se classificar o solo local por meio do Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) como um silte de alta plasticidade (MH).

Quadro 1 - Síntese dos resultados dos ensaios de caracterização do solo da Área Experimental da UFFS - *Campus* Chapecó (Menegotto *et al.*, 2016)

Prof. (m)	w (%)	γ_s (kN/m ³)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
0,5	29,3	27,57	79	13	8	53,3	39,9	13,4

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – Coleta, caracterização e preparação do solo

O solo utilizado nos ensaios de compactação, permeabilidade e cisalhamento direto foi coletado na Área Experimental do *Campus* Chapecó da UFFS. Realizou-se a abertura de uma cava de 1,0 x 1,0 m para a coleta da amostra deformada, que foi obtida entre 0,3 e 0,6 m de profundidade.

Inicialmente, o solo coletado foi seco ao ar livre até atingir a umidade higroscópica. As amostras de solo utilizadas nos ensaios de compactação foram preparadas de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016a). Como o solo apresenta textura bastante fina, a preparação dos corpos de prova para os ensaios de permeabilidade e cisalhamento direto foi realizada com o solo passante na peneira de malha número 10 (2,0 mm).

3.2 – Caracterização dos resíduos de borracha de pneus

Os resíduos de borracha utilizados neste estudo foram fornecidos por uma empresa de recauchutagem da região oeste de Santa Catarina. Com o intuito de padronizar o tamanho as partículas de resíduo utilizadas neste trabalho, o material foi peneirado numa malha de abertura de 2,0 mm, descartando-se o material retido. Uma amostra do resíduo de borracha peneirado é apresentada na Figura 1. Os resíduos de borracha possuem, de maneira geral, formato fibrilar.

A caracterização deste resíduo consistiu na realização dos ensaios de granulometria e de peso específico dos sólidos. A determinação da composição granulométrica dos agregados foi realizada seguindo as diretrizes da NBR 7181 (ABNT, 2016b).

A determinação do peso específico dos sólidos seguiu a NBR 6508 (ABNT, 1984), apenas substituindo-se a água por álcool, uma vez que com a utilização de água uma parte das partículas de borracha ficaria flutuando na superfície, impedindo a leitura correta do volume do material contido no picnômetro.



Fig. 1 - Formato fibrilar do resíduo de borracha de pneus.

3.3 – Misturas de solo com resíduos de borracha

Para a realização dos ensaios de compactação, permeabilidade e cisalhamento direto foram adotados os teores de resíduos de borracha de pneu de 0% (solo puro), 5%, 10%, 15% e 20%. Estes teores correspondem a proporções em massa de solo seco. Desta forma, o teor de resíduos de borracha de pneus (β) foi definido conforme a equação seguinte:

$$\beta = \frac{M_{BS}}{M_{BS} + M_{SS}} \cdot 100 \quad (1)$$

onde: M_{BS} é a massa de borracha seca ao ar; e M_{SS} é a massa de solo seco ao ar, ambas corrigidas pela umidade higroscópica.

3.4 – Ensaio de compactação

O Ensaio de Compactação de Proctor foi realizado de acordo com NBR 7182 (ABNT, 2016c), utilizando-se um cilindro metálico de aproximadamente 1000 cm³. O número de camadas, número de golpes, bem como o modelo de soquete utilizado, foram correspondentes ao emprego da energia normal. Os valores do peso específico seco máximo e do teor de umidade ótimo, determinados para cada uma das misturas, foram posteriormente empregados na moldagem dos corpos de prova utilizados nos demais ensaios.

O índice de vazios dos corpos de prova moldados no ensaio de compactação foi determinado utilizando um peso específico dos sólidos ponderado (γ_{SM}), calculado com base nos pesos específicos dos sólidos do solo e da borracha e suas respectivas porcentagens na composição das misturas, conforme a equação:

$$\gamma_{SM} = \frac{\gamma_{SB} \cdot \beta + \gamma_{SS} \cdot (1 - \beta)}{100} \quad (2)$$

onde: γ_{SB} é o peso específico dos sólidos do resíduo de borracha; γ_{SS} é o peso específico dos sólidos do solo; e β corresponde ao teor de resíduo de borracha na mistura.

3.5 – Ensaio de permeabilidade

Os ensaios de permeabilidade foram realizados com corpos de prova compactados dinamicamente no teor de umidade ótimo obtido no ensaio de compactação de Proctor Normal, com uma tolerância para variação de peso específico seco de $\pm 0,5$ kN/m³. A determinação do coeficiente de permeabilidade das misturas solo-borracha foi realizada de acordo com os procedimentos descritos na NBR 14545 (ABNT, 2000), para ensaios de permeabilidade a carga variável pelo método B. Inicialmente, realizou-se a saturação do corpo de prova preparado no interior do permeâmetro. A duração aproximada deste processo foi de 1 a 3 dias, diminuindo o tempo conforme se aumentavam os teores de resíduo de borracha adicionados à mistura. Posteriormente, o ensaio consistiu em permear uma coluna d'água sob o corpo de prova, efetuando a medição das cargas hidráulicas em um decorrido período de tempo. Esse procedimento foi efetuado para um gradiente hidráulico médio de 10, sendo realizadas quatro determinações do coeficiente de permeabilidade por mistura. Mediante obtenção desses dados e da temperatura da água no momento do ensaio, pôde-se determinar pela média dos resultados, o coeficiente de permeabilidade da amostra padronizado para a temperatura de 20°C.

3.6 – Ensaio de cisalhamento direto

As amostras utilizadas no ensaio de cisalhamento direto foram compactadas estaticamente, em três camadas, utilizando para este fim uma prensa de ISC (Índice de Suporte Califórnia). A compactação ocorreu no teor de umidade ótimo até ser atingido o peso específico seco máximo de cada uma das misturas analisadas.

Os ensaios foram conduzidos de acordo com o estabelecido pela ASTM D 3080 (2012), sendo empregada uma célula de cisalhamento de 50 x 50 mm de lado.

