

Avaliação do Comportamento Mecânico do Solo Laterítico de Brasília Misturado com a Fração Fina de Pneu de Borracha Reciclada

Sonny Albert Amorim da Silva

Centro Universitário de Brasília, Brasília, Brasil, sonnyalbertamorim@gmail.com

Carlos Eduardo Diniz Vilanova

Centro Universitário de Brasília, Brasília, Brasil, someluz.edu@gmail.com

Jaime Rafael Obando Ante

Centro Universitário de Brasília, Brasília, Brasil, jaime_obando87@hotmail.com

RESUMO: No ponto de vista geotécnico, o melhoramento de solo com pneu de borracha diminui significativamente o peso específico seco e aumenta a resistência ao cisalhamento, proporcionando maior durabilidade as obras geotécnicas. Na presente pesquisa, são apresentados os resultados da avaliação do solo laterítico de Brasília, com e sem a adição de uma fração fina de borracha reciclada de pneus inservíveis. A metodologia da pesquisa foi dividida em seis etapas principais: caracterização dos materiais, determinação do teor ótimo de borracha, ensaios de compactação, ensaios de resistência ao cisalhamento, ensaios de adensamento unidimensional e Índice de Suporte Califórnia (ISC). Os ensaios que avaliaram as mudanças das propriedades mecânicas, foram realizados sob corpos de prova compactados no peso específico máximo seco e umidade ótima, utilizando a energia de compactação Proctor modificada. Os ensaios foram realizados para o solo no estado natural e com adição de 3% (em relação à massa do solo seco) de pneu granular reciclado. Para os níveis de tensões utilizados nos ensaios, o solo-borracha apresentou um melhoramento significativo na resistência ao cisalhamento, aumentando o ângulo de atrito interno das partículas em 10% e reduziu a coesão em 48%. No ensaio de adensamento unidimensional o solo-borracha apresentou um índice de vazios maior que o solo puro, e no ensaio de Índice de Suporte Califórnia o solo-borracha apresentou uma redução de 80% na resistência a compressão. Em função dos resultados obtidos, é possível concluir, que a utilização de pneu de borracha no melhoramento das propriedades mecânicas de solos laterítico, é uma alternativa viável para a reciclagem e reaproveitamento de pneus inservíveis em aterros.

PALAVRAS-CHAVE: Mistura solo-borracha, melhoramento de solo, pneu inservível, sustentabilidade, rodovias ecológicas, reutilização.

1 - INTRODUÇÃO

Em 2014, o Brasil produziu aproximadamente 68 milhões de pneus novos e a Reciclanip (entidade fundada pelas empresas fabricantes de pneus), coletou e destinou corretamente 445 mil toneladas de pneus inservíveis, segundo ANIP, 2015 (Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos). A resolução N° 416, de 30 de

setembro de 2009 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), determina os procedimentos que os fabricantes e importadores de pneus, devem adotar para efetuar a coleta e destinação apropriada de pneus inservíveis, existentes em todo território brasileiro. O processo de reciclagem de pneus atravessa diversas etapas até que o material possa ser reaproveitado. Atualmente, a

destinação mais usual dos pneus reciclados, é para os fornos em cimenteiras, devido ao seu alto poder calorífico. Em segundo lugar está o emprego destes, em artefatos de borracha ou asfalto de resíduos (ANIP, 2015).

Com o intuito de criar novas alternativas para a destinação deste tipo de resíduos, foi estabelecida uma metodologia laboratorial de reaproveitamento, para que o composto (solo-borracha) possa ser utilizado como material de preenchimento em estruturas de arrimo rodoviárias.

2 - MATERIAIS

2.1 Solos laterítico de Brasília

O solo laterítico de Brasília (Figura 1) apresenta uma cor característica vermelha, amarela, marrom ou laranja dependendo do seu processo de formação e grau de intemperização.

