

**ANÁLISE DA PERMEABILIDADE DE SOLO SUPERFICIAL E
LATERÍTICO DE CASCAVEL-PR DEVIDO AO
MELHORAMENTO COM ADIÇÃO DE BORRACHA DE PNEU**

FABRIS, Alaice Luiza¹

ALMEIDA, Maycon André de²

RESUMO:

Este estudo teve como objetivo, avaliar a influência de diversos teores de adição de pó de borracha de pneu na permeabilidade do solo superficial através de ensaios de permeabilidade de carga variável para solos argilosos, com percolação de água para solo *in natura* e com adição de teores (10%, 15% e 20%) de pó de borracha de pneu. O solo utilizado foi coletado no Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz em Cascavel-PR. Para realizar os ensaios foi utilizado o método B, de carga variável, de acordo com a ABNT NBR 14545 (2000). O permeâmetro foi ligado a uma bureta graduada, acoplada a um orifício presente na tampa superior do permeâmetro, e permitiu que fossem medidas as cargas hidráulicas em tempos determinados de 5 minutos, 10 minutos e 15 minutos. O valor médio para solo *in natura* do coeficiente de permeabilidade foi de $5,59 \times 10^{-5}$ cm/s, e este valor diminuiu 30% em razão da proporção de adição dos teores de pó de borracha. Considerando ainda, que o uso do pó de borracha de pneu auxilia no descarte, se alinhando a sustentabilidade.

Palavras-chave: Permeabilidade, solos residuais, pó de borracha.

¹ Acadêmica do 10º período do curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel - PR. E-mail: alaicefabris@hotmail.com.

² Engenheiro Civil, Mestre em Engenharia de Edificações e Saneamento, professor no curso superior de Engenharia Civil do Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel – PR.

1. INTRODUÇÃO

Segundo o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), todo o tipo de construção, na área urbana ou rural, acarreta problemas ao meio ambiente (CONAMA, 1986). Para Côrrea (2009), incorporar práticas sustentáveis na construção é uma grande tendência, governos, consumidores, investidores e associações estimulam, alertam e pressionam o setor construtivo a incorporar tais práticas, em busca da: adequação ambiental; justiça social; viabilidade econômica; aceitação cultural. Já segundo Pereira (2009), o principal objetivo de uma construção sustentável é contemplar os três lados da sustentabilidade: ambiental, econômica e sociocultural.

Segundo Maciel (2003, p.3), “para que a construção civil desempenhe atividades para manter um meio ambiente equilibrado, faz-se necessária a busca por alternativas de gestão ambiental e mudanças de atitude por parte das empresas e das pessoas envolvidas”. Com vista a atender às demandas, que se impõem aos novos contextos sociais, surgem na engenharia propostas para dar respostas a este contexto. Dentre estes, pode-se citar o conceito das construções sustentáveis.

A propósito, a Construção Sustentável é um conceito moderno da Engenharia Civil que pode ser aplicado ao projeto de qualquer tipo de estrutura indo desde pequenas casas populares até a construção de grandes prédios tais como fábricas ou hospitais e até na construção de pavimentos e rodovias. Na construção sustentável, os engenheiros civis e arquitetos procuram usar tecnologias ecológicas nas obras para preservar o meio ambiente e poupar os recursos naturais. A sustentabilidade é uma questão de grande relevância atualmente e deve ser sempre levada em consideração, pensando em novas tecnologias e inovações nas mais diversas áreas de atuação.

Uma dessas novas tecnologias voltadas à sustentabilidade, é o uso da borracha de pneu moída como material para pavimentação. Os pneus podem ser utilizados em obras de engenharia de diversas formas, substituindo os materiais de construção convencionais ou servindo como agregado para reforço da obra. Sandroni e Pacheco (2003), destacam algumas aplicações dos pneus nos mais variados tipos de obras: construção de muros de arrimo e obras de contenção de encostas de maneira geral; drenagem de gases em aterros sanitários; contenção da erosão do solo e outros.

O uso do asfalto com borracha começou como um meio para resolver o problema da eliminação de estocagem de pneus de borracha. Entretanto, Cury et al. (2015), destacam que pneus velhos oferecem um grave risco de incêndio e ocupam grandes quantidades de espaço em aterros sanitários e a sua incorporação ao preparo de material para o pavimento, tornou-se uma forma barata de reciclagem, reduzindo o preço do pavimento de asfalto.

A partir da década de 1970, registra-se nos EUA, a utilização pela indústria de pavimentação da borracha reciclada a partir de resíduos de pneus. No Brasil, o uso rotineiro da borracha reciclada de pneu em pavimentos acabou sendo limitado a alguns estados, ainda que os benefícios econômicos e ambientais sejam suficientes para justificar o uso deste material em pavimentação asfáltica. Descobertas recentes têm reforçado a adoção do material, especialmente em construções de grande escala de pavimentação como rodovias.

Há que se considerar também que, atualmente, a utilização da borracha moída não está aplicada estritamente à pavimentação asfáltica, pode ser utilizada também como cobertura de solos. Isto porque, de maneira geral, as obras de engenharia civil requerem certas características comportamentais e exigências de segurança dos materiais, que as constituem de forma a dar resposta às solicitações estáticas ou cíclicas previstas em Projeto, que exigem o melhoramento dos solos para execução das obras.

O uso da borracha moída em solos apresenta-se como uma das alternativas para tornar viável a realização de obras geotécnicas em solos com baixa resistência ou coesão. Estudos em solos argilosos com adição de borracha de pneu, demonstraram resultados muito satisfatórios em relação à periculosidade da água, pois a adição da mesma ao solo argiloso, promove a diminuição do peso próprio e com isso, diminui as condições de atrito (BANDEIRA, s/d).

O solo possui suas propriedades físicas e mecânicas, resultando em dados importantes a serem considerados em projetos de futuras instalações ou edificações. A permeabilidade do solo é uma delas, com extrema importância, e que possibilita verificar a percolação de água do solo e influencia diretamente nas outras propriedades. Com essas informações, a justificativa para a realização desta pesquisa, vem da necessidade de edificar em solos, onde as características mecânicas e/ou físicas não são correspondentes ao projeto, como em solos de resistência baixa, que exigem alternativas que facilitem e garantam o desempenho da futura edificação.

Para tanto, a pergunta a ser respondida com a realização dessa pesquisa será a seguinte: A adição de borracha de pneu, no solo superficial e laterítico de Cascavel, no Paraná, provoca alterações no coeficiente de permeabilidade?

Este estudo foi limitado a realizar a comparação dos resultados dos ensaios de permeabilidade para o solo in natura e a mistura solo-borracha de pneu, tornando possível a verificação de alterações na permeabilidade. A coleta do solo para o estudo foi realizada em Cascavel, no Paraná e os ensaios de permeabilidade foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos do Centro Universitário Assis Gurgacz, utilizando o método B da ABNT NBR 14.545 (2000). De acordo com todas as informações expostas, este trabalho teve como objetivo geral, analisar a influência da adição da borracha de pneu com diferentes teores (10%, 15% e 20%) na permeabilidade de uma amostra de solo superficial e laterítico da cidade de Cascavel-PR.