A aplicação da tensão normal e da tensão cisalhante foi realizada em um equipamento servocontrolado, que possui dois sensores para medição de deslocamentos lineares (LVDTs), os quais medem deslocamento vertical e horizontal, e uma célula de carga para medida da força de cisalhamento. Através dos parafusos espaçadores da célula superior foi ajustada uma folga de aproximadamente 1 mm entre as células.

A velocidade de cisalhamento utilizada foi de 0,02 mm/min e o ensaio foi conduzido até um deslocamento máximo de 8,0 mm. As tensões normais adotadas nos ensaios foram de 50, 100, 200 e 300 kPa.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Caracterização dos resíduos de borracha de pneus

A curva de distribuição granulométrica dos resíduos de borracha de pneus é apresentada na Figura 2, juntamente com a curva de distribuição granulométrica do solo local, obtida nos estudos realizados por Menegotto *et al.* (2016) e a composição das diferentes misturas de solo com o resíduo. Pode-se observar que o diâmetro efetivo do resíduo é de 0,3 mm e que praticamente 100% dos resíduos de borracha de pneus ensaiados, apresentaram diâmetro variando de 0,07 a 2,0 mm. De

acordo com a NBR 6502 (ABNT, 1995) esse intervalo de diâmetros das partículas corresponde à fração areia, coincidindo assim com os resultados esperados quando observada a aparência fibrilar/granular dos resíduos.

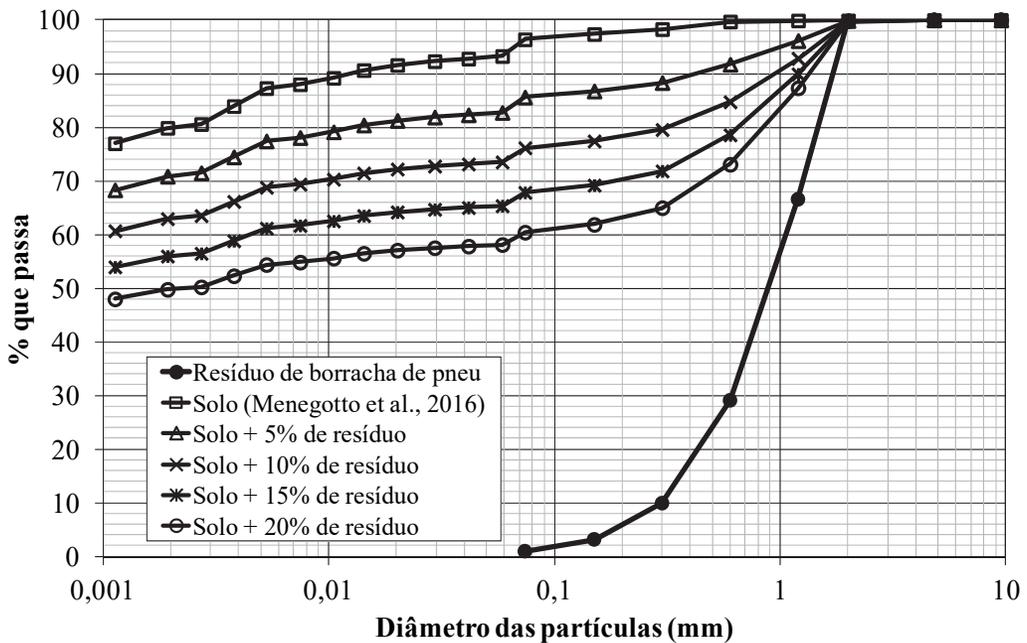


Fig. 2 - Curva de distribuição granulométrica do resíduo de borracha de pneus, do solo puro e das misturas de solo com o resíduo.

O valor obtido para o peso específico dos sólidos do resíduo de borracha foi de $11,40 \text{ kN/m}^3$, o que condiz com os valores de $10,90 \text{ kN/m}^3$ e $11,10 \text{ kN/m}^3$ obtidos por Fioriti *et al.* (2007) e Franco *et al.* (2011), respectivamente. Essa pequena variabilidade entre o peso específico dos sólidos em cada um dos estudos, deve-se basicamente às diferenças entre os materiais amostrados, podendo ser relacionada ao diâmetro das partículas ou, até mesmo, à presença ou não de tiras de aço no volume ensaiado. As tiras de aço estão presentes nos pneus e, quando não devidamente separadas, podem ser encontradas no resíduo produzido no processo de recauchutagem.

4.2 – Ensaio de compactação

Utilizando o solo puro e misturas de solo com resíduos de borracha de pneus, nos teores 5%, 10%, 15% e 20%, foram realizados os ensaios de compactação de Proctor na energia normal, resultando nas curvas de compactação apresentadas na Figura 3. Na mesma figura são apresentadas as curvas de igual grau de saturação de 90 e 100%, ambas correspondentes ao solo puro. Pode-se observar que, com o aumento do teor de resíduos de borracha de pneus adicionado a mistura, ocorre uma redução do peso específico seco máximo e do teor de umidade ótimo. O mesmo comportamento foi constatado por Franco *et al.* (2011) e Ramirez *et al.* (2015).