Segundo Schellmann (1981), laterita é definida como sendo acumulações superficiais ou subsuperficiais de produtos provenientes do intenso intemperismo de rochas. Estas são desenvolvidas sob condições favoráveis a uma maior mobilidade dos elementos alcalinos, alcalino-terrosos e sílica e imobilização de ferro e alumínio.

Solos diferentes com propriedades similares podem ser classificados em grupos e subgrupos conforme o seu ponto de vista na engenharia. Os sistemas de classificação exprime a linguagem comum para se expressar sucintamente, sem descrições detalhadas. Foi utilizado o sistema de classificação SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos), para classificar o solo tropical de Brasília como ML (silte argilo-arenoso de baixa compressibilidade).



Figura 1. Amostra solo laterítico de Brasília.

2.2 Borracha granular reciclada de Pneus

A borracha granular de pneu reciclada (Figura 2), provém de um processo de reciclagem, que previamente passa através de um processo de separação e trituração, dos diversos componentes que compõem o conjunto pneumático. De maneira geral, a borracha reciclada apresenta uma granulometria de um material mal graduado, de diâmetro de partículas compreendido entre: 1 mm e 1,9 mm.



Figura 2. Borracha granular de pneus reciclada.

3 - METODOLOGIA

3.1 Caracterizações Física

Para determinar as características físicas do solo, foram realizados os ensaios de granulometria, massa específica, limites de liquidez e plasticidade e de compactação de acordo com as normas ABNT.

3.2 Ensaios de compactação

Para determinar as condições de compactação dos corpos de prova, que visam avaliar as propriedades mecânicas com e sem a adição de

borracha, foi realizado o ensaio de compactação segundo a norma NBR 7182.

3.3 Mistura Solo – Borracha

Após a determinação do teor ótimo de umidade que gera o peso específico máximo seco, sob a energia de compactação Proctor modificada, foram realizadas as misturas do solo, com diferentes teores de borracha (40%, 20%, 5%, 3%). Os teores foram estabelecidos em relação à massa total do composto (por exemplo: 60% solo + 40% borracha). O objetivo de testar inicialmente diferentes teores de borracha foi estabelecer a mistura ótima a qual permitiria a avaliação das propriedades mecânicas com a adição de borracha.

Na realização da primeira tentativa de mistura (40% borracha – 60% solo), o composto apresentou o comportamento similar à de uma mola, ao estar em estado confinado, já durante a extração do corpo de prova, o material não apresentou a coesão suficiente, para se manter estável, esfarelando totalmente conforme é apresentado na (Figura 3).



Figura 3. Amostra de solo-pneu granular com teor de 40% de borracha.

Devido à situação anterior, foi realizada uma segunda tentativa com 20% de borracha, apresentando um comportamento similar ao anterior, porém com uma coesão levemente superior (Figura 4).



Figura 4. Amostra de solo-pneu granular com teor de 20% de borracha.

Na terceira mistura, foi decidido acrescentar 5% de borracha, observando-se uma melhoria significativa na coesão, porém ainda apresentam leves rachaduras horizontais e expansão na extração (Figura 5).



Figura 5. Amostra de solo-pneu granular com teor de 5% de borracha.

A quarta tentativa de mistura, foi estabelecido que fosse empregado 3% de borracha e 97% de solo, compactado na energia Proctor modificada e com o correspondente teor ótimo de umidade. O solo apresentou melhores condições em relação às tentativas anteriores (Figura 6), com uma coesão suficiente, para poder extrair os corpos de prova dos cilindros de compactação.



Figura 6. Amostra de solo-pneus granular com teor de 3% de borracha.

Na Tabela 1, são apresentados os símbolos utilizados para identificar o solo e a mistura, nas condições definitivas de ensaio.

Tabela 1. Símbolos utilizados.