Salienta-se que para que este trabalho científico possa ter pleno êxito, os seguintes objetivos específicos foram propostos:

- Determinar os coeficientes de permeabilidade das amostras de solo com aditivo da borracha de pneu em diferentes teores aplicados;
- Comparar os resultados obtidos no solo com adição da borracha de pneu e o solo sem adição.
- Avaliar a influência da borracha no coeficiente de permeabilidade do solo.

Por fim espera-se que este estudo possa contribuir com tecnologias de construção no município de Cascavel, bem como contribuir com pesquisas similares no âmbito nacional, para implementação de novas formas de utilização do material e aplicações.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A origem dos solos

Para Das (2011 apud Caputo, 1989), os solos são formados por meio da decomposição e/ou da deterioração das rochas através do conjunto de processos físicos, químicos e biológicos, como água, temperatura, vegetação e vento, denominados de intemperismo. Seguindo esta perspectiva, destaca-se também outro importante fator, ao se tomar em conta a

origem dos solos, como os minerais que compõem as partículas do solo, e a rocha que o deriva, que determinam as propriedades físicas do mesmo. Originam-se assim, partículas com diâmetros, que variam de pedregulhos até siltes.

2.1.1 Classificação dos solos

De acordo com Pinto (2006), a classificação dos solos tem como finalidade avaliar o comportamento do solo ou direcionar o programa de investigação necessário para conceder apropriada análise de um problema. No Brasil, dispõe-se também da ABNT NBR 6502 (1995), que definem solo como um produto oriundo da decomposição de rochas, que pode ser ocasionada por agentes físicos ou químicos, podendo ou não ter presente em sua composição matéria orgânica e que o tamanho das partículas é uma das primeiras características, que auxiliam na diferenciação dos solos. A Tabela 1 contempla os valores estabelecidos segundo a ABNT NBR 6502 (1995) para delimitar as faixas granulométricas.

Tabela 1: Classificação das faixas granulométricas segundo a norma

Fração	Limites definidos pela ABNT
Pedregulho	Acima de 2,00mm
Areia grossa	0,60mm a 2,00mm
Areia média	0,20mm a 0,60mm
Areia fina	0,06mm a 0,20mm
Silte	0,002mm a 0,06mm
Argila	Inferior a 0,002mm

Fonte: ABNT NBR 6502 (1995).

Também Vargas (1978), define que, para o campo da engenharia civil, o solo pode ser tido como todo o material presente na crosta terrestre no qual não seja impraticável a escavação mecânica e que perca toda a sua resistência quando em contato com a água por longo tempo. Para Lins et al (2016), no que se refere à formação dos solos, estes podem se classificar em três grupos principais: residuais, sedimentares ou transportados - dependendo da presença ou não de um agente de transporte na sua formação - ou ainda orgânicos.

Os solos sedimentares ou transportados; são depósitos de partículas que sofrem a ação de agentes transportadores. Estes se caracterizam por se encontrarem em depressões e apresentam em profundidades maiores uma rocha que não é formada pelo mineral de constituição do solo. Os solos transportados podem ser classificados em vários grupos: a) solos glaciais: formados por transporte e decomposição de geleiras; b) solos aluviais: transportados por água corrente e depositados ao longo do percurso; c) solos lacustres: formados por depósitos em lagos calmos; d) solos marinhos: formados por depósitos em mares; e) solos eólicos: transportados e depositados pelo vento; f) solos coluviais: formados pelo movimento do solo a partir do seu original por gravidade, tal como ocorre durante deslizamentos de terra (DAS, 2011).

Para Pinto (2006), os solos orgânicos são aqueles que apresentam grande quantidade de matéria orgânica, proveniente da decomposição de animais e vegetais. Como possui um odor bastante característico e uma cor escura, eles são de fácil identificação. Ressalta-se que este tipo de solo é problemático para a execução de qualquer tipo de construção, isso por que são muito compressíveis. Outro aspecto deste tipo de solo, é que em alguns casos, por existir uma importante concentração de folhas e caules em processo de decomposição, formam-se as turfas (matéria orgânica combustível).

Os solos residuais são identificados como sendo aqueles que permanecem no local da rocha de origem, denominada rocha mãe. Para que ocorram os solos residuais, é preciso que a velocidade de decomposição de rocha seja maior que a velocidade de remoção pelos agentes externos. Para Pinto (2006), a velocidade de decomposição provém de inúmeros elementos, como: a temperatura, o regime de chuvas e a vegetação. Estando os solos residuais apresentados em camadas com graus de intemperismo decrescente, podem-se identificar neles as seguintes camadas: solo residual maduro, saprolito e a rocha alterada.

Os solos lateríticos são característicos de regiões onde se predomina o clima tropical úmido, e são compostos por minérios diferenciados derivados das condições geológicas de sua formação. Esse tipo de solo é resultado de um grande processo de intemperismo, predominantemente composto por siltes e argilas (solos finos). Ainda, destaca-se que geralmente, são encontrados da forma não saturada, que confere ao solo uma resistência inferior, devido ao grande índice de vazios. Porém, este mesmo solo, ao ser compactado, possui uma capacidade de adquirir coesão e o teor de umidade diminui.

Os solos colapsíveis possuem um alto índice de vazios, e quando submetidos a grandes tensões, estes vazios acabam sendo preenchidos, tornando-se um solo com coesão. Geologicamente, este solo deriva-se da alteração das rochas como os quartzitos e gnaisses. São relacionados a solos arenosos ou argilo-arenosos.

2.2 O Pneu na construção civil

Segundo Martins (2015), estima-se que o Brasil gere 30 milhões de pneus inservíveis por ano. Parte desses pneus acaba sendo enviada a depósitos clandestinos, causadores de poluição ambiental e até mesmo de algumas patologias. Nesta questão, é importante considerar que este artefato possui uma alta resistência à biodegradação, decomposição fotoquímica, reagentes químicos e altas temperaturas gerando um grande problema para a sua reciclagem.

Para a aplicação, reutilização ou descarte destes montantes de resíduos de borracha, o uso de fragmentos de pneus, em projetos de construção, se tornou uma opção viável. Com o desenvolvimento de novas tecnologias, é possível utilizar esses pneus como borracha pulverizada, que pode ser utilizada como matéria-prima modificadora dos asfaltos habituais, bem como reforço de solos (MARTINS, 2015). Isso porque, nem sempre os solos, que irão receber implantações ou obras geotécnicas, estão adequados às necessidades de resistência, exigindo melhorias das propriedades do solo para que se cumpra adequadamente as exigências de projetos, quais seja - a compactação, o adensamento por pré-carregamento e/ou drenos verticais, a injeção de materiais estabilizantes, a estabilização por processos físico-químicos e reforço de solo com a inclusão de elementos resistentes (MITCHEL E KATTI (1981).