Conforme Das (2011), o tipo de solo submetido ao processo de compactação, ou seja, tamanho dos grãos, distribuição granulométrica, peso específico dos sólidos, entre outros, exerce extrema influência sobre o peso específico seco máximo e o teor de umidade ótimo obtidos ao final do processo. Quando se observam os resultados referentes aos ensaios de caracterização efetuados para

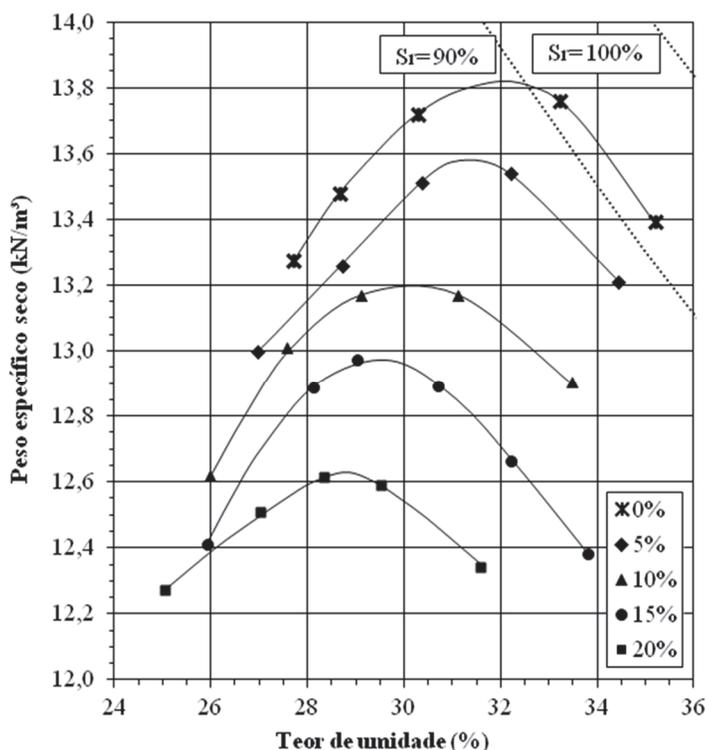


Fig. 3 - Curvas de compactação para as amostras ensaiadas com diferentes teores de resíduos de borracha de pneus.

o solo puro e para os resíduos de borracha, pode-se verificar uma significativa diferença entre os dois tipos de materiais. O solo, por exemplo, possui predominância de partículas finas, enquanto os resíduos de borracha são basicamente compostos de partículas grossas. O peso específico dos sólidos dos resíduos de borracha é aproximadamente 2,4 vezes menor que o peso específico dos sólidos do solo. Sendo assim, a combinação gradativa desses materiais, resulta numa modificação também gradual do peso específico seco máximo e do teor de umidade ótimo.

Esse comportamento, pode ser visualizado nas Figuras 4 e 5, nas quais são apresentadas, respectivamente, as relações entre o peso específico seco máximo e o teor de umidade ótimo em função do teor de resíduo de borracha da mistura.

Em ambas as relações se verifica o comportamento decrescente e linear entre as variáveis. O coeficiente de determinação (R^2), do ajuste obtido em ambas as figuras, demonstra uma boa relação entre as variáveis. Os resíduos de borracha de pneus, por tratarem-se de materiais mais leves que o solo, provocam a redução de 8,6% do peso específico seco máximo para a mistura com teor de 20% de resíduos de borracha em relação ao solo puro, corroborando os resultados apresentados por Chrusciak e Araujo (2015) que estabeleceram relação semelhante.

Já o teor de umidade ótimo, apresenta redução de aproximadamente 10,1% comparando a mistura de teor 20% ao solo puro. Franco *et al.* (2011) determinou a capacidade de absorção de água dos resíduos de borracha de pneus, obtendo o valor de 5,5%. Neste sentido, ao observar que proporcionalmente à adição dos resíduos de borracha nas misturas ocorre a redução da massa de solo é justificável que ocorra a redução do teor de umidade ótimo, uma vez que o solo, por ser constituído predominantemente de minerais argilosos (esmectita, ilita e caulinita), absorve significativamente mais água que os resíduos de borracha.

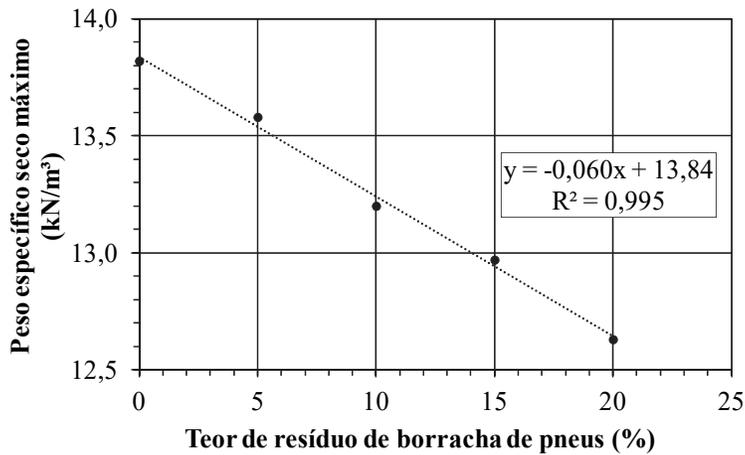


Fig. 4 - Relação entre peso específico seco máximo e o teor de resíduos de borracha de pneus.

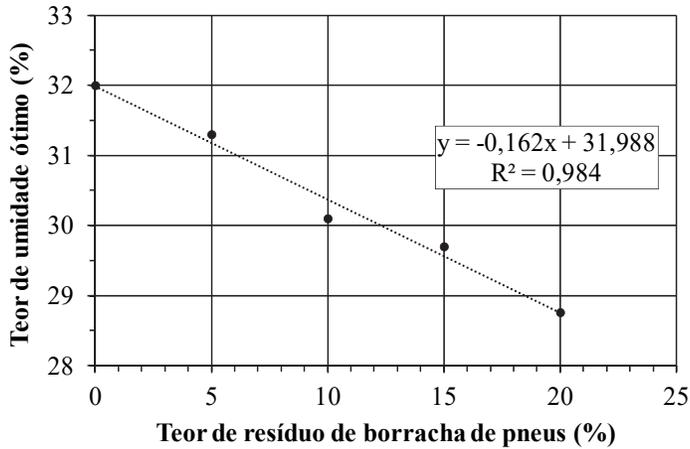


Fig. 5 - Relação entre o teor de umidade ótimo e o teor de resíduo de borracha de pneus.