Material	Borracha %	Símbolo
Solo natural	0	SN
Mistura	3	SB

3.4 Ensaios de Cisalhamento direto

Visando avaliar os parâmetros de resistência ao cisalhamento, para as amostras com e sem adição de borracha, foram compactados corpos de prova cilíndricos de acordo à norma NBR 7182, na umidade ótima da energia de Proctor modificada. Uma vez extraídos os corpos de prova dos cilindros de compactação (Figura 7), foram moldadas as amostras para a realização dos ensaios de cisalhamento.



Figura 7. Moldagem de um corpo de prova no cilindro com teor de 3% de borracha.

Os ensaios foram realizados de acordo ao estabelecido na norma ASTM D 3080. As tensões normais avaliadas, para obter a envoltória de Mohr – Coulomb foram: 200 kPa, 400 kPa, 600 kPa e 800 kPa.

Os ensaios foram realizados a uma velocidade controlada de 0,029 mm/min, visando permitir a dissipação da poropressão dos corpos de prova.

3.5 Ensaios de Adensamento unidimensional

Os ensaios de adensamento unidimensional foram realizados segundo a norma ABNT - MB 3336, para o solo no estado natural e com a adição de borracha. As tensões normais empregadas no ensaio foram: 200 kPa, 400 kPa, 600 kPa e 800 kPa.

Os corpos de prova para os ensaios de adensamento, foram obtidos da mesma forma que os adquiridos para os ensaios de cisalhamento direto.

3.6 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia

Conhecido como ISC (Índice de Suporte Califórnia), tem como objetivo estimar a resistência de um solo compactado para utilização em bases, sub-bases e subleitos de estruturas de pavimento. Normalizado pela norma NBR 9895, os resultados obtidos, são empregados como base no método de dimensionamento de pavimentos flexíveis. Os corpos de provas para os ensaios de ISC foram adquiridos conforme as mesmas condições de compactação dos ensaios de cisalhamento e adensamento.

4 - RESULTADOS

4.1 Ensaios de caracterização

A avaliação granulométrica do solo foi realizada através de peneiramento e sedimentação. Para a avaliação da borracha, foi realizado somente por peneiramento, o solo obteve $D_{50} = 0,01$ mm e a borracha obteve $D_{50} = 1,9$ mm (Figura 8).

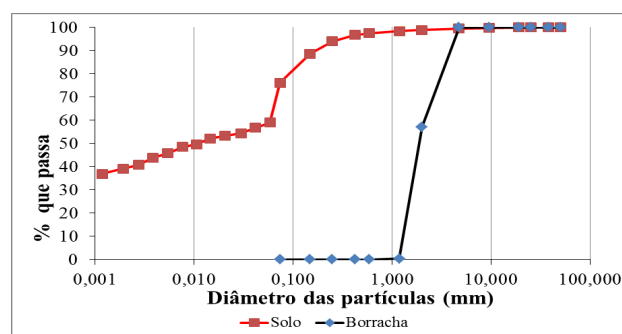


Figura 8. Curvas granulométricas do solo e borracha.

A Tabela 2 mostra as frações constituintes do solo conforme o ensaio de granulometria e os limites de consistência de Atterberg.

Tabela 2. Caracterização física do solo.

Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	LL	LP	IP
39,7	19,8	39,4	43	31	12

Através dos resultados das massas específica dos grãos do solo e pneu, foi utilizada uma média ponderada entre os teores e o valor de $G_{s_{mist}}$, conforme a equação a seguir.

$$G_{s_{mist}} = \frac{(G_{s_{solo}} \times \%_{solo}) + (G_{s_{pneu}} \times \%_{pneu})}{100} \quad (1)$$

onde:

$G_{s_{mist}}$: massa específica dos grãos da mistura,

$G_{s_{solo}}$: massa específica dos grãos de solo,

$G_{s_{pneu}}$: massa específica dos grãos de pneu granular,

$\%_{solo}$: teor de solo da mistura,

$\%_{pneu}$: teor de pneu granular da mistura.

