

ANÁLISE DO RESÍDUO DE BORRACHA COMO REFORÇO DE SOLO

Larissa Santos da Rocha¹

Rafaella Oliveira dos Anjos²

Anderson da Conceição Santos Sobral³

Engenharia Civil



ISSN IMPRESSO 1980-1777

ISSN ELETRÔNICO 2316-3135

RESUMO

A estabilização do solo se tornou frequente nos últimos anos, pois melhora as propriedades dos solos, quando estes não satisfazem as exigências do projeto. Assim, os estudiosos recorrem às novas técnicas de estabilização, tais como a mecânica com adição de materiais. Dentre esses materiais, encontra-se a borracha proveniente de pneus, sendo bastante utilizada pela indústria automobilística. Esse polímero, após sua vida útil, torna-se um material inservível e com isso há uma preocupação com seu descarte. Desta forma, fomos incentivados a realizar aproveitamento desse material para o reforço do solo, pelo simples fato de ser renovável como resíduo. O principal objetivo é analisar o comportamento mecânico de um solo arenoso com adição desse resíduo em diferentes proporções (5%, 10% e 15%). Para analisar esse solo natural, serão realizados ensaios como: granulometria, limites de Atterberg, compactação, índice de suporte de Califórnia (ISC), compressão confinada simples e compressão não confinada. Os resultados obtidos mostraram que na granulometria do solo, resultou em 50,79% de areia média. Na compactação, as misturas precisaram mais de água e houve redução do seu peso específico. Houve aumento da expansão com adição do resíduo. Quanto ao ISC, o resíduo provocou um aumento na resistência. A melhor compactação e resistência foi observada pela amostra de 15% de borracha, com aumento de 26,93% de resistência em relação ao solo natural. Houve aumento da compressibilidade do solo com o resíduo. Em suma, a mistura com 10% de borracha se destacou das demais, sendo adequada para uso em subleito, segundo o DNIT.

PALAVRAS-CHAVE

Solos Arenosos. Reforço do solo. Estabilização. Borracha

ABSTRACT

Soil stabilization has become frequent in recent years, as it improves the properties of soils, when they do not meet the requirements of the project. In this way, scholars resort to new stabilization techniques, such as mechanics with the addition of materials. Among these materials, there is rubber from tires, which is widely used by the automobile industry. After its useful life, this polymer becomes a useless material and with this there is a concern with its disposal. In this way, we were encouraged to use this material to reinforce the soil, simply because it is renewable as waste. The main objective is to analyze the mechanical behavior of a sandy soil with the addition of this residue in different proportions (5%, 10% and 15%). For a better analysis of this natural soil, tests will be carried out such as: granulometry, Atterberg limits, compaction, California support index (ISC), simple confined compression and unconfined compression. The results obtained showed that in the soil granulometry, it resulted in 50.79% of average sand. In compaction, the mixtures needed more water and their specific weight was reduced. There was an increase in expansion with the addition of the residue. As for ISC, the residue caused an increase in resistance. The best compaction and resistance was the 15% rubber sample, with an increase of 26.93% in relation to the natural soil. There was an increase in the compressibility of the soil with the residue. In short, the mixture with 10% rubber stood out from the others, being suitable for use in the subgrade, according to DNIT.

KEYWORDS

Sandy soils. Reinforcement of the soil. Stabilization. Rubber.

1 INTRODUÇÃO

O setor da Construção e da Engenharia Civil tem a necessidade de grande quantidade de solo para diversos tipos de obras e projetos. Contudo, o solo natural é um composto heterogêneo e complexo, a depender de sua localidade, e por isso, nem sempre está de acordo com as exigências mínimas para o uso de determinada obra. Então, uma solução a ser adotada é alterar a propriedade do solo existente de forma a criar um material capaz de responder às necessidades previstas (FONINI, 2008).

Segundo Feuerharmel (2000), o engenheiro geotécnico possui várias alternativas para a melhoria das propriedades do solo quando estes não são capazes de cumprir adequadamente as exigências de projeto, são elas: a compactação, o adensamento por pré-carregamento e/ou drenos verticais, a injeção de materiais estabili-

zantes, a estabilização por processos físico-químicos e reforço de solo com a inclusão de elementos resistentes (geossintéticos, fibras, tiras, grelhas).

No âmbito de melhoria recorrendo à estabilização mecânica, vários estudos recorrem à adição ao solo de materiais como fibras de sisal, bambu, coco ou polímeros. Na classificação dos polímeros destaca-se a borracha que tem sido alvo de estudos para sua aplicabilidade em reforço de solos (PEREIRA *et al.*, 2016).

Casagrande e Jaramillo (2016), observaram que a utilização de borracha em obras de construção civil como algo viável, devido o mesmo apresentar baixa densidade, alta durabilidade, alto isolamento térmico e em muitos casos, menor custo comparado com outros materiais. Eles também descobriram que o comportamento da mistura com um solo granular melhorou a resistência ao cisalhamento com o aumento da porcentagem da borracha inserida no solo puro.

Segundo Chrusciak (2013), o pneu tornou-se um elemento indispensável para os veículos, implantados pela indústria automobilística. Após a sua vida útil passou a ser considerado um material inservível e este como resíduo apresenta muito volume, e possui uma degradação lenta. Dessa forma, fez-se necessário um descarte de forma sustentável.

A NBR 10.004 (ABNT, 2004) define o resíduo como um material sólido ou semi-sólido resultando de processos industrial, doméstico, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Nessa classe, os pneus inservíveis possuem características de biodegradabilidade, combustibilidade e apresentam componentes acima dos níveis de referência de solubilidade da água, a qual os classifica na Classe II A.