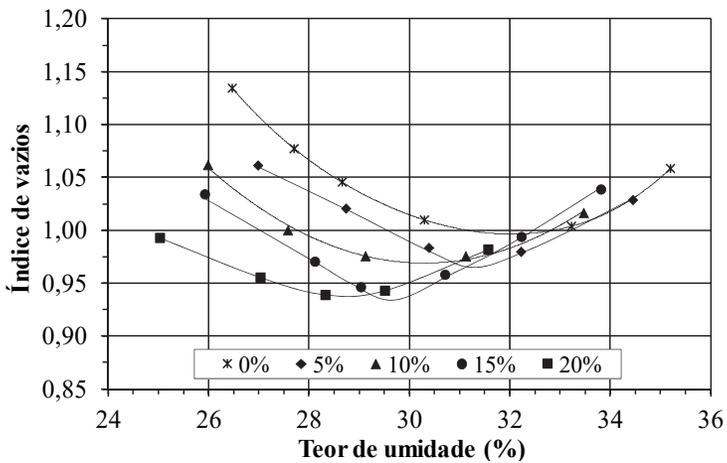


Fig. 6 - Relação entre o teor de umidade e o índice de vazios do solo.

Ainda, por meio dos dados obtidos no ensaio de compactação de Proctor, pode-se estabelecer, para cada teor de resíduo de borracha, uma relação entre o índice de vazios e o teor de umidade (Figura 6). Por meio das curvas, verifica-se que no teor de umidade ótimo o índice de vazios mínimo sofre uma pequena variação, de 0,93 a 0,99, entre todos os teores de resíduos de borracha. Deste modo, a compacidade final das misturas praticamente não foi influenciada pelo acréscimo do teor de borracha, comportamento semelhante ao identificado por Chrusciak e Araujo (2015).

4.3 – Ensaio de permeabilidade

Na Figura 7 são apresentados os resultados do coeficiente de permeabilidade para os diferentes teores de resíduos de borracha de pneus empregados nas misturas, bem como um ajuste exponencial entre os pontos medidos. A permeabilidade do solo puro corresponde aos valores típicos de solos finos com baixa permeabilidade. Por outro lado, as misturas com 15 e 20% de teor de borracha apresentaram valores de coeficiente de permeabilidade característicos de areias argilosas a areias finas.

Apesar do corpo de prova correspondente ao teor de resíduo de borracha de 10% ficar em processo de saturação por aproximadamente três dias, a redução do coeficiente de permeabilidade em relação ao teor de 5% pode ter ocorrido devido ao aprisionamento de bolhas de ar na amostra ensaiada. Porém, de maneira geral identifica-se um aumento do coeficiente de permeabilidade conforme ocorre o incremento do teor de resíduos de borracha à mistura, principalmente devido à alteração da fração granular na mistura. Este comportamento é semelhante ao observado por Franco *et al.* (2011), que identificou acréscimo significativo deste coeficiente até o teor de borracha de 20% e variações pouco expressivas para teores maiores.

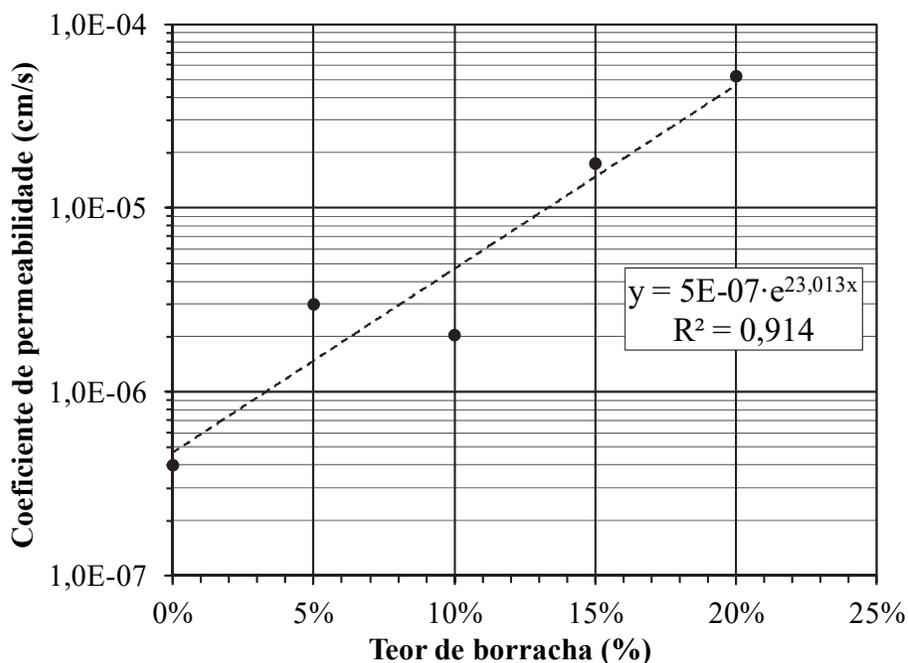


Fig. 7 - Coeficiente de permeabilidade para amostras com diferentes teores de resíduo de borracha de pneus.

4.4 – Ensaio de cisalhamento direto

As curvas tensão cisalhante e deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal obtidas nos ensaios de cisalhamento direto referentes aos teores de 0 (solo puro), 10% e 20% de resíduo de borracha são apresentadas nas Figuras 8 a 10. Em relação à deformação vertical, o valor positivo refere-se à redução de volume e o valor negativo à dilatação da amostra durante o cisalhamento.

Na Figura 8 observa-se que a amostra de solo puro apresentou picos de resistência bem definidos para as tensões normais de 50 e 100 kPa, os quais ocorreram em deslocamentos horizontais da ordem de 1,5 mm. Nas demais curvas do solo puro e das misturas de solo com resíduos de borracha, a tensão cisalhante praticamente estabiliza-se com o aumento dos níveis de deslocamento horizontal. No solo puro a tensão cisalhante estabilizou com deslocamento de cerca de 2,0 mm e com o incremento do resíduo de borracha as misturas passaram a apresentar estabilização da tensão cisalhante a partir de 3,0 a 4,0 mm. Além disso, existe uma tendência de aumento do deslocamento horizontal necessário para a ruptura do corpo de prova, com o aumento do teor de borracha. Esse comportamento foi também observado por Chrusciak (2013), que afirma que a borracha acrescentada ao solo acaba por absorver certa energia que é aplicada ao solo e, por ser mais deformável, acaba por atenuar o pico de resistência.