Os resultados dos pesos específicos (G_s) e das massas unitárias do solo são apresentados na Tabela 3, os valores de G_s dos materiais e mistura estão coerentes com os encontrados por Chrusciak et al. (2013), o que condiz com os valores de $G_{s_{solo}}$ 2,68 g/cm³, $G_{s_{pneu}}$ 1,11 g/cm³ e $G_{s_{mist}}$ 2,64 g/cm³.

Tabela 3. Pesos específicos e massas unitárias (solo e borracha).

$G_{s_{solo}}$ (g/cm ³)	2,71
$G_{s_{mist}}$ (g/cm ³)	2,664
$G_{s_{pneu}}$ (g/cm ³)	1,18
Massa unitária Solo (g/cm ³)	1,007
Massa unitária Borracha (g/cm ³)	0,533

4.2 Compactação dos corpos de prova

Na (Figura 9), são apresentadas as curvas de compactação para o solo no estado natural nas energias do Proctor: normal, intermediária e modificada.

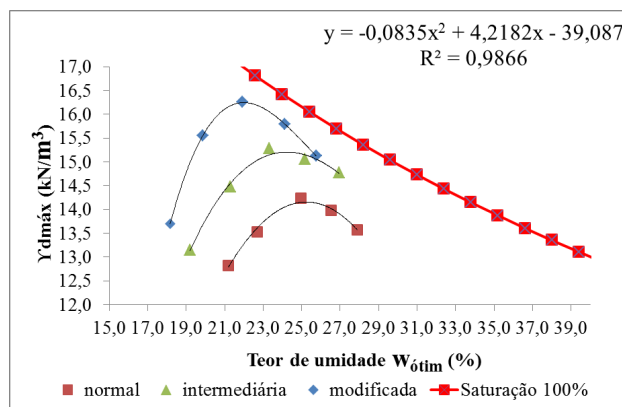


Figura 9. Curvas de compactação do solo puro.

Na Tabela 4 são apresentados os valores de umidades ótimas ($W_{compactação}$) e pesos específicos secos máximos ($\gamma_{dmáx}$).

Tabela 4. Pesos específicos secos máximos e umidades ótimas.

Energia de compactação	$W_{compactação}$ (%)	$\gamma_{dmáx}$ (kN/m ³)
Modificada	21,65	16,26
Intermediária	23,33	15,28
Normal	24,96	14,23

À medida que a energia de compactação aumenta, o peso específico seco máximo aumenta e a umidade ótima reduz, adquirindo uma tendência de acordo com a curva de saturação de 100%.

Definidas as condições definitivas de compactação, foram compactados corpos de prova com e sem adição de borracha nas condições da energia modificada. Na Tabela 5, são apresentados os valores médios de umidade de compactação e peso específico seco, obtidos nos corpos de prova após a compactação.

Tabela 5. Umidade de compactação e massa específica seca com e sem adição de borracha.

Material	$W_{compactação}$ (%)	$\gamma_{dmáx}$ (kN/m ³)
SN	21,65	16,26
SB	19,93	14,95

Observa-se que, ao acrescentar o pneu granular, este exerce certa influência sobre o peso específico seco máximo, diminuindo 8,05% com relação ao solo puro. O anterior

teria um efeito significativo ao tornar camadas de solo mais leves.

Chrusciak et al. (2013), encontrou peso específico seco máximo de $15,02 \text{ kN/m}^3$ e $14,88 \text{ kN/m}^3$ para o solo puro e solo-borracha.

4.3 Avaliação de resistência ao cisalhamento

A seguir são apresentados os resultados do ensaio de cisalhamento direto para o solo sem adição de borracha (Figura 10). Para os diferentes níveis de tensão, o comportamento de cada curva sinaliza a tensão máxima de ruptura.