2.3 A legislação vigente para o descarte de pneus inservíveis

As primeiras regulamentações brasileiras envolvendo pneus surgiram na década de 1990 como normas voltadas para prevenir a geração de resíduos de pneus. Em 1999, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) colocou em vigor a primeira resolução, Resolução Nº 258, de 26 de agosto, do respectivo ano (BRASIL, 1999), definindo que fabricantes e importadores de pneus têm a obrigação de dar uma destinação ambientalmente correta aos pneus inservíveis, conforme proporção determinada pela referida resolução.

A Resolução nº 258 de 1999, que deu origem à Resolução nº 416 de 2009, regularizou, procedimentos e ações relacionadas à cadeia de pós-consumo de pneus no país. A obrigação de atender suas exigências é voltada para os produtores e importadores dos pneus, que atuam em parceria com todos os agentes envolvidos no ciclo de vida do produto, a fim de prevenir a degradação ambiental gerada pelos pneus inservíveis.

Nesse contexto, também cabe citar a Resolução Nº 416, de 30 de setembro de 2009, (CONAMA), que foi Publicada no Diário Oficial da União Nº 188 em 01 de outubro de 2009, e a Resolução Nº 416 editada pelo CONAMA, do Ministério do Meio Ambiente, dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada e dá outras providências, determinando regras para a destinação final de carcaças inservíveis de pneus.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), sancionada em 2010, trata de resíduos sólidos, inclusive pneus inservíveis, como um passivo de todos agentes econômicos envolvidos no ciclo de vida do produto. A lei destaca importantes conceitos como a gestão integrada dos resíduos, responsabilidade compartilhada e logística reversa, como possíveis ferramentas a serem utilizadas para diminuir os malefícios causados pelo descarte ambientalmente incorreto dos resíduos.

2.4 Melhoramento dos solos com adição de borracha de pneu

Estas opções podem ser resumidas em estabilização e reforço. Define-se estabilização dos solos como sendo o processo pelo qual se confere ao solo uma maior resistência estável às cargas, ao desgaste ou à erosão, por meio de compactação, correção da sua granulometria e de sua plasticidade, ou de adição de substâncias que lhe confirmem uma coesão proveniente da cimentação ou aglutinação dos grãos (VARGAS, 1977). Ou seja, a estabilização está ligada a características químicas. Contudo, o reforço é mais associado a uma inclusão de materiais na massa de solo, tendo uma característica mais física. A associação do solo com os reforços leva o material composto a apresentar melhores características mecânicas.

Por essas razões, desde há muito tempo, químicos e engenheiros vêm trabalhando em diversos tipos de estudos e projetos que misturam borracha natural (látex) e borracha sintética (polímeros) em ligantes asfálticos com o intuito de melhorar as propriedades elásticas do ligante asfáltico. Porém, foi só na década de 1940, que se iniciou a adição de borracha

reciclada de pneus em materiais para pavimentação. E somente a partir do início da década de 1990, o campo de estudo de misturas de solo com borracha se apresenta com os primeiros estudos nos trabalhos de Humphrey et al. (1993) apud Suárez (2013). Os autores estudaram lascas de pneus de quatro diferentes empresas e realizaram ensaios voltados para o estudo apenas das tiras sem misturas com solo. Foram realizados ensaios de curva granulométrica, densidade dos grãos, compactação, cisalhamento direto de grande escala, adensamento e permeabilidade, Ahmed e Lovell (1993) apud Suárez (2013), e Foose et al. (1996) apud Suárez (2013).

Mais recentemente, destacam-se as pesquisas Edinçlicler et al. (2010) apud Suárez (2013) e Ghazavi (2004) apud Suárez (2013), que trataram sobre misturas com solos arenosos e Cetin et al. (2006) apud Suárez (2013), que tratou de misturas com solos argilosos. Especificamente, relacionado ao Brasil, pode-se afirmar que ainda existem poucos estudos e os existentes, dentre os quais destacam-se: Franco (2012) e Szeliga et al. (2012).

Contudo, para se propor qualquer tipo de ação interventiva sobre os solos a fim de adequá-los às necessidades das obras, há que se considerar que apresentam diversidade de aplicações e diferentes comportamentos na engenharia, fatores que requerem a sua classificação em conjuntos distintos. (PINTO, 2006).

3. METODOLOGIA

3.1 Tipo de estudo e local da pesquisa

Trata-se de uma pesquisa exploratória que possibilita maior familiaridade com o tema, de forma a torná-lo mais claro e explícito, do tipo Estudo de Caso. Classifica-se como uma pesquisa quantitativa, justo porque empregará quantificação na coleta dos dados e no tratamento deles, por meio do tratamento estatístico (GIL, 2008).

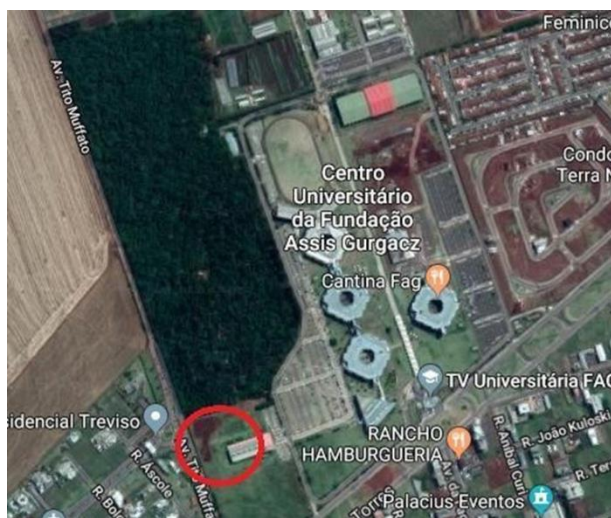
Realizou-se um estudo da permeabilidade do solo superficial e laterítico de Cascavel-PR, após a adição do pó da borracha de pneu. Para a realização dos ensaios pertinentes, foram moldados corpos de prova, compactados, do solo *in natura* e com adição de pó de borracha de pneu, que remete a uma condição de campo comum de reforço de solo para pavimentação.

Foram utilizados corpos de provas com 10 centímetros de altura e 20 centímetros de diâmetro. A compactação foi realizada de acordo com o Ensaio de Proctor, sem aditivos, com solo in natura. Além disso, foram feitas três amostras, uma para cada, com diferentes teores de adição de 10%, 15% e 20%, respectivamente, conforme a ABNT NBR 7182 (2016).

Os ensaios foram todos realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos do Centro Universitário Assis Gurgacz, utilizando o método B, presente na ABNT NBR 14545 (2000), sendo que é um ensaio específico para determinação do coeficiente de permeabilidade, e recomendado sua aplicação à solos finos.

O solo que foi utilizado é proveniente da cidade de Cascavel, que fica localizada no oeste do estado do Paraná, o município conta com aproximadamente 300 mil habitantes, segundo dados do IBGE (2018). Para a realização do estudo, a coleta foi realizada no Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz (CEEF), com localização de acordo com a Figura 1.

Figura 1: Mapa de localização da coleta da amostra



Fonte: Google Maps (2019).