As curvas de deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal demonstram que os corpos de prova de solo puro sofreram inicialmente uma contração muito baixa, passando a apresentar comportamento de aumento de volume durante o cisalhamento em todas as tensões normais aplicadas, com maior dilatação para os menores níveis de tensões normais. Para as misturas de solo com borracha, nota-se que todos os corpos de prova sofreram uma contração inicial, para deslocamentos entre 0,5 e 2,0 mm, para a seguir apresentarem um aumento de volume para maiores níveis de deslocamento. De maneira geral, os deslocamentos horizontais, nos quais as misturas apresentam compressão, aumentam com o acréscimo da porcentagem de resíduo na mistura.

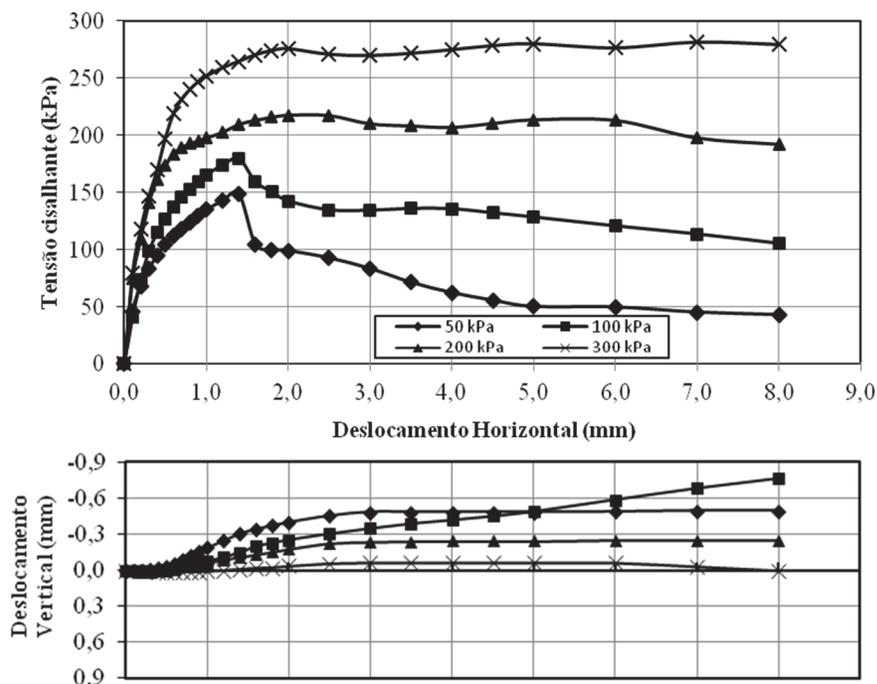


Fig. 8 - Resultados do ensaio de cisalhamento direto em amostras de solo puro.

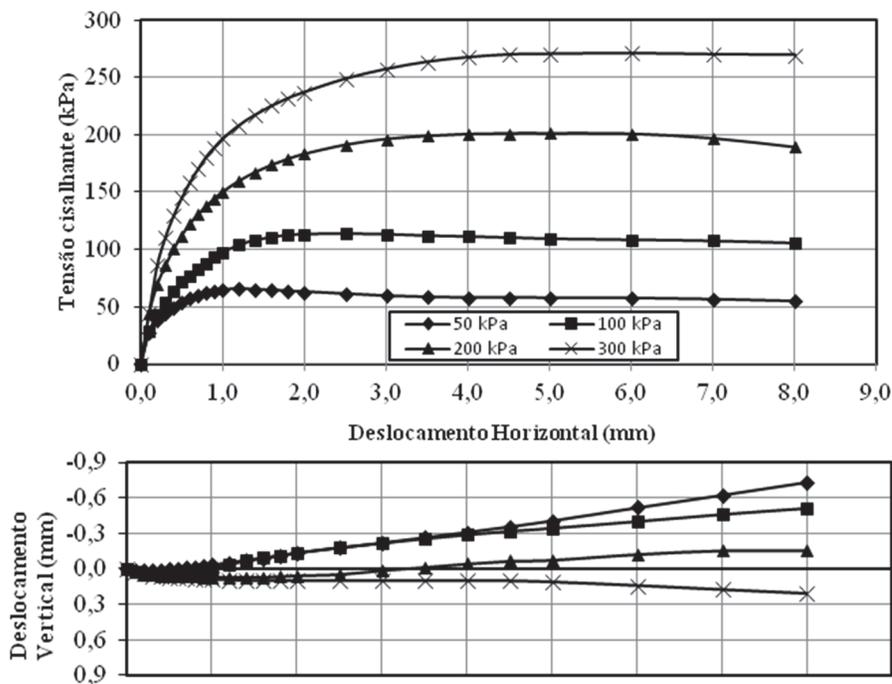


Fig. 9 - Resultados do ensaio de cisalhamento direto para a mistura com 10% de resíduo de borracha de pneus.

