

**ESTUDO E ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE REFORÇOS E SUAS
APLICAÇÕES NA ENGENHARIA GEOTÉCNICA**
(Estudo de Misturas de Solo com a Adição de Borracha Moída de Pneus)

Aluna: Daniela Aubry Cadete Amprino
Orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande

Introdução

A demanda por pneus no mundo está crescendo proporcionalmente com o desenvolvimento econômico dos países em desenvolvimento. No Brasil, mais de 65 milhões de pneus são fabricados anualmente (ANIP - Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos, 2010). Uma grande quantidade de pneus também é importado para o país. Infelizmente, a maioria dos pneus usados não são adequadamente descartados. As estimativas indicam que existem mais de 100 milhões de pneus estocados em todo o país.

A disposição inadequada dos pneus no meio ambiente contribui no agravamento do gerenciamento de resíduos, pois os mesmos apresentam baixa compressibilidade, representam risco constante de incêndios e servem como local de procriação de mosquitos, roedores e outros vetores de doenças, além de serem objetos que ocupam grande volume. A falta de recursos para o controle da disposição final e para o estudo de alternativas econômica e ambientalmente viáveis para a reutilização de pneus usados é diretamente proporcional à falta de interesse político. Em outras palavras, o problema está nos critérios para priorização da utilização dos recursos existentes.

Em uma tentativa de reduzir o esgotamento dos recursos naturais, a legislação ambiental específica sobre o destino de pneus usados foi apresentada no Brasil. Fabricantes e importadores de pneus são agora responsáveis para o ciclo de vida completo do produto. Para cada pneu novo colocado no mercado, um dos pneus descartados deve ser recolhido e concedida uma utilização final ambientalmente adequada [9].

No intuito de colaborar com o destino ecologicamente correto para os pneus inservíveis, o Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA [8], através da Resolução Nº258 de 26 de agosto de 1999 que entrou em vigor em janeiro de 2002, determinou que as empresas fabricantes e as importadoras de pneus ficam obrigadas a coletar e dar destinação final, ambientalmente adequada, aos pneus inservíveis existentes no território nacional, na proporção relativa às quantidades fabricadas e importadas. Além de obrigar a reciclarem parte dos pneus usados já vendidos para poderem colocar pneus novos no mercado, atingindo a proporção máxima em 2005, quando o percentual de reciclagem será de 5 pneus para cada 4 produzidos, o que contribuirá para a diminuição do passivo ambiental de mais de 900 milhões de pneus. Pela proposta, o Ibama ficará responsável pela aplicação da resolução, podendo punir os infratores com base na Lei de Crimes Ambientais.

A Associação Nacional das Indústrias de Pneumáticos (ANIP) que, desde 2000, tomou para si a responsabilidade pela coleta dos pneus inservíveis (sem condições de rodagem ou de reforma) e criou os chamados ecopontos, em que são 220 postos para coletas de pneus espalhados em várias cidades por todo o país. A legislação, que vem obrigando os produtores a dar destino aos mais de 46 milhões produzidos todo ano no Brasil, encontrou no meio rodoviário um excelente parceiro para a reciclagem e minimização deste problema ecológico responsável pela proliferação de mosquitos transmissores de doenças.

A legislação brasileira também proíbe a importação de pneus reformados e resíduos de pneus. Fabricantes e importadores de pneus são obrigados a apoiar a investigação e desenvolvimento sobre as técnicas de reutilização e reciclagem de pneus inservíveis. Pela proposta, o Ibama ficará responsável pela aplicação da resolução, podendo punir os infratores com base na Lei de Crimes Ambientais.

Assim, os fabricantes e os importadores poderão criar centrais de recepção de pneus inservíveis, de acordo com as normas ambientais, para armazenamento temporário e posterior destinação final ambientalmente segura e adequada. Os distribuidores, os revendedores e os consumidores finais de pneus, em articulação com os fabricantes, importadores e Poder Público, deverão colaborar na adoção de procedimentos, visando programar a coleta dos pneus inservíveis existentes no País.