Ao analisar o comportamento do pneu inservível como reforço do solo, Bandeira, Morais e Menegotto (2018), apresentaram resultados dos ensaios de compactação e cisalhamento direto em solo argiloso. Parâmetros como umidade ótima, peso específico seco máximo mostraram-se bastante influenciáveis com o teor da borracha do pneu. No parâmetro da resistência, o solo puro apresentou picos de resistência bem definidos, diferentemente das misturas solo-borracha, porém, entre as porcentagens de mistura, 10% apresentou melhores resultados.

Segundo Alvez e Góngora (2016), em meados do século XX, o desenvolvimento urbano se acelerou e, com isso, foi possível destacar alguns aspectos do uso do solo devido ao aumento populacional, social e gerencial. Nesse ambiente de desenvolvimento, os produtos industrializados passaram a ser cada vez mais utilizados pela população.

Assim, observou-se a crescente geração de resíduos, particularmente dos pneus inservíveis. Segundo a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP), no mês de outubro de 2019, houve um crescimento de 12% de produção de pneus em relação ao mês de outubro em 2018, isso levou a mais de 49 milhões de pneus fabricados até o mês de referência, um aumento de 0,6% comparado a produção em 2018. E esse aumento acarreta no aumento de pneus inservíveis.

Nos centros urbanos, foi percebida uma despreocupação da população no descarte desse resíduo. Muitas vezes liberados em aterros a céu aberto gerando proliferação de microorganismos prejudiciais à saúde humana, pois é um local que permite o acúmulo de água e promove a geração dos vetores de doenças como Dengue, Zika e Chikungunya (GEMELLI *et al.*, 2019).

A primeira iniciativa para reduzir os impactos ambientais gerados pelos pneus abandonados, queimados ou descartados inadequadamente foi feita pela resolução Conselho Nacional do Meio Ambiente – Conama nº 258/99, a qual obrigava os produtores e importadores a fazerem a coleta e destinação dos pneus inservíveis. Com isso, a representante dos fabricantes de pneus novos, a Associação da Indústria de Pneus Pneumáticos (ANIP), iniciou um programa de coleta e disposição desses pneus, em que não obteve sucesso pelos municípios por não atender às metas propostas pela Resolução, por falta de cooperação da população.

Em 2009, o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA revogou a resolução nº 258/99 por meio da resolução nº 416, de 30 de setembro de 2009, estabeleceu que para cada pneu novo comercializado, as empresas fabricantes ou importadoras deverão coletar e destinar adequadamente a um pneu inservível (relação 1:1). Além disso, para os municípios com mais de cem mil habitantes, passou a ser necessário adicionar pontos de coleta desse resíduo pela cidade.

Devido a crescente geração de resíduos foi sancionada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) Lei nº 12.305/10. Essa lei aborda sobre a gestão integrada desses resíduos, também a responsabilidade compartilhada de fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, além de uma logística reversa de produtos como a lâmpada fluorescentes, pilhas e baterias, óleos lubrificantes e suas embalagem e também os pneus inservíveis.

Após aprovação desta lei, A ANIP e os importadores de pneus foram responsáveis pela criação do plano Reciclanip, para gerenciamento de coleta, armazenamento e o ciclo final dos pneus inservíveis, com o objetivo de trabalhar as exigências legais e questões ambientais (SANTOS; BOTINHA; LEAL, 2015).

O gerenciamento desse resíduo começa pela logística de transporte, a partir do recolhimento dos pneus inservíveis deixados nos pontos de coleta. Os municípios são encarregados por destinar esses locais. O material coletado é direcionado para empresas de trituração, quando necessário, e encaminhado para empresas habilitadas e devidamente licenciadas a destinarem adequadamente os pneus (POURRE, 2016).

Em 2017, foram cadastrados no Brasil 1.718 pontos de coleta, sendo 925 localizados em municípios com população residente acima de 100 mil habitantes, restando 12 municípios com esta característica sem nenhum ponto de coleta declarado. Vale ressaltar, que em Sergipe há 3 pontos de coletas, um no Santa Maria com suporte de 2300 unidades, no bairro Cirurgia com 50 unidades e na Palestina com 2300 unidades, totalizando a capacidade do estado em 4650 unidades de pneus (IBAMA, 2018).

Motivados pelos aspectos apresentados, neste trabalho, objetivou-se analisar o comportamento das características geotécnicas, bem como, seu comportamento mecânico de um solo adicionado com resíduos de borracha de pneu triturado após sua vida útil. Avaliar, além do solo puro, mistura solo-borracha com porcentagens de 5, 10 e 15% de borracha, para uma análise mais apurada a fim de verificar os possíveis usos do solo para alguma finalidade geotécnica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa vigente foi fundamentada em ensaios laboratoriais realizados no Centro Tecnológico de Engenharia e Arquitetura (CTEA), localizado na Universidade Tiradentes campus Aracaju, como análise granulométrica, limites de Atterberg, compactação, índice de suporte califórnia e compressão axial não confinada e confinada realizadas na mistura de solo com o resíduo da borracha visando analisar sua viabilidade em obras da construção civil.

2.1 MATERIAIS

2.1.1 Solo

A coleta do solo foi realizada de acordo com a NBR 9604 (ABNT, 1986) objetivando a inspeção do solo com retirada de amostras deformadas por meio da abertura de poços e trincheiras de uma jazida no município de Itaporanga D' Ajuda/SE.