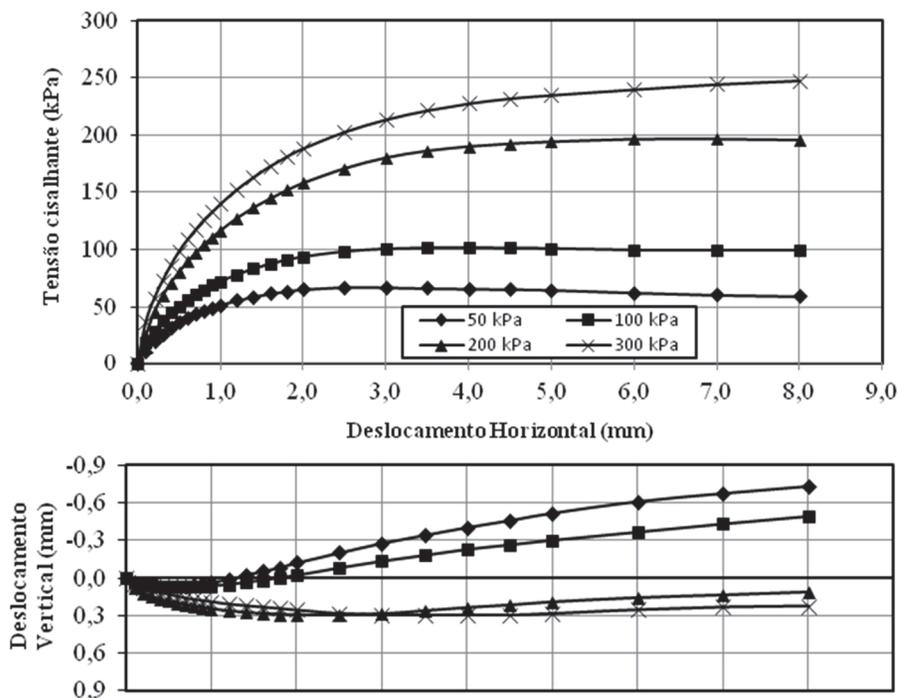


Fig. 10 - Resultados do ensaio de cisalhamento direto para a mistura com 20% de resíduo de borracha de pneus.

O comportamento de compressão, em níveis mais baixos de tensão normal, seguido de dilatação para maiores deslocamentos também foi observado por Franco *et al.* (2011). Esse comportamento está relacionado com as características granulométricas e elásticas da borracha, que com o deslocamento relativo entre as partículas passa a exercer uma pressão de expansão, contrária à tensão normal aplicada. De maneira geral, para os níveis de tensão normal mais elevados, as amostras das misturas de solo com o resíduo apresentaram comportamento de redução de volume nos pontos correspondentes às tensões de cisalhamento máximo. Exceção foi verificada na mistura com teor de borracha de 10% e tensão normal de 300 kPa, em que houve uma reduzida dilatação na ruptura de 0,07 mm (0,35%).

Na Figura 11, são apresentadas as perdas de resistência por teor de borracha em cada nível de tensão normal nominal aplicado. Nota-se que, de maneira geral, para os teores de borracha empregados, a porcentagem de redução diminui com o aumento da tensão normal.

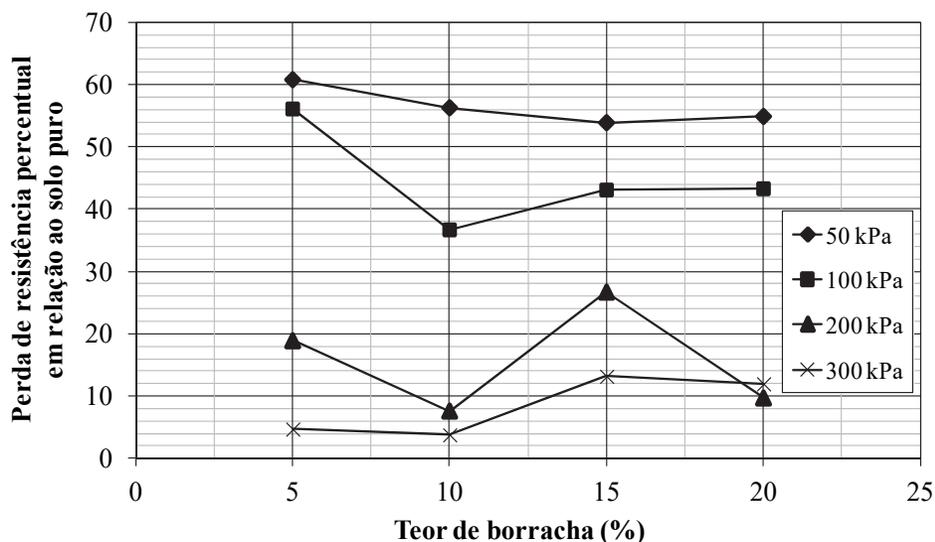


Fig. 11 - Porcentagem de redução da resistência por teor de borracha em cada tensão normal nominal.

De posse das tensões cisalhantes máximas obtidas das curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento vertical foram traçadas as envoltórias de resistência por meio do critério de Mohr-Coulomb, seguindo as prescrições da ASTM D 3080 (2012). As envoltórias são apresentadas na Figura 12 e os valores de intercepto de coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ) correspondentes são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Síntese dos parâmetros de resistência para o solo puro e misturas de solo com borracha.

Teor de borracha (%)	Intercepto de Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
0	123,5	27,1
5	4,4	40,9
10	28,8	39,4
15	31,5	34,6
20	32,0	36,7

Com os valores apresentados no Quadro 2, percebe-se uma acentuada diminuição do intercepto de coesão das misturas de solo com resíduos de borracha em relação ao solo puro. A mistura com teor de borracha de 5% apresentou o menor valor de coesão, de 4,4 kPa. Entretanto, na definição da envoltória, essa mistura foi apresentada a maior dispersão nos pares de valores de tensão normal e tensão de cisalhamento no plano de ruptura. Para as demais misturas o valor do intercepto de coesão apresentou uma variação entre 28,8 kPa e 32,0 kPa. Em contrapartida, o incremento do teor de borracha promoveu um aumento do ângulo de atrito interno, de 27,1° no solo puro para valores entre 34,6° a 40,9° nas misturas de solo com borracha, embora não possa ser definida uma tendência clara desta variação. O aumento do ângulo de atrito pelo acréscimo da borracha também foi evidenciado em outros estudos, como Franco *et al.* (2011) em uma areia argilosa, Tatlisoz *et al.* (1998) em solos arenosos e silto arenosos e Zornberg *et al.* (2004).