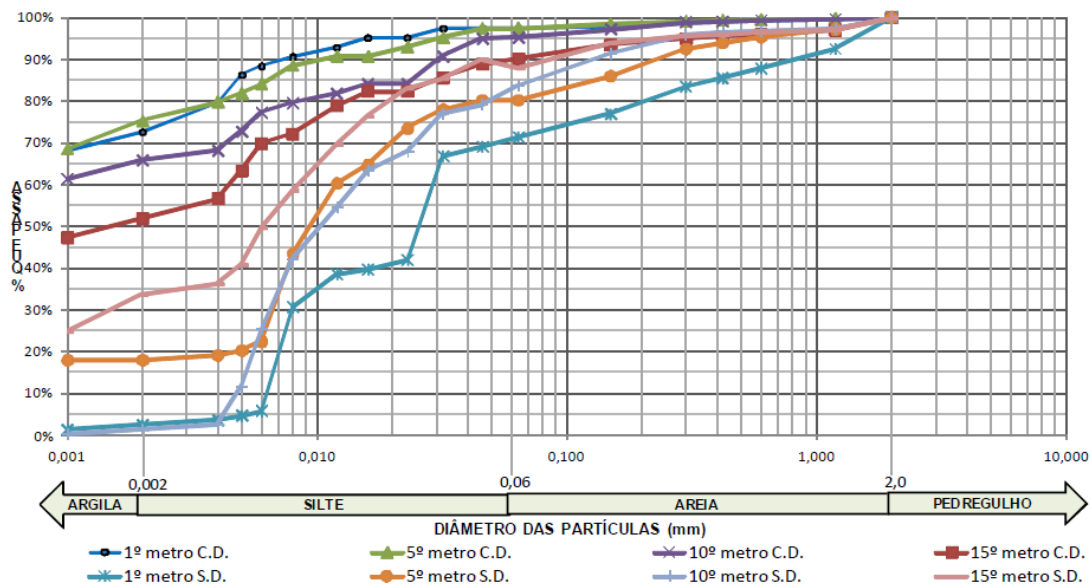
3.2 Coleta e caracterização da amostra

A coleta do solo foi realizada no Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz (CEEF), utilizando pá e enxada, e o auxílio de um carrinho de mão. O solo coletado foi superficial até 1 metro de profundidade. Foi coletado uma

quantidade de aproximadamente 30kg, para atender a todos os ensaios que foram realizados. Esse solo foi armazenado em sacos plásticos, afim de não perder umidade.

Para a caracterização da amostra, foi utilizado o estudo realizado por Zen e Almeida (2018), que demonstra todos os resultados pertinentes a caracterização do solo do local de estudo, como as curvas granulométricas para o solo do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz (CEEF), sendo que o mesmo analisa a influência de floculação das partículas alinhadas a granulometria das mesmas, através de ensaios utilizando uma solução defloculante, como pode ser visto na Figura 2.

Figura 2: Curvas granulométricas do solo do CEEF com e sem a influência de defloculante.



Fonte: Zen e Almeida (2018).

Após a análise realizada por Zen e Almeida (2018) da granulometria do solo superficial e laterítico, também foram determinados pontos importantes para conhecimento do solo do CEEF, como os principais índices físicos, o que proporciona a possível caracterização do solo pelo Sistema de Classificação Rodoviário (T.R.B) e pelo Sistema de Classificação Unificado de Solos (S.U.C.S.). Na Tabela 2, é possível verificar os principais índices do solo analisado.

Tabela 2: Valores médios do solo.

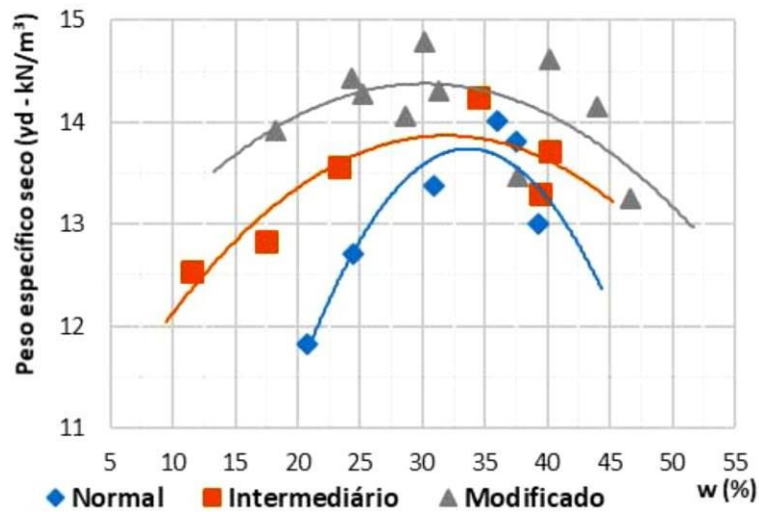
VALORES MÉDIOS	CAMADA 1 1m a 9m	CAMADA 2 10m a 15m
w (%)	34	53
LL (%)	53	59
LP (%)	38	42
IP (%)	15	17
Peso específico seco (kN/m ³)	12	12
Peso específico dos sólidos (kN/m ³)	27	27
Peso específico saturado (kN/m ³)	17	16
Sr (%)	55	60
Argila (%)	70	56
Silte (%)	25	35
Areia (%)	5	9
Consistência	Muito mole a média	Rija a dura
Índice de Vazios	1,22	1,55

Fonte: Zen e Almeida (2018).

Considerando os valores encontrados pelo estudo, classificou-se pelo Sistema Rodoviário o solo, sendo ele A-7-6, que se refere a solos com aplicação de regular à má para pavimentação, por ser um solo onde a maioria presente é porcentagem de solos finos. E considerando o Sistema Unificado, caracterizou-se como CH, que corresponde a solos argilosos muito compressíveis.

Na compactação das amostras, os autores Zen e Almeida (2018), realizaram os ensaios com as três energias especificadas pela norma: normal, intermediária e modificada, sendo possível verificar através da Figura 3, onde apresenta-se os valores correspondentes a cada energia empregada. Para o Ensaio de Proctor foi utilizada a umidade ótima de 34% aproximadamente, sendo este valor, obtido através do estudo realizado por Zen e Almeida (2018).

Figura 3: Curvas de compactação do solo superficial do CEEF.



Fonte: Zen e Almeida (2018).

3.3 Caracterização do pó da borracha de pneu

A coleta do pó de borracha de pneu deu-se em uma recapeadora de pneus, na cidade de Toledo, no interior do Paraná. O material coletado foi armazenado dentro de um saco plástico e armazenado para posterior utilização, como verificado na Figura 4.

Figura 4: Pó de borracha de pneu no momento da coleta



Fonte: Autora (2020).

Após a coleta, foi realizado um ensaio para analisar a granulometria do material, sendo este segundo a ABNT NBR 7181 (2016). Foi submetido 500g de pó de borracha de pneu, a uma sequência de peneiras consecutivas de abertura de malhas estabelecidas também pela

ABNT NBR 7181 (2016), sendo a sequência numérica de nº: 10, 16, 30, 40, 50, 100 e 200. A agitação para separação dos diâmetros foi realizada por um agitador mecânico, conforme a Figura 5.