2.1.2 Resíduo de Borracha de Pneu

Nesse estudo, a borracha de pneu foi proveniente da trituração de pneus de caminhão realizada pela empresa fornecedora. Os resíduos de borracha foram fornecidos pela empresa Renovadora de Pneus Canarinho, localizada na Avenida Maranhão, nº 2240, Aracaju/SE. Essa borracha em raspa de pneu foi obtida por meio de moedoras mecânicas, passando pelo processo de seleção e classificação. Com a intenção de padronizar o tamanho das partículas de resíduo utilizadas neste trabalho, o material foi peneirado numa malha de abertura de 2,0 mm, descartando-se o material retido. Vale ressaltar que foram coletados 20 Kg desse material para a realização dos ensaios necessários.

2.1.3 Misturas de Solo com Resíduo de Borracha

Os ensaios para este estudo foram realizados com quatro amostras de diferentes teores do resíduo de borracha para cada ensaio, conforme apresentados na Tabela 1. Vale ressaltar, que foi realizada uma regra de três simples com massa do solo e a porcentagem da borracha, para a determinação da quantidade de massa a ser misturada com o solo puro, como ilustra na Figura 1.

Tabela 1 - Símbolos utilizados para as misturas

Amostra/ Símbolo	Solo (%)	Borracha (%)
A100	100	0
A95	95	5

Amostra/ Símbolo	Solo (%)	Borracha (%)
A90	90	10
A85	85	15

Fonte: Autores.

Figura 1 – Solo e borracha.



Fonte: Autores.

2.2 METODOLOGIA

2.2.1 Análise Granulométrica

O ensaio de caracterização do solo puro foi determinado utilizando a NBR 7181 (ABNT, 2016), visando o estabelecimento da análise granulométrica do solo realizada por peneiramento.

Para o reconhecimento do tamanho das partículas do resíduo foi realizado um controle na granulometria, em que o material utilizado nas misturas foi proveniente da amostra passante na peneira de número 10. Foi realizada também a classificação granulométrica do resíduo de pneu de acordo com a técnica de processamento, consequentemente dos tamanhos e formas do resíduo: pedaços de pneus, variam de 2 a 12 polegadas; chips, variam 0,05 a 2 polegadas; granular com tamanho da partícula inferior a 0,06 mm e por fim, a combinação de pedaços e chips, definidos pela norma American Society for Testing and Materials (ASTM) D 6270 (ASTM, 2020).

2.2.2 Limites de Consistência

Os Limites de Consistência abrangem o Limite de Liquidez e o Limite de Plasticidade. O Limite de Liquidez foi obtido conforme a NBR 6459 (ABNT, 2016), em que determina o teor de umidade no qual o solo passa do estado sólido para o estado líquido. Este teor de umidade é determinado pelo aparelho Casa Grande, em que consta o comportamento das amostras à 25 golpes.

O Limite de Plasticidade foi determinado utilizando-se da NBR 7180 (ABNT, 2016). Este limite determina o teor de umidade da passagem do estado plástico para o semi-sólido do solo.

2.2.3 Ensaio de Compactação

No ensaio de compactação determinou-se a umidade ótima e a massa específica seca, consoante a NBR 7182 (ABNT, 2016). Adotou-se a energia de compactação Proctor Normal com golpes de soquete normalizado, que consiste na divisão da amostra em três camadas com 26 golpes cada. A umidade ótima foi obtida com base na curva de compactação, proveniente do peso específico aparente seco versus a umidade da amostra compactada.

2.2.4 Índice de Suporte de Califórnia

Este ensaio foi realizado em concordância com a NBR 9895 (ABNT, 2017), o qual avalia a resistência de expansão e a resistência do solo à penetração de um cilindro padronizado com relação a penetração em uma brita padrão. Os corpos de provas foram moldados, utilizando-se da umidade ótima determinada por meio do ensaio de compactação.

2.2.5 Compressão Axial não Confinada

O ensaio de compressão simples determina a resistência à compressão não confinada mediante uma carga axial com controle de deformação, conforme a NBR 12770 (ABNT, 1992). A amostra utilizada nesse ensaio foi obtida pelo método de amostra deformada e foi compactada com a sua umidade ótima. Ao aplicar a tensão axial com a prensa, acontece a deformação da amostra, registrando a sua tensão e, especificamente, o momento da ruptura da mesma.

O cálculo da deformação axial específica (ε) para uma determinada carga é calculada conforme a Equação 1.

$$\varepsilon = \left(\frac{\Delta H}{H} \right) * 100 \quad (1)$$

Onde:

ε = deformação axial específica, em %;

ΔH = Variação da altura do corpo de prova, obtida pelo indicador de deslocamento, em mm;

H = Altura inicial do corpo de prova, em mm.

Para calcular a área da seção transversal do corpo de prova, se utiliza a Equação 2:

$$A = \frac{100A_0}{100-\varepsilon} \quad (2)$$

Onde

A_0 = área inicial do corpo de prova

Para calcular a tensão de compressão (q) para uma determinada carga aplicada, se faz uso da Equação 3:

$$q = \frac{P}{A} \quad (3)$$

Onde:

P= Carga aplicada em kN.

2.2.6 Compressão Confinada Simples

A resistência do solo à compressão é realizada conforme a norma americana ASTM D 3080 (ASTM, 2004), mediante a aplicação de carga axial. Nesse ensaio, foram preparados dois corpos de provas para cada mistura solo-borracha e solo puro, cada um suportando tensões de 50kg (0,19 MPa) e 60 kg (0,23 MPa).

Neste ensaio, a partir de uma amostra compactada em relação a sua umidade ótima, os corpos de prova foram talhados. A amostra deste ensaio, foi obtida por meio de um vazador e em seguida levada a célula bipartida.