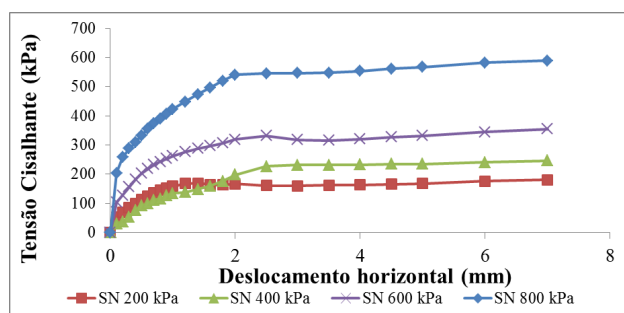


Figura 10. Tensão de cisalhamento versus as curvas deslocamento horizontal (solo puro).

Os resultados do ensaio de cisalhamento com adição de borracha (Figura 11) não apresentam claramente a tensão máxima de ruptura para os níveis de tensões aplicadas. Apesar disso, a tensão cisalhante aumenta ao decorrer do deslocamento horizontal, sendo coerente com os resultados adquiridos nos ensaios de Franco et al., (2012) com teor de 10% de borracha.

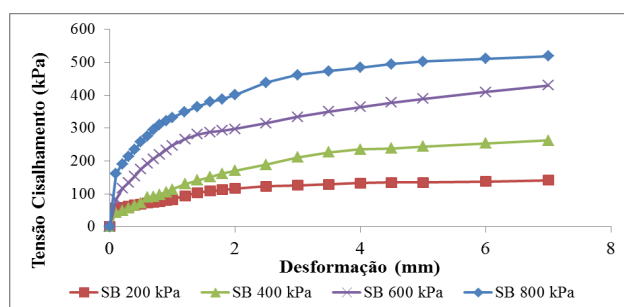


Figura 11. Tensão de cisalhamento versus deslocamento horizontal (solo-borracha).

Ao analisar a variação do volume do solo puro e do solo-borracha, ambos apresentam redução de volume quando submetidos a

tensões de cisalhamento (Figura 12). No entanto, é observado um aumento de 2,1% de compressão em relação ao solo puro quando a carga de 200KPa é aplicada. À medida que é aplicada a tensão de 400 kPa, o solo-borracha apresenta um aumento de 0,95% de compressão em relação ao solo puro. O solo puro e solo-borracha não apresentam dilatação quando, submetidos a tensões de cisalhamento.

Esse comportamento ocorre porque a borracha é mais deformável que o solo, à medida que se aplica maiores tensões no solo-borracha maiores serão os níveis de compressão.

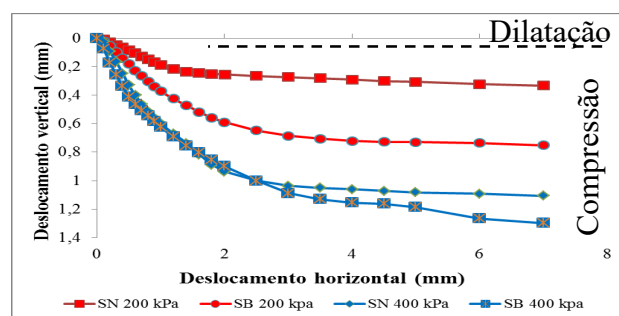


Figura 12. Deslocamento vertical versus deslocamento horizontal (solo puro e solo-borracha).

Na Figura 13, são exibidas as envoltórias de resistência ao cisalhamento de Mohr - Coulomb obtidas para o SN e SB.

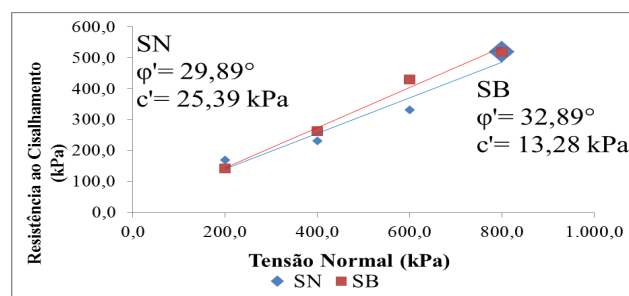


Figura 13. Envoltória de Mohr - Coulomb.