A utilização da borracha de pneus moídos, ou pó de pneus, em misturas asfálticas de revestimento em pavimentação já se mostra como uma das alternativas ambientalmente adequadas, que podem apresentar grandes reduções de volume desse resíduo em todo o mundo. Já que as camadas de revestimento de um pavimento incluem componentes de alto custo e que merecem atenção, onde deve ser realizada uma análise do custo/benefício. Os derivados de petróleo e a redução da disponibilidade de materiais naturais, ligados às exigências da construção, estabelecem uma busca por elementos que possam apresentar bom desempenho e custo baixo.

Em 1995 o estado do Rio Grande do Sul, foi pioneiro na modificação dos asfaltos convencionais e em Agosto de 2001 construiu o primeiro trecho de Asfalto Borracha com aproximadamente dois quilômetros de extensão [8]. Um destino final que também seria adequado de pneus inservíveis consiste na utilização de pedaços de pneus, puro ou misturado com o solo, como preenchimento de aterro.

A busca de novas alternativas para a construção civil é imperativa, dada à escassez de materiais naturais e ao aumento de custos dos materiais de construção. Assim, apesar da utilização da borracha reciclada de pneumáticos inservíveis em pavimento ser uma solução para diminuir o problema e a deposição desse resíduo, cabe salientar que a inclusão desse material na construção civil é uma melhoria na propriedade dos materiais.

É muito comum que o solo não atenda totalmente as exigências de um determinado projeto. Com base nisso pensou-se numa alternativa para viabilizar soluções que melhore as características desse solo de modo que adeque-se as solicitações necessárias, melhorando assim as suas propriedades. Visto que pneumáticos inservíveis abandonados ou dispostos inadequadamente constituem passivo ambiental, que resulta em sério risco ao meio ambiente e à saúde pública, tem-se como alternativa atraente a utilização da borracha na engenharia civil e geotécnica.

O uso de pneu como reforço de solo apresenta várias vantagens. Este tem peso unitário baixo, alta durabilidade, e não causam efeitos adversos sobre as águas subterrâneas. Pneu moído misturado com o solo pode induzir mecanismos de reforço, aumentando a resistência ao cisalhamento da mistura. Ou seja, além de evitar que os pneus se transformem em fonte de poluição, esta reciclagem é ambientalmente correta ao utilizar ao máximo um recurso natural (derivado de petróleo), que misturado ao solo resulta em um produto com características técnicas superiores e ambientalmente correto, o solo-borracha.

Não se pode esquecer que o petróleo, é uma fonte não renovável de energia. As conseqüências ecológicas, econômicas e sociais aliadas ao benefício técnico do novo material criado com a borracha reciclada são muito interessantes e compõe um cenário muito benéfico para a sociedade.

Este trabalho tem o propósito de contribuir para uma melhor compreensão do uso da borracha de pneus inutilizáveis como material de reforço de solos dentro da engenharia civil com aplicação geotécnica, contribuindo para um melhor desempenho do mesmo, além de dar uma destinação ambientalmente adequada aos pneus velhos.

Já que o conhecimento do mecanismo de interação entre os materiais é de grande importância no entendimento da resposta da mistura no que tange ao seu comportamento mecânico, caracterizou-se física e mecanicamente, através de ensaios laboratoriais, a mistura solo-borracha, com vistas a aplicações em obras de engenharia geotécnica.