Ao final do procedimento da célula, a amostra foi inserida no equipamento, para o ensaio de confinamento. Para a compressibilidade do solo, foi utilizado 5 kg durante 5 minutos, logo após o relógio foi ajustado e a tensão do ensaio inserida.

Para obtenção dos resultados, foi calculado o índice de vazios inicial de acordo com a Equação (4), em seguida, calculado a altura dos sólidos pela Equação (5). Para a realização do cálculo de índices de vazios finais foi utilizada a Equação (6). E posteriormente, determinou o valor da variação de altura mediante as tensões aplicadas pelo modelo descrito na Equação (7), com o objetivo de obter a compressibilidade das amostras.

$$e_0 = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 \quad (4)$$

Onde:

e_0 : índice de vazios inicial;

γ_s : peso específico natural do solo, adotou-se 27 kN/m³;

γ_d : peso específico aparente máximo.

$$h_s = \frac{h_0}{1 + e_0} \quad (5)$$

Onde:

h_s : altura do sólido;

h_0 : altura inicial do corpo de prova.

$$e_f = \frac{h_f - h_s}{h_s} \quad (6)$$

Onde:

e_f : índice de vazios final;

h_s : altura do sólido;

h_f : altura final observado no corpo de prova.

$$\Delta_h = \frac{\Delta_e}{1 + e_f} \quad (7)$$

Onde:

Δ_e : variação dos índices de vazios;

Δ_h : compressibilidade.

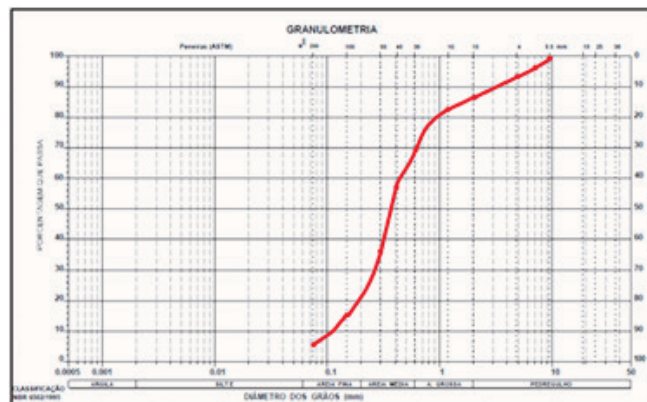
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 GRANULOMETRIA

A distribuição granulométrica do solo em estudo mostrada na Figura 2. O eixo das abcissas representa os diâmetros das partículas em milímetros e o eixo das ordenadas, a porcentagem que passa na peneira. Logo, foi possível observar que o solo é constituído por 12,43% de pedregulho, 16,70% de areia grossa, 50,79% de areia média e 13,09% de areia fina. Com esses resultados, pôde-se verificar que ficaram retidos 93,1% de solo nas peneiras e 6,90% passaram pela peneira de número de 200, classificando-o como solo arenoso.

Segundo Santos (2014), os solos arenosos são caracterizados como ásperos ao tato e, estando isentos de solos finos, não se contraem ao secar, não apresentam plasticidade e compreendem-se, quase instantaneamente, ao serem carregados. Também, é definido como um solo não coesivo, por soltar-se facilmente ao ser cortado ou escavado. Portanto, ao ser bem graduado, apresentam uma baixa compressibilidade e maior resistência.

Figura 2 – Granulometria do solo



Fonte: Autores.

Nos ensaios de limites de consistência, foi classificado o solo em estudo, como material não plástico (NP). De acordo com Gomes *et al* (2018), o material arenoso possui pouca atividade com a água, devido a pequena presença de finos em sua estrutura, o que dificulta sua moldagem, sendo enquadrado como excelente material para con-

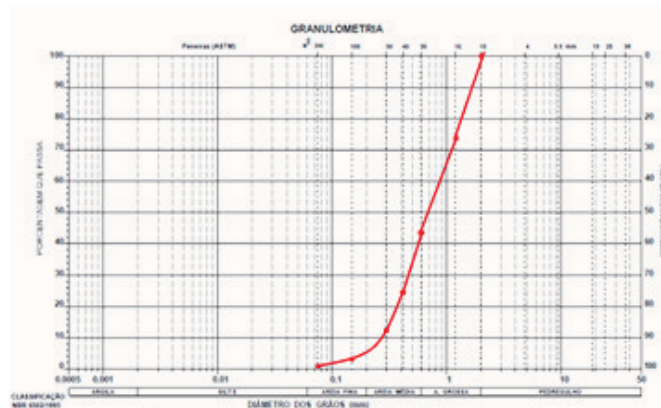
strução de estradas. Logo, conforme Caputo (1998) quanto menor for a plasticidade de um solo arenoso, mais rápido atingirá o seu estado líquido, tornando-o mais permeável.

A partir da curva granulométrica da Figura 2, foram calculados os valores de coeficiente de uniformidade (Cnu) e coeficiente de curvatura (Cc) de 3,75 e 1,16, respectivamente. Logo, com esses dados e o Sistema de Classificação dos Solos (SUCS), o solo em questão é caracterizado como SW, areia bem graduada. Seu grau de uniformidade, resultou em um material muito uniforme, pelo parâmetro de que um solo é considerado muito uniforme, quando seu $Cnu < 5$, de uniformidade média se $5 < Cnu < 15$ e desuniforme, quando $Cnu > 15$. Segundo Rodrigues (2018), quanto menor o coeficiente de não conformidade (Cnu), menor é a amplitude dos grãos, com isso há uma alta declividade na curva granulométrica do solo.