Figura 5: Sequência de peneiramento e agitador mecânico



Fonte: Autora (2020).

Após aproximadamente 15 minutos no agitador mecânico, foi verificado as peneiras, uma a uma, e o material que ficou retido, sendo realizada a pesagem individual, como na Figura 6.

3.4 Moldagem do corpo de prova

Primeiramente foi retirada a bandeja metálica, com o solo já destorroado que se encontrava na estufa (onde permaneceu por 24 horas consecutivas, à 110°C) e realizado a pesagem das mesmas, obtendo um total de 18,65 kg de solo. Todo esse material foi passado na peneira nº16, afim de que o solo ficasse com uma granulometria homogênea.

Foi realizada a moldagem dos corpos de prova, utilizando o ensaio de Proctor, descrito na ABNT NBR 7182 (2016), com energia de compactação normal, utilizando cilindro pequeno e

soquete pequeno. O solo foi compactado em três camadas, sendo que em cada uma delas, foram aplicados 26 golpes. A umidade ótima utilizada foi de 34%, determinada por Zen e Almeida (2018).

Em uma bandeja metálica limpa, foi colocado uma quantidade de aproximadamente 1000g, que havia sido previamente seco na estufa, e pesado. Com a massa específica seca do material e utilizando as relações de índices físicos conhecidos, foi determinada a exata quantidade de água que deveria ser adicionada ao solo, para que o mesmo estivesse com a umidade ótima em 34% aproximadamente.

Com a quantidade de massa de água (g) necessária para a mistura com o solo definida, para o corpo de prova sem teor de adição, ou seja, 0% de pó de borracha, foi realizada a mistura solo-água, e moldado dentro do molde cilíndrico pequeno, com soquete pequeno, em três camadas, sendo 26 golpes em cada. Para os três corpos de prova com adição (10%, 15% e 20%, respectivamente) de pó de borracha, além da mistura solo-água, também foi adicionado à porcentagem de pó de borracha proposto para cada teor, sendo assim, a mistura solo-água-borracha foi feita e após isso, compactada.

No processo de moldagem dos corpos de prova, foi elaborada uma tabela para facilitar, tendo em vista a disponibilidade de apenas dois permeâmetros, foram moldados dois corpos de prova por dia. Na Tabela 3 é possível verificar as quantidades que foram utilizadas. Os teores estabelecidos foram determinados de acordo com o estudo de Zen e Almeida (2018), referenciados na área.

Tabela 3: Quantidades utilizadas para a moldagem dos corpos de prova

TEOR ADITIVO	SOLO (g)	ADITIVO (g)	ÁGUA (g)
0%	1445	0	578
10%	1765	176,5	706
15%	1454	218,1	581,6
20%	1231	246,2	492,4

Fonte: Autora (2020).

O solo e o pó de borracha foram misturados manualmente em um bowl, como mostra a Figura 6, até que fosse atingida a homogeneidade necessária. O cilindro foi preparado, e o

material foi compactado em três camadas, com 26 golpes em cada. Para a extração, foi utilizado o extrator de corpos de prova, um a um. Como foram feitos dois corpos de prova por dia, até que era confeccionado o segundo, o primeiro permanecia em um saco plástico, para que não perdesse a umidade.

Figura 6: Mistura de solo com pó de borracha de pneu



Fonte: Autora (2020).

3.5 Ensaio de permeabilidade

O ensaio de permeabilidade utilizado foi o Método B – carga variável, pois seria o mais indicado para o tipo de solo objeto do estudo, visto que para solos argilosos a permeabilidade é considerada baixa. Como a água demora muito para passar e alimentar o sistema continuamente com água, como é feito no método de carga constante, ele se torna menos viável. No ensaio realizado, medem-se os valores das cargas hidráulicas obtidas, para tempos corridos determinados. Foi utilizado a ABNT NBR 14545 (2000) e os materiais utilizados também estão na referida norma, na Figura 7 demonstra o permeâmetro de carga variável e a bureta graduada utilizada para o ensaio.

Figura 7: Permeâmetro de carga variável e bureta graduada



Fonte: Autora (2020).

3.6 Procedimentos do ensaio

Inicialmente, foi realizado o nivelamento do corpo de prova para que não houvesse fuga de água percolada pelas laterais, e nem problemas com a vedação do corpo de prova. Depois de nivelado, com dimensões checadas, e com o auxílio de um pincel, espalhou-se parafina líquida (derretida com uso de uma panela e fogo baixo), nas laterais e bordas superiores, afim de que o corpo de prova ficasse selado, e garantisse o fluxo de água correto, sem fuga.

Para a montagem da base do permeâmetro, foi seguindo etapas bem definidas. Primeiramente é colocado ao fundo, uma telha metálica com malha de abertura de 2 milímetros. Sobre essa malha adicionada areia grossa com espessura de aproximadamente 1 cm, em toda a base, como na Figura 8.

Figura 8: Etapas iniciais de montagem da base do permeâmetro



Fonte: Autora (2020).

Logo após a areia grossa, foi colocada uma manta geotêxtil para impedir que finos entrassem em contato com a base do corpo de prova, e comprometesse o resultado final do ensaio, como 3º passo da Figura 10. Acima dessa manta, foi colocado um papel filtro apenas para garantir a não passagem de finos. Finalizando a base com um anel de material polimérico, que garantiu a vedação da base. Com o conjunto pronto, foi alocado o corpo de prova bem ao centro da base, ilustrado no 5º passo na Figura 9.

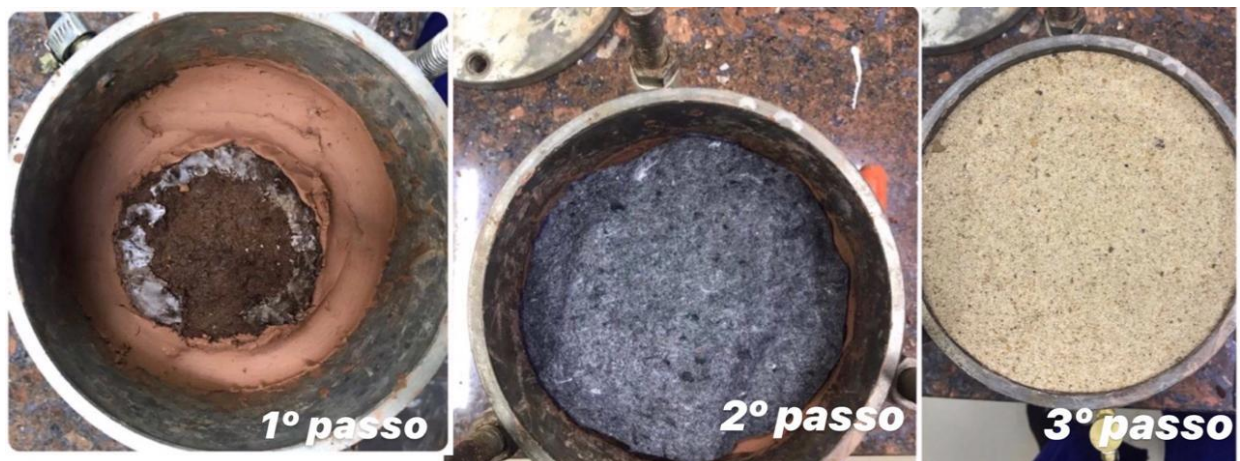
Figura 9: Etapas finais para montagem da base do permeâmetro



Fonte: Autora (2020).