Aspecto Ambiental

O Brasil produzia em 2006, cinquenta e quatro milhões e meio de pneus por ano. Quase um terço desse montante é exportado para 85 países e o restante roda nos veículos nacionais. A produção de pneus novos está estimada em cerca de 2 milhões por dia em todo o mundo. Já o descarte de pneus velhos chega a atingir, anualmente, a marca de quase 800 milhões de unidades [10]. O descarte inadequado de pneus no meio ambiente vem sendo uma grande preocupação da sociedade, no que se refere ao gerenciamento de resíduos sólidos, o ciclo de vida de um pneu. Existem várias alternativas para a utilização de pneus inservíveis, tais como a incineração em fornos de cimento e celulose e a confecção de artefatos de borracha. Porém essas alternativas se mostram insuficientes, pois, para a primeira, existem diversas controvérsias quanto às emissões durante a queima, enquanto a segunda apresenta redução de pequenos volumes. Apesar do alto índice de recauchutagem no país, que prolonga a vida do pneu em cerca de 40%, a maior parte deles, já desgastados pelo uso, acaba indo para lixões, à beira de rios e estradas; e, também, para o quintal das casas onde acabam acumulando água que atrai a produção nacional de borracha e sua reciclagem é capaz de devolver ao processo de produção insumos regenerados por menos da metade do custo da borracha natural ou sintética. Há, ainda, a economia de energia que poupa petróleo usado como matéria-prima virgem, chegando até a melhorar as propriedades de materiais feitos com borracha. No Rio de Janeiro-RJ, os pneus e artefatos de borracha em geral correspondem a 0,5% do lixo urbano; enquanto nos EUA, os pneus correspondem a 1% dos resíduos gerados, tendo cerca de 3 bilhões de carcaças de pneus estocados. No Brasil, sabe-se que os chamados "carcaceiros" recuperam mais de 14 milhões de pneus por ano, sob diversas formas.

Segundo dados da Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP, 2003), no Estado da Bahia, estima-se que a quantidade de pneus inservíveis descartados por ano esteja próxima de 850 mil, sendo 330 mil no município de Salvador. O [10] apresenta, também, o grave problema da queima a céu aberto que polui o ar por meio de fumaça negra com odor forte (dióxido de enxofre), essa queima é proibida em vários países, inclusive no Brasil.

Nos EUA as carcaças de pneus são consideradas como resíduo especial e não são coletadas junto à coleta de resíduos domésticos. A produção anual norte-americana de pneus de carros de passeio e de caminhão descartados em 1990 foi de 278 milhões de unidades e, nesse mesmo ano, pode-se estimar uma taxa de geração "per capita" de pneus descartados em torno de 1,25. Já em 1993, aproximadamente, 34,5% da produção anual de pneus descartados foram reusados, reciclados ou recuperados [11].

Devido às crescentes preocupações ambientais, tem-se questionado a respeito da destinação ou deposição de pneus inservíveis. O reaproveitamento destes pneus se constitui, em todo o mundo, em um desafio muito difícil, pois são objetos que ocupam

grande volume e que precisam ser armazenados em condições apropriadas para evitar riscos de incêndio e proliferação de insetos e roedores.

A disposição final em aterros sanitários se torna inviável, pois os pneus inteiros apresentam baixa compressibilidade e degradação muito lenta, gerando uma grande dificuldade de lhes propiciar uma nova destinação ecológica e economicamente viável. Há uma disposição referente aos aterros sanitários devido à compactação dos pneus, pois os mesmos voltam à superfície ao longo tempo, reduzindo, assim a vida útil dos aterros. Devido à falta de uma ação governamental para controle da destinação adequada desses resíduos, os pneus geralmente são armazenados em fundos de quintais, borracharias, ferros-velhos, recauchutadoras ou são lançados em terrenos baldios, cursos de água e beiras de estradas. Conforme mostra a Figura 1, a disposição de pneus inutilizáveis abandonados em terrenos baldios e rios.



Figura 1 - Disposição de carcaças de pneus em terreno baldio e no rio

Programa Experimental

Para o programa experimental do presente estudo, definiu-se a realização de ensaios de caracterização física (Limites de Atterberg, Massa Específica dos Grãos e Análise Granulométrica) e mecânicos (Compactação e Cisalhamento Direto), com o objetivo de se analisar e comparar o comportamento do solo puro e em mistura com 30% de borracha moída (proveniente de pneus inservíveis), como material de reforço.

Materiais

O solo utilizado é um solo transportado, de origem coluvionar, retirado do campo experimental da PUC-Rio, identificado como Argila Siltosa, com plasticidade média e consistência variando de média a rijá.