Conforme o Sistema Rodoviário de Classificação (HRB – Highway Research Board), caracterizou-se o solo pertencente ao grupo A-3, como sendo areia fina, não plástico, em que seu IG resultou em zero, obtendo assim, ótima capacidade de suporte para o terreno de fundação de um pavimento, como a camada de subleito. De acordo com Santana e Silveira (2014), quanto menor o IG de um solo, menor será seu índice de compressibilidade e conseqüentemente mais adequados às obras geotécnicas.

Na Figura 3, a curva granulométrica apresenta a distribuição das partículas do resíduo de borracha. O resíduo obteve a seguinte graduação: 56,37% de areia grossa; 38,63% de areia média e 4,66% de areia fina. Dessa forma, o resíduo apresentou uma granulometria bem graduada. Além disso, classifica-se como chips por se encontrar com diâmetro entre 0,05 e 2 polegadas.

Figura 3 – Granulometria da borracha



Fonte: Autores.

3.2 COMPACTAÇÃO

Os resultados dos valores de umidade ótima (%) e peso específico aparente seco máximo (kN/m^3) estão apresentados na Tabela 2, obtidos no ensaio de compactação com energia Proctor Normal.

Tabela 2 – Resultados do ensaio de compactação: Peso específico e umidade ótima

Amostra	Umidade ótima (%)	Peso específico (kN/m ³)
A100	10	19,7
A95	10,72	18,3
A90	13,2	17
A85	14,67	15,8

Fonte: Autoria Própria

Ao analisar a Tabela 2, observou-se que o resíduo borracha exerce influência sobre o solo natural, no peso específico aparente seco máximo e na umidade ótima. Segundo Murrieta (2018), para materiais arenosos com pouca argila apresentam pesos específicos máximos da ordem de 20 a 22 kN/m³, enquanto a umidade ótima na faixa de 8 a 10%.

O peso específico diminuiu com o acréscimo do teor do resíduo, principalmente pelo fato da borracha ter um peso específico menor que o solo natural, consequentemente, sendo mais leve que o solo. Esse resultado também foi encontrado por Chrusciak (2013) e Cavalcante (2018) que também analisaram o comportamento do solo ao variar o resíduo de borracha.

No aspecto da umidade ótima, pode-se observar que esta aumenta quando o teor do resíduo é acrescentado, ou seja, as misturas apresentam umidades ótimas maiores que a do solo natural. Isso mostra que há mais necessidade de água para obter uma boa compactação do solo. Tal resultado difere do que foi encontrado por Ramirez (2012) e Morais (2016) que analisaram a mistura (solo + borracha) para as mesmas porcentagens e tamanho das partículas do resíduo, porém com solo argiloso. O resultado obtido foi o decréscimo da umidade ótima. Dessa forma, a natureza do solo mostra ser um fator importante para análise.

Outro fator observado foi o tamanho das partículas do resíduo de borracha. Cavalcante (2018) estudou o comportamento da mistura de um solo arenoso com o resíduo de borracha e no resultado, o peso específico e a umidade ótima diminuíram. Isso ocorreu devido ao tamanho das partículas, pois o autor utilizou um intervalo entre 19,5 e 50 mm para o resíduo. Dessa forma, concluiu-se que ter esse controle do resíduo influencia no resultado final.

3.3 ÍNDICE DE SUPORTE DE CALIFÓRNIA

Os resultados de expansão e ISC para cada amostra estudada são apresentados na Tabela 3. Na expansão, observou-se que o teor de borracha exerceu influência no resultado de forma crescente, ou seja, ao passo que aumentou o resíduo, a expansão também aumentou, principalmente em comparação com o solo natural, nas amostras A90 e A85, exceto A95. Esse resultado também foi encontrado por Bertella (2019), que analisou amostras com 5, 15 e 20% do resíduo de borracha em relação com o solo puro.

Tabela 3 – Expansão do solo

Amostras	Expansão	ISC (%)
A100	0,075	1,53
A95	0,399	1,57
A90	0,089	2,21
A85	0,220	2,5

Fonte: Autoria própria.

Na amostra S95, composta pela adição de 5% de borracha, percebeu-se que a expansão aumentou consideravelmente enquanto as amostras A90 e A85, respectivamente, resultaram numa expansão crescente. Isso ocorre devido à propriedade da borracha que por ter menor densidade, é necessário maior volume para obter a massa desejada. E, por ser a menor porcentagem, a amostra de 5% não foi suficiente para preencher os vazios, diferente das outras duas amostras.

Apesar dessa dispersão, concluiu-se que o resultado obtido não comprometeu a utilização das amostras em obras de pavimentação. Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006), o subleito, que é fundação do pavimento, deve ter expansão máxima de 2% e todas as amostras ficaram dentro do limite permitido.

Na terceira coluna da Tabela 3 são apresentados os resultados do ISC, que avaliou a resistência à penetração das amostras em relação a uma resistência padrão. Foi observado que no valor de cada amostra para o ISC, a mistura solo + borracha (no solo arenoso) promoveu o aumento do ISC. A A85 obteve o maior índice 2,5%, uma diferença de 0,97% em relação ao A100; seguido da mistura A90 com a diferença de 0,68% e A95 com uma diferença de 0,04%, dessa forma possibilitou o reaproveitamento da borracha para o uso geotécnico em A90 e A95, uma vez que, nestas misturas o material permaneceu no limite mínimo necessário para a camada de subleito. Segundo o DNIT (2006), essa camada exige que o valor do ISC seja maior que 2% de resistência à penetração.