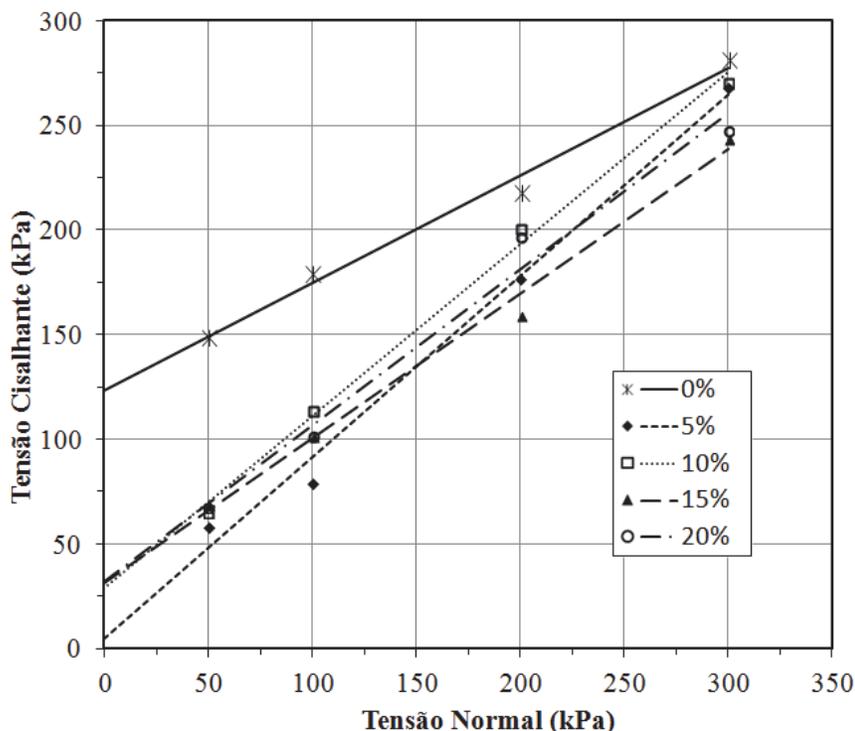


Fig. 12 - Envoltórias de ruptura para o solo puro e misturas de solo com borracha.

Os resultados apresentados na Figura 12 evidenciam que o teor de borracha que apresentou menor perda de resistência em relação ao solo puro situa-se próximo dos 10%, visto que este teor corresponde à mistura que apresentou a envoltória mais elevada em relação às demais. Nota-se, ainda, que a partir de valores de tensão normal superiores a 300 kPa a envoltória de tensões da mistura com 10% de borracha ultrapassa a envoltória de tensões do solo puro.

Tendo em vista que o peso específico seco máximo da mistura é menor do que a do solo puro, a utilização da mistura de solo com borracha em projetos de aterros que se assentem sobre solos mais deformáveis, ou de menor resistência, é uma alternativa viável. Apesar de promover redução da resistência ao cisalhamento para níveis de tensão normal menores que 300 kPa, o incremento da borracha ao solo proporciona diminuição do peso da camada, o que possibilita sua utilização como material de enchimento em obras geotécnicas (Anvari *et al.*, 2017; Mashiri *et al.*, 2015), promovendo uma tensão menor sobre o solo de base.

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo apresentou os resultados dos ensaios de compactação, permeabilidade de carga variável e cisalhamento direto realizados com objetivo de avaliar a viabilidade da incorporação de resíduos de borracha de pneus, provenientes do processo de recauchutagem, a um solo argiloso representativo da região oeste do Estado de Santa Catarina.

Os parâmetros de compactação, teor de umidade ótimo e peso específico seco máximo, mostraram-se bastante influenciáveis pelo teor de borracha de pneus. Esses parâmetros apresentaram redução de seus valores como consequência do incremento dos teores de resíduos adicionados à mistura, devendo-se, principalmente, à reduzida capacidade de absorção de água pelo resíduo de borracha de pneus e seu baixo valor de peso específico dos sólidos.

O coeficiente de permeabilidade mostrou uma tendência de crescimento com o incremento do teor de borracha de pneus adicionado a mistura, passando da ordem de 10^{-7} cm/s com o solo puro para a ordem de 10^{-5} cm/s na mistura contendo 20% de resíduo de borracha. A permeabilidade do solo puro corresponde aos valores típicos de solos finos com baixa permeabilidade. Por outro lado, as misturas com 15 e 20% de teor de borracha apresentaram valores de coeficiente de permeabilidade característicos de areias argilosas a areias finas.

As amostras de solo puro apresentaram picos de resistência bem definidos nos ensaios de cisalhamento direto com baixos valores de tensão normal. Por outro lado, as misturas de solo com borracha não apresentaram um pico de resistência bem definido, ocorrendo estabilização da tensão cisalhante a partir de deslocamentos horizontais maiores.

Em relação à variação do volume, constatou-se que as misturas de solo com borracha sofreram inicialmente uma contração passando a apresentarem comportamento dilatante para deslocamentos horizontais maiores. Este comportamento está relacionado com as características granulométricas e elásticas da borracha.

As misturas apresentaram, de maneira geral, maior ângulo de atrito interno e menor coesão, se comparadas ao solo puro, pois o resíduo de borracha tende a comportar-se como um material granular dentro da amostra de solo. A mistura com teor de borracha de 10% apresentou a envoltória de resistência mais próxima à do solo puro, com resistência superior a este a partir de níveis de tensão normal maiores que 300 kPa.

Observou-se que, com um pequeno incremento de borracha ao solo, houve grande diminuição do intercepto de coesão. Este fato está relacionado com as características da borracha, que se comporta como um material granular no interior do solo, fazendo com que as misturas assumam comportamento similar ao de solos arenosos.

Por meio dos ensaios realizados, constata-se que o emprego da mistura de solo e resíduos de borracha de pneus como material de obras de engenharia só pode ser efetivado mediante análise e estudo criterioso do comportamento da mistura nas funções pretendidas. Obras que necessitem reduzir esforços em camadas inferiores do solo, empregando materiais de enchimento mais leves, podem utilizar a mistura de solo e teores de resíduos de borracha de pneus, devido à redução do peso específico seco obtido ao final da compactação. A mistura pode também ser empregada em obras que não requeiram condições de drenagem restritivas.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 6457 (2016a). Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro.