Realizada a montagem da base, é colocado o cilindro que envolve a base, e foi realizada a vedação dos espaços ao redor do corpo de prova com argila plástica, até a altura do mesmo. Feito isso, foi colocada uma manta geotêxtil e adicionado areia grossa até o topo do cilindro, afim de obter a vedação do mesmo, e fechado com a tampa do equipamento, como a sequência de passos mostrada na Figura 10.

Figura 10: Processos para vedar o permeâmetro de carga variável



Fonte: Autora (2020).

Com o equipamento montado e fechado, foram conectadas as mangueiras em uma torneira, aonde foi iniciada a saturação do corpo de prova, com água no sentido ascendente

através de um orifício contido na base do permeâmetro, com o orifício da tampa superior aberto. A saturação ocorreu em aproximadamente 24 horas, para garantir os resultados. Verificada a saturação do corpo de prova, foi conectada uma mangueira na tampa superior do permeâmetro, e na bureta graduada.

Para a medição das cargas hidráulicas, foi completada a bureta graduada com água da torneira, (a mesma utilizada para a moldagem dos corpos de prova), com 80 ml, iniciando com o tempo em 0 segundo, utilizando um cronômetro. Foi conferido das alturas na bureta com os tempos de 5 minutos, 10 minutos e 15 minutos, corridos. Esses valores foram utilizados para a determinação do coeficiente de permeabilidade.

3.7 Cálculo do coeficiente de permeabilidade

Com os dados das cargas hidráulicas para os tempos determinados de 5 minutos, 10 minutos e 15 minutos, foi aplicado na fórmula para cada corpo de prova, para que fosse determinado o coeficiente de permeabilidade do solo, em cada situação, através da Equação 1.

$$k = \frac{a \times H}{A \times \Delta t} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (1)$$

Onde:

- k é o coeficiente de permeabilidade expresso de forma exponencial com base 10, com dois algarismos significativos em centímetros por segundo;
- Δt é dado pela diferença entre os instantes t_1 e t_2 , em segundos;
- h_1 é a carga hidráulica no instante t_1 , em centímetros;
- h_2 é a carga hidráulica no instante t_2 , em centímetros;
- a é a área interna da bureta de vidro, em centímetros quadrados;
- H é a altura inicial do corpo de prova, em centímetros;
- A é a área inicial do corpo de prova, em centímetros quadrados.

4. RESULTADOS e DISCUSSÕES

Como proposto, o objetivo geral do estudo foi analisar a permeabilidade do solo

superficial e laterítico de Cascavel-PR adicionando diferentes teores de pó de borracha de pneu. Foi utilizado o solo do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz (CEEF), de profundidade superficial à 1 metro. O pó de borracha de pneu, que foi utilizado é originado da cidade de Toledo-PR.

4.1 Caracterização do pó da borracha

Foi realizado o peneiramento do material de pó de borracha, segundo a ABNT NBR 7181 (2016), afim de conseguir classificar o diâmetro predominante na amostra. Foi peneirado 500g de pó de borracha de pneu, conforme mostra a Figura 11.

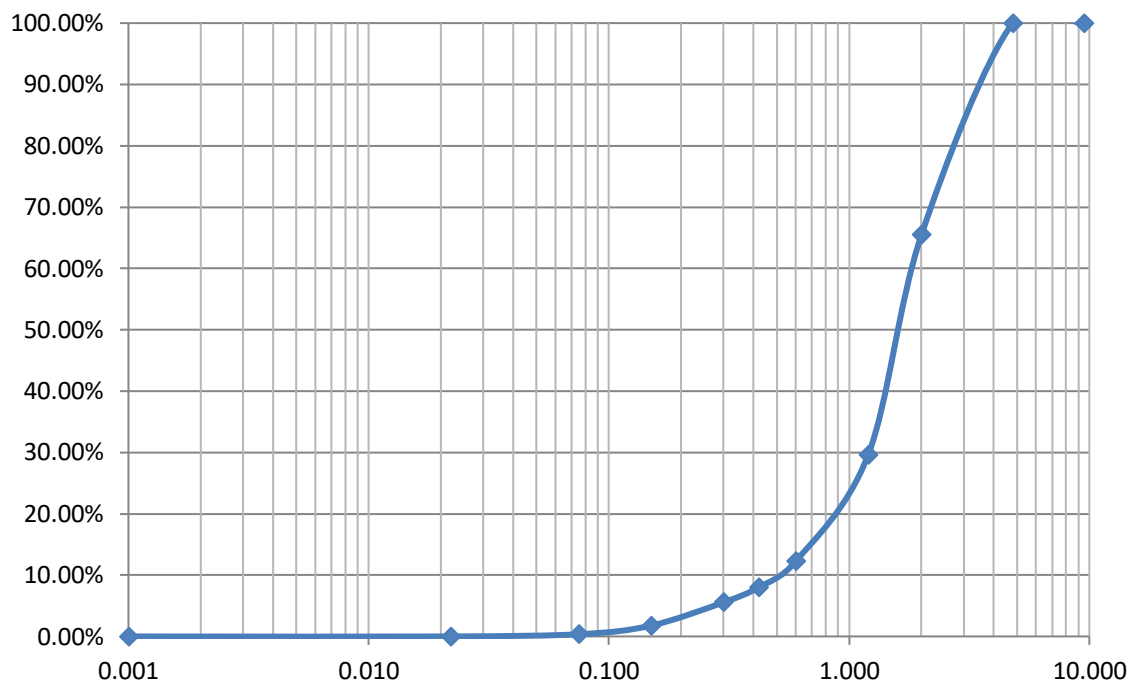
Figura 11: Peneiras com material retido



Fonte: Autora (2020).

Obtendo como maior predominância o material retido na peneira n°16, abertura de 1,2mm, sendo de 178,17g, correspondente a 35,89% da amostra, sendo o eixo x o diâmetro dos grãos, e o eixo y a porcentagem de material que passa, valor acumulado, como ilustrado na Figura 12.

Figura 12: Curva granulométrica do pó de borracha



Fonte: Autora (2020).