3.4 COMPRESSÃO AXIAL NÃO CONFINADA

O ensaio de compressão foi realizado a partir de uma aplicação de carga em apenas um eixo do corpo de prova. Com isso, foi possível observar que as amostras sofreram um fenômeno chamado embarrilhamento, ou seja, formato barril nos corpos de prova, antes da sua ruptura. Isso ocorre devido as suas faces estarem em contato direto com as placas que ocasionam uma resistência que se confronta ao escoamento do material devido às forças de atrito.

O resultado da resistência à compressão simples das amostras está presente no Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados do ensaio de compressão não confinada

Amostra	Tensão de Compressão (Kn/m ²)	Deformação Axial Específica longitudinal (%)
A100	2,93	4,57
A95	3,08	5,91
A90	3,39	6,22
A85	3,72	3,71

Fonte: Autoria própria.

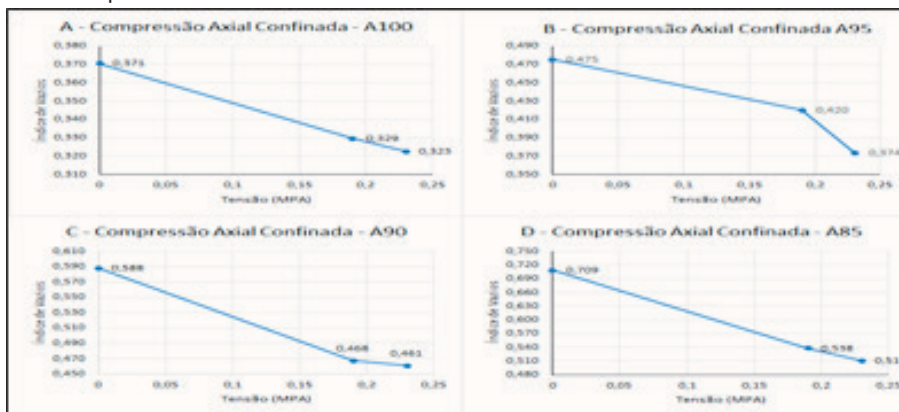
Ao analisar a Tabela 4, foi verificado que a tensão de compressão axial dos corpos de prova, cresce gradativamente à medida que aumenta a dosagem do resíduo de borracha nas amostras. Essa tensão nas amostras A85 variou em relação ao solo natural, 26,93 %, A90 15,69 % e A95 5,11%; quanto à deformação axial específica A85 variou em relação ao solo natural, 18,59 %, A90 36,10% e A95 29,32%.

Com isso foi possível verificar que a quantidade de teor de borracha influenciou na resistência do solo, a amostra A85, com teor de 15% de borracha, em que obteve maior resistência comparada às demais. Também é possível observar, que a amostra A85 apresentou uma menor deformação axial longitudinal. Tal resultado, significa que no ensaio de compressão, o corpo de prova suportou mais tensão, apresentando um maior embarilhamento, o que ocasionou um aumento no diâmetro da amostra final.

3.5 COMPRESSÃO CONFINADA SIMPLES

Os resultados obtidos após o ensaio de compressão confinada simples, são apresentados nas Figuras 4A, 4B, 4C e 4D para as amostras A100, A95, A90 e A85, respectivamente. Cada gráfico aborda o comportamento das misturas ao sofrerem diferentes tensões, relacionando-as com o seu índice de vazios, gerando uma reta virgem.

O índice de vazios é uma das propriedades mais importantes do solo, pois a sua análise permite obter parâmetros utilizados para verificar o desempenho das misturas como a compressibilidade, colapsibilidade e suporte ao aplicar uma tensão, conforme Zorzán (2019). Dessa forma, o ensaio foi realizado com o objetivo de analisar a influência que o teor do resíduo de borracha exerce sobre a compressibilidade do solo puro.

Figura 4 – Compressibilidade das amostras

Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Figura 4, no ponto inicial da reta de todas as amostras, em que o solo não tem nenhuma carga aplicada, percebeu-se uma variação do índice de vazios inicial de forma crescente. Isso ocorreu devido à incorporação do teor de borracha, ou seja, quanto maior esse teor maior será o índice de vazios.

Pode-se observar que o índice inicial aumentou em 28%, 58% e 91% para as amostras A95, A90 e A85, respectivamente, em relação ao solo de referência. Com isso, houve uma variação do índice de vazios inicial entre 30 a 33% com o acréscimo do resíduo.

Em seguida, verificou-se que todas as retas mostraram um comportamento semelhante, ou seja, o aumento da carga (0 a 0,23 MPa) ocasionou a redução do índice de vazios. O primeiro trecho da reta corresponde à aplicação da primeira carga de 0,19 MPa, entre os dois primeiros pontos. Comparado com o segundo trecho, o primeiro apresentou uma variação maior do índice.

Segundo Castro (2016), isso ocorreu devido à variação de volume que ocorre inicialmente ao aplicar uma carga em um solo, provocando o recalque imediato. Foi possível observar também que o acréscimo do resíduo de borracha aumentou também a variação de volume, conforme ilustra a Figura 3. Com os resultados apresentados, para o solo natural, amostra A100, a variação de volume foi de 11,32%. Para as misturas, a variação de volume teve um aumento de 11,57%, 20,41% e 24,12% em relação ao seu volume inicial, respectivamente para A95, A90 e A85.

No segundo trecho, que corresponde à aplicação da segunda carga de 0,23 MPa, a variação de volume também diminuiu, porém em menor escala. Foi analisado que a amostra A95 apresentou uma maior variação, com 10% em relação ao volume inicial desse trecho. E as amostras A90 e A85, apresentaram uma variação de 1,49 e 5,76%. Assim, no fim do período de avaliação das amostras, a variação do volume foi menor do que inicialmente.