Na Tabela 6, são apresentados os valores obtidos de resistência ao cisalhamento de outros autores e na presente pesquisa para o solo puro.

Tabela 6. Parâmetros obtidos de resistência ao cisalhamento (solo puro).

Autor	C' (kPa)	Φ' (°)
Solo Natural	25	29

Cetin 2006	18	22
Franco 2012	8	31
Chrusciak 2013	35	29

Na Tabela 7, são apresentados os resultados de resistência ao cisalhamento para os mesmos autores citados na tabela anterior, com os correspondentes teores de borracha. Os resultados apresentam, de maneira geral, que a presença de borracha aumenta o ângulo de atrito e diminui a coesão, confirmando os resultados obtidos por outros autores.

Tabela 7. Parâmetros obtidos de resistência ao cisalhamento (mistura).

Autor	Teor de pneu (%)	C' (kPa)	Φ' (°)
Solo - Borracha	3	33	13
Cetin 2006	10	21	20
Franco 2012	10	8	35
Chrusciak 2013	3,7	24	32

Este fator demonstra que há contribuição favorável para a resistência ao cisalhamento para as tensões aplicadas, isto ocorre devido à borracha estar se misturando melhor ao solo e, lhe proporcionando elasticidade. Segundo Zornberg et al. (2004), o aumento na resistência ao cisalhamento deve-se ao reforço do solo no interior da mistura causado pela força de tração mobilizada pela borracha.

4.4 Avaliação da deformabilidade

Ao analisar as características físicas do adensamento (Figura 14), conclui-se que o solo-borracha apresenta 0,949 de índice de vazios e o solo puro obteve 0,767, ou seja, o primeiro obteve aumento de 23,7% em relação ao segundo. Este comportamento ocorre devido ao índice estar relacionado com a umidade aplicada na compactação, ou seja, quanto maior a umidade do solo, mais fácil é impregnando na borracha, acarretando na redução de trincas e deformação do solo misturado.

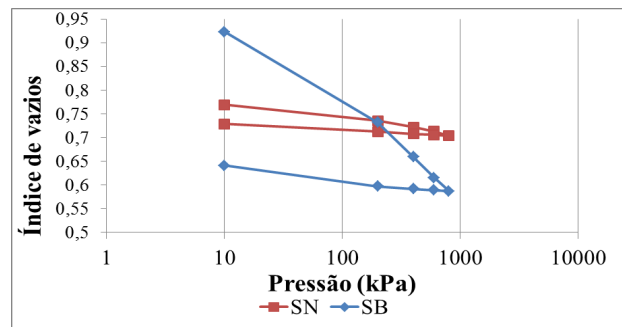


Figura 14. Índice de compressão.

4.5 Avaliação do Índice de Suporte de Califórnia

A (Figura 15) apresenta as curvas de penetração para o solo no estado natural e com adição de borracha, verifica-se que ao acrescentar a borracha, a mistura apresenta uma diminuição nas pressões.

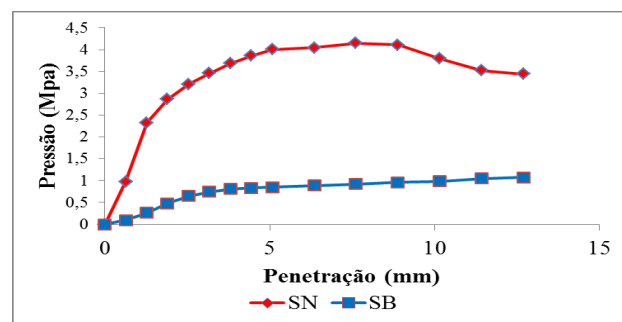


Figura 15. Curvas de pressão por penetração.

Os valores de ISC para as penetrações de 2,54 mm e 5,08 mm são apresentados na (Figura 16) sendo que, em 2,54 mm o maior valor do índice no solo puro é de 46,53% e no solo-borracha é de 9,36%.