4.2 Ensaio de permeabilidade

Com todos os ensaios de laboratório realizados, utilizando a Equação 1, foi possível determinar o coeficiente de permeabilidade do solo argiloso através do método B de carga variável para solo superficial do CEEF (Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz), conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Coeficiente de permeabilidade para cada teor adicionado

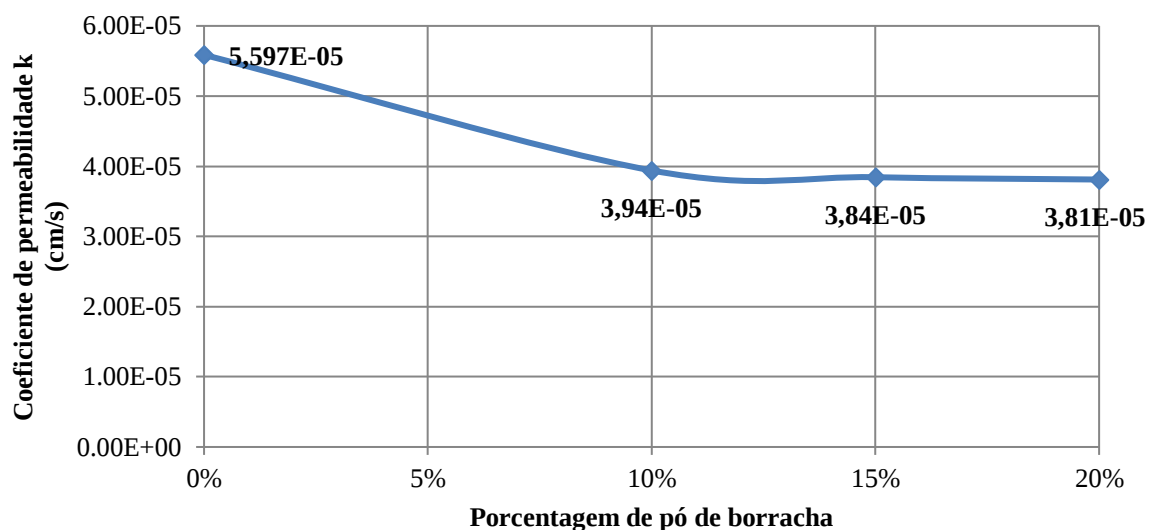
Adição	Coeficiente de permeabilidade (cm/s)
0%	$5,59 \times 10^{-5}$
10%	$3,94 \times 10^{-5}$
15%	$3,84 \times 10^{-5}$
20%	$3,81 \times 10^{-5}$

Fonte: Autora (2020).

Comparando com resultados encontrados por Falkowski (2016), onde para a cota de profundidade -2 metros, o coeficiente de permeabilidade do solo do CEEF (Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz) foi de $7,52 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ para solo *in natura*. No estudo presente, para a profundidade de -1 metro foi encontrado um coeficiente de permeabilidade de $5,59 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$.

Além disso, na Figura 13, é demonstrado os valores do coeficiente de permeabilidade do solo *in natura* e com os teores adicionados (10%, 15% e 20%). Para complementar, BUENO e VILAR (1979), apontam que, outras características dos solos alteram e variam o coeficiente de permeabilidade, como o índice de vazios, grau de saturação e também o tamanho das partículas.

Figura 13: Variação do coeficiente de permeabilidade para cada teor adicionado



Fonte: Autora (2020).

Após a análise dos dados obtidos, foi possível perceber que os resultados mantiveram condizentes com Zen e Almeida (2018) e Falkowki (2016), onde o solo objeto de estudo é caracterizado como solo argiloso com pequenas porções de silte, sendo que este solo apresenta permeabilidade muito baixa.

Para Pinto (2006), os valores correspondentes a este tipo de solo são entre 10^{-5} cm/s e 10^{-6} cm/s , que condizem com os resultados apresentados pelo estudo realizado, sendo que o solo *in natura* apresentou um coeficiente de permeabilidade de $5,59 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$, e com a adição de teor de pó de borracha de pneu, se manteve em torno de $3,94 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$.

De modo geral, ocorreu a diminuição no coeficiente de permeabilidade, conforme foram incrementados os teores propostos (10%, 15% e 20%) de pó de borracha de pneu, comportamento esse semelhante ao observado por Franco (2012), que salientou que o acréscimo do coeficiente até o teor de 20% e após essa porcentagem, variação pouco relevante, motivo esse também que não foram realizados testes com mais teores, visto que os coeficientes de permeabilidade com teor de 15% e de 20% quase não sofreram alterações no estudo realizado.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado através de ensaios laboratoriais teve como objetivo realizar uma análise da influencia da adição do pó de borracha em diferentes teores no coeficiente de permeabilidade de um solo compactado com energia de Proctor, do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz, da cidade de Cascavel-PR.

Foi utilizado o Ensaio de Proctor, para complementar estudos já realizados anteriormente no mesmo solo, segundo a ABNT NBR 7182 (2016), para a compactação dos corpos de prova do solo *in natura* e com teores adicionados (10%, 15% e 20%, respectivamente) sendo submetidos ao Ensaio de Permeabilidade, segundo a ABNT NBR 14545 (2000), métodos B, de carga variável para a determinação do coeficiente de permeabilidade do solo.

A variação do coeficiente de permeabilidade foi significativa, entre o solo *in natura* e o solo com teor de adição de 10% de pó de borracha de pneu, isso se deve principalmente pelas características do material. Com os teores de 15% e 20% de adição de pó de borracha de pneu, foi notado pouca variação no coeficiente de permeabilidade, porém são valores aceitáveis, pois estão dentro dos padrões caracterizados pela literatura. Segundo Pinto (2006), onde solos argilosos com porção de silte, devem variar de 10^{-5} cm/s e 10^{-6} cm/s, ou seja o coeficiente de permeabilidade apresentou uma tendência a crescimento devido ao incremento de pó de borracha de pneu, misturado com o solo.

Analísado todos os coeficientes de permeabilidade, constata-se que a mistura com borracha gerou uma estabilização granulométrica, onde os pedaços de borracha ocupam espaços que antes estavam vazios no solo, reduzindo o canal pela qual a água passaria. Com isso, ocorreu a redução do o coeficiente de permeabilidade.

Em vista disso, significa dizer que a borracha esta oferecendo uma maior resistência a passagem de água e, portanto tornando o solo mais impermeável, o que pode ser extremamente interessante para um subleito de uma rodovia por exemplo, pois irá evitar que a água penetre com maior facilidade no solo.

Além disso, a borracha pode agregar maior flexibilidade ao solo e isso pode atrapalhar seu comportamento, pois o subleito (terreno de fundação) irá afundar, mediante carregamento. Por sua vez, em situações onde a deformação extra que a borracha pode proporcionar a esse solo, não seja problemática, a aplicação pode ser interessante, pois é além proporcionar algumas particularidades a mais no solo, ainda ajuda no descarte de resíduos.

REFERÊNCIAS

AHMED, I., LOVELL, C. W. (1993). Rubber Soils as Lightweight Geomaterials. Transportation Research Record, 1422: 61-70.

ANDRADE, R. B., RAMACCIOTTI, R. E. L., SIMÃO, P. S. Construção verde: desenvolvimento com sustentabilidade. In: CNI; **Construção Verde: Desenvolvimento com sustentabilidade** / Confederação Nacional da Indústria. Câmara Brasileira da Indústria da Construção. – Brasília: CNI, 2012. p.28-29

ARAÚJO, V. M. **Práticas recomendadas para a gestão mais sustentável de canteiro de obras**. 2009. 229 f. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Área de concentração: Engenharia de Construção Civil e Urbana, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT - **NBR 6502** – Rochas e solo – Terminologia. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 7182: SOLO – ENSAIO DE COMPACTAÇÃO**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 14545: DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DE SOLOS ARGILOSOS A CARGA VARIÁVEL**. Rio de Janeiro, 2000

_____. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. CONSELHO NACIONAL DO MEIO

AMBIENTE. **Resolução nº 258 de 26 de agosto de 1999**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 02 de dezembro de 1999. Seção 1, p. 39., 1999

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010:** Estabelece multa em operações de importação, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 03 de agosto de 2010.