O teor de borracha exerce influência na compressibilidade do solo. Marcos (2016), estudou o comportamento do solo ao aplicar resíduos de borracha no mesmo, observou que a compressibilidade das misturas se dá pelo arranjo das partículas e não pela compressibilidade individual de cada uma, em cargas até 700 KPa. Foi observado

também pelo autor, que ao aumentar a carga, a tensão de contato entre as partículas é muito alta e isso aumenta sua compressibilidade. Dessa forma, o aumento da porcentagem de borracha em areias torna a compressibilidade das misturas extremamente alta. Isso está de acordo com os resultados obtidos na Tabela 5.

Tabela 5 – Recalque das misturas

Amostra	Recalque (Δh)	
	50 kg (0,19 MPa)	60 kg (0,23 MPa)
A100	0,125	0,149
A95	0,132	0,272
A90	0,258	0,276
A85	0,318	0,388

Fonte: Autoria própria.

Observa-se na Tabela 5, que teor de borracha exerce influência na variação de altura (Δh). Assim, para uma pressão de 0,19 Mpa, o valor de recalque variou para a amostra A95, 5,6%; para amostra A90 a variação foi de 106,4% e para a amostra A85 se obteve uma variação de 154,4%. Para pressão de 0,23 MPa: A95 variou 82,5%, A90 85,33% e A85 160%. Ao analisar as duas colunas das tensões, observou que ao aumentar a tensão, aumentou também o Δh .

Essa variação também ocorre devido a propriedade da borracha em ser viscoelástica, ou seja, as suas partículas compressíveis volumetricamente. A borracha apresenta um módulo de deformabilidade mais elevado que o solo, por isso, absorve certa energia na deformação devido à sua fricção interparticular, explica Marcos (2016). Então, ao passo que foi acrescido o teor de borracha, maior capacidade de deformação e isso resultou numa maior variação da altura.

O Quadro 1 apresenta as diferenças de cada amostra obtida em relação ao solo de referência, sendo classificada em menor, mediana e maior diferença. Os sinais representam se o teor de borracha aumentou (+) ou diminuiu (-) a propriedade, estudava em cada ensaio, em relação ao solo estudado.

Quadro 1 – Diferenças entre cada amostra em relação ao solo natural

Amostra	W_{ot}	$Y_{d_{m\acute{a}x}}(-)$	Expansão (+)	ISC (+)	Resistência (+)	Compressibilidade (+)
S95	Menor	Menor	Maior	Menor	Menor	Menor
S90	Mediana	Mediana	Menor	Mediana	Mediana	Mediana
S85	Maior	Maior	Mediana	Maior	Maior	Maior

Fonte: Autoria própria.

A mistura que apresentou harmonia nos resultados foi A90, com porcentagem de 10% do resíduo de borracha, devido a sua melhor influência em todas as propriedades comparada com as demais. Em suma, todos os dados observados ocorreram

devido à união das propriedades do solo arenoso com as propriedades da borracha, o que formou um novo composto.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou os resultados de ensaios geotécnicos com o intuito de verificar a viabilidade do resíduo de borracha como reforço do solo. Desta forma, podemos concluir que:

- O solo em estudo é classificado como um solo arenoso. De acordo, com o sistema rodoviário de classificação, é caracterizado como grupo A-3, areia fina. Já, conforme o sistema de classificação dos solos, é identificado como SW, uma areia bem graduada. Possui índice de plasticidade nulo, ou seja, material não plástico;
- O resíduo de borracha é classificado como chips (0,05 a 2 pol.);
- De acordo com os resultados obtidos pela compactação com Energia Proctor Normal, o peso específico do solo natural diminuiu com a adição do resíduo. Quanto a umidade, a adição da borracha gerou uma maior necessidade de água para obter uma melhor compactação. Concluiu-se, também, que o tamanho das partículas da borracha e o tipo de solo fazem influência na compactação;
- A expansão aumentou com a adição do resíduo de borracha. Segundo o DNIT, todas as amostras podem ser utilizadas como subleito;
- Na resistência à penetração, o teor de borracha promoveu o aumento do ISC. Segundo o DNIT, as amostras A90 e A85 podem ser utilizadas como subleito;
- Conforme os ensaios obtidos da compressão não confinada, foi possível concluir que houve um aumento da resistência com o acréscimo do resíduo;
- Quanto à compressibilidade do solo, o acréscimo do resíduo de borracha gerou um aumento do índice de vazios devido ao arranjo das partículas na mistura. Assim, com a aplicação das cargas, houve maior recalque imediato do solo;
- Concluiu-se que a melhor amostra com adição de resíduo, foi a A90, com porcentagem de 10% de borracha, por apresentar uma melhor harmonia nos resultados.

REFERÊNCIAS

ALVEZ, C. R. R; GÓNGORRA, I. A. G. **Aproveitamento de pneus na elaboração da camada de base de pavimentos asfáltico**. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia ASTM Geotécnica, 2016, Minas Gerais.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016. 5 Versão corrigida 2:2017.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 7, 2016.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7181**: Solo – Análise 3 Granulométrica. Rio de Janeiro, 2016 Versão corrigida 2:2018.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9604**: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas. Rio de Janeiro, 1986.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9895**: Solo – Índice de suporte Califórnia (ISC) – Método de ensaio. Rio 10 de Janeiro, 2016 Versão corrigida: 2017.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004**: Resíduo Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12770**: Solo Coesivo – Determinação à compressão não confinada. Rio de Janeiro, 1992.

ANIP – Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos. Disponível em: <https://www.anip.com.br/>. Acesso em: 10 nov. 2020.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **D 3080-04**: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM D 6270**: Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications. Philadelphia, 2020.