ABNT NBR 6502 (1995). *Rochas e solos*. Rio de Janeiro.

ABNT NBR 6508 (1984). *Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro.

- ABNT NBR 7181 (2016b). *Solo - Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 7182 (2016c). *Solo – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 14545 (2000). *Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável*. Rio de Janeiro.
- ABNT NBR NM 45 (2006). *Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro.
- ANIP (2016). *Resultados dos fabricantes nacionais de pneus: 1º semestre de 2016*. São Paulo, 2016. Disponível em: <http://www.anip.com.br/arquivos/infografico_anip_1_semestre_2016.pdf>. Acesso em: 5 out. 2016.
- Anvari, S. M.; Shooshpasha, I.; Kutanaei, S. S. (2017). *Effect of granulated rubber on shear strength of fine-grained sand*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, v.9, n.5, p.936-944, out. 2017.
- ASTM D3080/D3080M-11 (2012). *Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Brasil (1999). *Resolução CONAMA nº 258, de 26 de agosto de 1999*. Diário Oficial da União, República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 2 dez. 1999. Seção 1, p. 39. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=258>>. Acesso em: 15 mar. 2016.
- Brasil (2009). *Resolução CONAMA nº 416, de 30 de setembro de 2009*. Diário Oficial da União, República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, nº 188, 1 out. 2009. Seção 1, p. 64-65. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>. Acesso em: 15 mar. 2016.
- Cetin, H.; Fener, M.; Gunaydin, O. (2006). *Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as a fill material*. Engineering Geology, n. 88, p. 110-120, nov.
- Chrusciak, M. R. (2013). *Análise da melhoria do solo utilizando fragmento de borracha*. 91 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- Chrusciak, M. R.; Araujo, G. L. S. (2015). *Estudo da compactação de misturas de pedaços de pneu com solos finos*. In: VII Congresso Brasileiro de Geossintéticos e VIII Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 2015, Brasília.
- Das, B. M. (2011). *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning.
- Diemer, F.; Specht, L. P.; Strauss, D. A.; Pozzobon, C. E. (2008). *Propriedades geotécnicas do solo residual de basalto da região de Ijuí/RS*. Teoria e Prática da Engenharia Civil, Rio Grande, n. 12, p. 25-36.
- Edinçliler, A., Baykal, G.; Saygili, A. (2010). *Influence of different processing techniques on the mechanical properties of used tires in embankment construction*. Waste Management, v. 30, p. 1073-1080.
- Fioriti, C. F.; Ino, A.; Akasaki, J. L. (2007). *Avaliação de blocos de concreto para pavimentação intertravada com adição de resíduos de borracha provenientes da recauchutagem de pneus*. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 7, n. 4, p. 43-54, out./dez.
- Franco, K. L. B.; Costa, Y. D. J.; Silva Jr., A. L. (2011). *Caracterização Geotécnica de Misturas de Resíduos de Pneus e Solo Laterítico*. In: VII Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental - VI Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, 2011, Belo Horizonte.

- Lagarinhos, C. A. F.; Tenório, J. A. S. (2013). *Logística reversa dos pneus usados no Brasil*. Polímeros, vol.23, n.1, p.49-58.
- Landi, D.; Vitali, S.; Germani, M. (2016). *Environmental analysis of different end of life scenarios of tires textile fibers*. Procedia Cirp, v.48, p.508-513.
- Machin, E. B.; Pedroso, D. T.; Carvalho, J. A. (2017). *Technical assessment of discarded tires gasification as alternative technology for electricity generation*. Waste Management, v. 68, p.412-420, out. 2017.
- Mashiri, M. S.; Vinod, J. S.; Sheikh, M. N.; Tsang, H. (2015) *Shear strength and dilatancy behaviour of sand–tyre chip mixtures*. Soils and Foundations, v.55, n.3, p.517-528, jun. 2015.
- Menegotto, M. L.; Bandeira, F. O.; Sartori, L.; Morais, M. (2016). *Caracterização geotécnica preliminar do solo da Área Experimental da UFFS - Campus Chapecó*. In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2016, Belo Horizonte - MG. Anais... São Paulo: ABMS.
- Oboirien, B. O.; North, B. C. (2017). *A review of waste tyre gasification*. Journal of Environmental Chemical Engineering, v.5, n.5, p.5169-5178, out. 2017.
- Ramirez, G. G. D.; Casagrande, M. D. T.; Folle, D.; Pereira, A.; Paulon, V. A. (2015). *Behavior of granular rubber waste tire reinforced soil for application in geosynthetic reinforced soil wall*. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, vol. 8, nº 4, p.567-576, aug.
- Rissoli, A. L. C.; Araújo, G. L. S. (2014). *Utilização de resíduos de pneus em obras geotécnicas*. In: XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2014, Goiânia - GO. Anais... São Paulo: ABMS.
- Sayão, A. S. F. J.; Gerscovich, D. M. S.; Medeiros, L. V.; Sieira, A. C. C. F. (2009). *Scrap tires: an attractive material for gravity retaining walls and soil reinforcement*. Journal of Solid Waste Technology and Management, v.35, p.1-25.
- Scheibe, L.F. (1986). *A geologia de Santa Catarina: sinopse provisória*. Geosul, vol. 1, n. 1, p.7-38.
- Selung, C; Menegotto, M. L.; Menegotto, A. G. F.; Pavan, R. C. (2013). *Avaliação de blocos de concreto para alvenaria com adição de resíduos de borracha de pneu*. Holos Environment (Online), v.13, n.2.
- Tatlisoz, N., Edil, T. B., Benson, C. H. (1998). *Interaction between reinforcing geosynthetics and soil-tire chip mixtures*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v.124, n.11, p.1109–1119.
- Zornberg, J. G.; Cabral, A. R.; Viratjandr, C. (2004). *Behaviour of tire shred – sand mixtures*. Canadian Geotechnical Journal, v.41, n.2, p.227-241.