BRASIL. **Lei Federal n.6.938**, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação. Disponível em:

<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm>. Acesso em: 05 set. 2019.

BANDEIRA, F. O. **Estudo da resistência ao cisalhamento de misturas de solo argiloso com resíduo de borracha de pneus.** Disponível em: <https://rd.uffs.edu.br/handle/prefix/1362>. Acesso em: 12 set. 2019.

BERTOLLO, S. A. M; JÚNIOR, J. K. F; VILLAYERDE, R. B; FILHO, D. M. Pavimentação asfáltica: uma alternativa para a reutilização de pneus usados. **Revista Limpeza Pública**, n.54. Associação Brasileira de Limpeza Pública – ABPL, 2000.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** São Paulo: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 6ª edição, v. 1, 1989

_____. **Mecânica dos Solos para Uso de Engenheiros Rodoviários** – 2º edição – 1961

CETIN, H., FENER, M. GUNAYDIN, O. (2006). Geotechnical Properties of Tire-cohesive Clayey Soil Mixtures as a Fill Material. *Engineering Geology*, 88:110-120.

CONAMA, Conselho Nacional de Meio Ambiente. Legislação Ambiental, **Resolução nº 0001**, de 23 de janeiro de 1986.

CÔRREA, L. R. **Sustentabilidade na Construção Civil.** 2009. 70 f. Monografia (Curso de Especialização em Construção Civil) – Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

DAS, B. M.; EZ2 Translate; MIRANDA, L. F. R. **(Rev. téc.). Fundamentos de engenharia geotécnica.** São Paulo: Cengage Learning, 2011.

DEGANI, C. M.; CARDOSO, F. F. **A sustentabilidade ao longo do ciclo de vida de edifícios:** a importância da etapa de projeto arquitetônico. Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. Disponível

em<[http://www.pcc.usp.br/files/text/personal_files/francisco_cardoso/Nutau%2002%20De gani%20 Cardoso.pdf](http://www.pcc.usp.br/files/text/personal_files/francisco_cardoso/Nutau%2002%20De%20gani%20Cardoso.pdf)> Acesso em 09/09/2019

EDINÇLILER, A., BAYKAL, G., SAYGILI, A. (2010). **Influence of different processing techniques on the mechanical properties of used tires in embankment construction.** *Waste Management*, 30: 1073-1080.

EMBRAPA (2013): EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. Ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013.

FOOSE, G.J., BENSON, C.H., BOSSCHER, P.J. (1996). Sand reinforced with shredded waste tires. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122 (9): 760–767.

FRANCO, K. L. B. (2012). **Caracterização do Comportamento Geotécnico de Misturas de Resíduo de Pneus e Solo Laterítico**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 139 p.

GHAZAVI, M. (2004). **Shear strength characteristics of sand-mixed with granular rubber**. *Geotechnical and Geological Engineering*, 22: 401–416.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010. 175p.

_____. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 1999. 207 p.

HANSEN, S. **Gestão Socioambiental: Meio Ambiente na Construção Civil**. Florianópolis, SC. SENAI/SC, 2008

HORST, R. **Avaliação dos métodos para cálculo de estabilidade de taludes em maciço terroso**. 2007. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação em Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2007.

IAPAR (Instituto Agrônomo do Paraná). **Cartas de solos do estado do Paraná**. (1:250.000). Paraná, 2008

LASTORIA, G.; SINELLI, O.; KIANG, C. H.; HUTCHEON, I.; PARANHOS FILHO, A. C.; GASTMANS, D. Hidrologia da Formação Serra Geral no Estado de Mato Grosso do Sul. *Águas Subterrâneas*, v.20, n.1, p.139-150, 2006.

MACIEL, J. S. C. **Alternativas sustentáveis de gestão ambiental na construção civil em Manaus**. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na

- Amazônia) -Centro de Ciências do Ambiente, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2003.
- MARTINS, H. A. F. **A Utilização da borracha de pneus na pavimentação asfáltica.** Disponível em: <http://engenharia.anhembib.br/tcc-04/civil-14.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2019.
- MINEROPAR – Minerais do Paraná S/A. **Atlas Geológico do Estado do Paraná.** Paraná, 2001
- OLIVEIRA, V. F., OLIVEIRA, Edson Aparecida de Araújo Querido (2012). **O papel da indústria da construção civil na organização do espaço e do desenvolvimento regional.** Disponível em: <<http://www.unitau.br/app/webroot/unindu/artigos/pdf570.pdf>>. Acesso em, 08/09/2019.
- PEREIRA, P. I. **Construção Sustentável: o desafio.** 2009. 122 f. Monografia (Curso de Especialização em Construção Civil) –Universidade Fernando Pessoa, Porto, 2009.
- PINTO, C. de S. **Curso básico de mecânica dos solos.** 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 355 p.
- SANDRONI, M.; PACHECO, B. A. V. **Os destinos dos pneus inservíveis.** NIEAD/UFRJ. 2003. Disponível em: < <http://www.jorplast.com.br/jpout03/pag08.html>>. Acesso em: 02 setembro 2019.
- SANTOS, E. F. Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificações geotécnicas aplicadas aos solos tropicais. 2006. Dissertação (Mestrado em Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006
- SENÇO, W. de. **Manual de Técnicas de Pavimentação:** volume 1. 2. ed. São Paulo, Pini, 2007.
- SPADOTTO, A. et al. Impactos ambientais causados pela construção civil. **Unoesc & Ciência** – ACSA, Joaçaba, v. 2, n. 2, p. 173-180, 2011. Disponível em: <http://editora.unoesc.edu.br/index.php/acsa/article/view/745/pdf_232>. Acesso em 06 de setembro de 2019.
- SUÁREZ, M. J. **Avaliação da Resistência de Material Leve Utilizando Misturas de Pedacos de Pneus com Solo do Distrito Federal [Distrito Federal]** 2013 xviii, 119 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2013) Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil

SZELIGA, L., RAMIREZ, G. D., CASAGRANDE, M. D. T. (2014). Estudo experimental de Solo reforçado com borracha moída de pneus inservíveis para aplicação em obras geotécnicas. XVI Congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia geotécnica – COBRAMSEG, Associação brasileira de mecânica dos solos e engenharia geotécnica – ABMS, Porto de Galinhas, PE, ref. 231, 8p

TOLEDO. **Plano Municipal de Recursos Hídricos**. 2016.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. Editora McGRAW-HILL do Brasil LTDA, 1978.

VILLIBOR, D.F. et al. Pavimentos de baixo custo para vias urbanas: bases alternativas com solos lateríticos. São Paulo: **Arte & Ciência**, 2007.