BANDEIRA, Felipe Ogliari; DE MORAIS; Manuella; MENEGOTTO, Mauro Leandro. **Propriedades geotécnicas de misturas de solo residual de basalto com resíduos de borracha de pneus**. 0379-9522 – Geotecnia n^o 144 – nov. 2018. p. 35-50.

BERTELLA, Jaqueline Andressa; GEMELLI, Eliane Fátima de Bastiani; KRONBAUER, Bárbara Karina; LOPES, Marieli Biondo. **Utilização de rejeito de pneu de borracha em reforço de solos para aterros rodoviários no município de Chapecó/SC**. Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul Geors, 10, 2019.

BRASIL. Lei n. 12.305 de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF.

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Vol. 1. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988. 244 p.

CASAGRANDE, Michéle D. T.; JARAMILLO, Natalia Andrea Durán. Influência da inserção de fibras de borracha de pneu no comportamento mecânico de um solo arenoso. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, O Futuro Sustentável do Brasil passa por Minas COBRAMSEG, 18, 2016, 19-22 outubro. **Anais [...]**, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 2016.

CASTRO, Ana Patrícia Aranha. **Influência da compactação no colapso de um solo arenoso**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2016.

CAVALCANTE, Paulo Henrique Fernandes. **Análise da resistência das misturas de areia com pedaços de borracha**. 2018. Dissertação (Mestrado de geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

CHRUSCIAK, M. R. **Análise da melhoria de solos utilizando fragmentos de borracha**. 2013. 91 f. Dissertação (Mestrado) – Publicação G.DM-221/13, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2013.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 416, de 30 de setembro de 2009. **DOU** nº 188, em 01/10/2009. Brasília, 2009. p. 64-65.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **IPR 719**. Manual de Pavimentação. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006.

FEUERHAMEL, M. R.. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno**. 2000, 152 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2001.

FONINI, Anderson. **Uso da Técnica de Eletrocínética para estabilização de um solo aeroso**. 2008.127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2008.

GEMELLI, Eliane Fátima de Bastian *et al.* **Utilização de rejeito de pneu de borracha em reforço de solos para aterros rodoviários no município de Chapecó/SC**. Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul – GEORS, 10, 2019.

GOMES, Alessandra dos Santos; SOARES, Erick Rógenes Simão; CARVALHO, Taíse Monique de Oliveira; TENÓRIO, Májores de Omena. **Caracterização do solo aplicado em um aterro da Br-316**. 2018. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2018.

IBAMA – Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Relatório de Pneumáticos. Dados apresentados no Relatório de Pneumáticos – **Resolução CONAMA nº 416/09** do Cadastro Técnico Federal, Brasília, 2018.

MARCOS, Filipe Afonso Barbosa. **Estudo do comportamento dinâmico de misturas de solos com resíduos de borracha**. 2016, 191 f. Dissertação (Mestrado Integrado em engenharia Civil) – Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016.

MORAIS, Manuella de; MANEGOTTO, Mauro Leandro. **Avaliação dos parâmetros de compactação e de permeabilidade de 2 misturas de solo argiloso com resíduos de borracha de pneus**. Chapecó, SC: Universidade Federal da Fronteira Sul, 2016.

MURRIETA, Pedro. **Mecânica dos solos**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda., 2018.

PEREIRA, Cláudio; FERREIRA, Cristiana; CARVALHO, Raquel; GOMES CORREIA, António. **Avaliação do comportamento mecânico de um solo reforçado com fibras em carregamento estático e cíclico, de muito pequenas a grandes deformações**. 2016.

POURRE, Ohana Vitor. **O destino dos pneus descartados: leis vigentes e tecnologias utilizadas no Brasil**. 2016. Monografia (Bacharelado) – Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

RAMÍREZ, G. G. D. **Estudo experimental de solos reforçados com borracha moída 18 de pneus inservíveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2012.

RODRIGUES, Klaus Henrique de Paula. **Estudo de estabilização granulométrica de solos utilizando rejeito de mineração**. 2018. 108 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

SANTOS, Luciana de Almeida Araújo; BOTINHA, Reiner Alves; LEAL, Edvalda Araújo. **A contribuição da logística reversa de pneumáticos para a sustentabilidade ambiental**. Disponível em: <https://portalperiodicos.unoesc.edu.br/race/article/view/1709>. Acesso em: 15 jan. 2015.

SANTOS, Palloma Ribeiro Cuba dos. **Análise dos solos**. São Paulo: Érica, 2014.

SANTOS, Wenderson Gomes; JUNIOR, Sergio Duvoisin; MACHADO, Nélio Teixeira. A reciclagem dos pneus inservíveis no Brasil nos anos de 2009 a 2017. **Revista EDUCamazônia** - Educação Sociedade e Meio Ambiente, Humaitá, v. XXV, n. 2, p. 572-584, jul./dez. 2020.

ZORZAN, Lucas Gihion; STRESSER, Cleyton; DIAS, Luana; BOSZCZOWSKI, Roberta Bomfim; PASSINI, Larissa de Brum. **Propriedade e índices físicos de solos.** GEGEO, UFPR, 2019.

Data do recebimento: 21 de maio de 2021

Data da avaliação: 9 de julho de 2021

Data de aceite: 9 de julho de 2021

1 Acadêmica do curso de Engenharia Civil, Universidade Tiradentes – UNIT.

E-mail: larissa_snts1008@hotmail.com

2 Acadêmica do curso de Engenharia Civil, Universidade Tiradentes – UNIT.

E-mail: rafaellanjos25@gmail.com

3 Doutor; Professor, Universidade Tiradentes – UNIT. Email: sobral.acs@hotmail.com