O solo-borracha teve uma redução de 80% de sua capacidade de resistência à compressão, esse resultado é devido ao aumento do volume e proporcionando a facilidade de percolação da água pelos poros. Porque o solo-borracha apresenta 35,6% de expansibilidade em relação ao solo puro, quando entra em contato com a água.

De acordo com as solicitações do DNIT 2006, o ISC tem que atingir no mínimo 20% com o objetivo de ser utilizada em sub-bases e no mínimo 60% para bases, como o solo-

borracha não atendeu as especificações pelo DNIT, não podendo ser utilizado em estruturas de pavimentação.

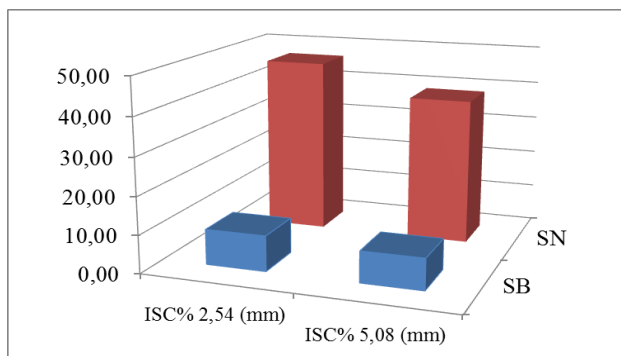


Figura 16. Médias de resistências à penetração (ISC%).

5 - CONCLUSÕES

- Dos resultados obtidos na presente pesquisa, para as condições de energia do Proctor modificada, o teor máximo de borracha que pode ser empregado é de 3%.
- Ao realizar a compactação com o teor de pneu, apresentou uma redução do peso específico de 8,06%. A partir do resultado anterior, pode-se concluir os efeitos benéficos que gera a inclusão de borracha, ao gerar camadas mais leves, como material de preenchimento de estruturas de arrimo.
- O solo misturado com borracha apresentou uma redução na coesão de 48%, e um aumento do ângulo de atrito de 10%, em relação aos resultados do solo em estado natural. O anterior permite concluir que é viável a utilização do solo-borracha em aterros.
- Os resultados do ISC, para o solo misturado com borracha apresentaram um ISC de 9,36 %, gerando uma redução de 80% da sua capacidade, em

relação ao do solo natural, impossibilitando seu uso em camadas para estruturas de pavimentação, ao gerar um efeito negativo no ISC.

REFERÊNCIAS

- Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos, São Paulo. ANIP, 2015 *Livro branco da indústria de pneus*, p. 16-28.
- ABNT (1987). NBR 9895/1987: *Solo – Índice de Suporte Califórnia*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (1986). NBR 7182/1986: *Solo Ensaio de compactação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (1990). MB 3336/1990: *Solo Ensaio de adensamento unidimensional Método de ensaio*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ASTM D 3080. *Standard test method for direct shear test of soil under consolidated drained condition*. In; ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS. American society For Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2004, p. 347- 352.
- CETIN, H., FENER, M. e GUNAYDIN, O. (2006). *Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as fill material*, Engeneering Geology, Vol.: 88, p. 110-120.
- CHRUSCIAK, M. R. (2012). *Análise da Melhoria de Solos Utilizando Fragmentos de Borracha*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-221/13, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 91 p.
- FRANCO, K. L. B (2012). *Caracterização do comportamento geotécnico de mistura de resíduo de pneus e solo laterítico*. Dissertação de Mestrado, Publicação U.F Rio, Departamento de Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN, 77p.
- SCHELLMANN,W. (1981). *Considerations on the definition and classification of laterites*. In *lateritization processes*. Oxford e IBH Publishing Co., New Delhi.
- ZORNER, J. G., Cabral, A.R. e VIRATJANDR, C. (2004) *Behaviour of tire shred – sand mixtures*. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.:41, p. 227-241.