A borracha moída utilizada é proveniente de pneus inservíveis, onde a grande maioria dos pneus são processados através de parceria com a Reciclanip, entidade mantida pelos fabricantes de pneumáticos. Eventualmente recebem alguns pequenos volumes de outras fontes, como borracharias, ecopontos e prefeituras das regiões próximas. Também são utilizados pneus novos fora de padronização classificados como inservíveis, fornecidos pelos fabricantes do tipo Goodyear, Firestone, Pirelli, etc. Este estudo está sendo realizado com esse material na composição de 50% em peso de pneus de veículos de passeio e 50% de pneus de veículos de carga. Cada lote produzido e

enviado para obra segue com um laudo da análise granulométrica, que atesta que o pó de borracha triturada atende à faixa granulométrica especificada.

As Figuras 2 e 3 apresentam o solo e a borracha de pneu, respectivamente, utilizados no presente estudo.



Figura 2 – Solo do Campo experimental da PUC-Rio.



Figura 3 – Borracha de Pneu

Ensaio de Caracterização

Os ensaios de caracterização dos solos são os primeiros ensaios de laboratório que devem ser feitos com uma amostra de solo. São ensaios relativamente simples de serem executados, de baixo custo e propiciam ao geotécnico um primeiro conhecimento do solo em estudo.

É através dos resultados desses ensaios que é feita a classificação dos solos em termos de granulometria, que segue um sistema internacional, possibilitando assim uma linguagem universal sobre o solo analisado.

Fazem parte dos ensaios de caracterização três grupos de ensaios:

- a) Ensaio de Granulometria Completa é feito conforme os procedimentos da norma brasileira NBR_7181 [2]: Peneiramento Grosso; Sedimentação e Peneiramento Fino. O resultado desses ensaios é uma curva de distribuição granulométrica do solo e através desta curva podemos dizer, por exemplo, se o solo é uma areia fina, um silte arenoso ou uma argila silto arenosa e ainda determinar o coeficiente de uniformidade do solo.
- b) Ensaio de Peso Específico dos Grãos, conforme a NBR_6508 [6].
- c) Ensaio de Consistência: Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade, conforme as normas NBR_6459 [3] e NBR_7180 [5].

- Granulometria por peneiramento grosso

O procedimento utilizado é o método do peneiramento, com uso de peneiras de malhas quadradas padronizadas. Nas peneiras ficam retidas porções de solo, estes com diâmetro de grãos maiores que a abertura da malha (material retido) e os grãos que passam na peneira possuem diâmetros menores que a abertura da malha (material passante).

Equipamento do ensaio:

Jogo de peneiras de malhas quadradas, de diâmetros: 38,0 mm (nº 1 ½”), 19,0 mm (nº ¾”), 9,25 mm (nº 3/8”), 7,93 mm (nº 5/16), 6,35 mm (nº 1/4), 4,76 mm (nº 4), 2,38 mm (nº 8), 2,0 mm (nº 10), 0,84 mm (nº 20) e 0,42 mm (nº 40); Agitador mecânico de peneiras; Cápsulas de alumínio; Escova para a limpeza das peneiras; Bandeja metálica Repartidor de amostras; Almofariz de porcelana com mão de gral revestida de borracha;

Tanque para lavagem dos recipientes e do solo; Estufa com termostato para manter a temperatura entre 60° e 65° C; Estufa com termostato para manter a temperatura entre 105° e 110° C; Balança de precisão; Recipientes para guardar a amostra sem variar a umidade, dissecadores.

Procedimento do ensaio:

- Primeiramente deve ser feito o preparo da amostra, que consiste em secar o material ao ar ou em estufa a 60° C, até atingir uma umidade próxima da umidade higroscópica. No nosso caso foi utilizado o material seco ao ar.
- Fazer uma análise visual e definir se o solo é fino ou grosso. No caso de solo grosso, separar 1.500 gramas de material e no caso de solo fino, separar 500 gramas do material para o peneiramento. No nosso caso, considerou-se o solo fino, pois não se conseguia enxergar grãos, então foi pesado 500 g do solo.
- Desmanchar os torrões do material, evitando a quebra dos grãos e homogeneizar a amostra.
- Passar o material na peneira de nº 40 (abertura de malha de 0,42 mm), isso é uma variação da NBR_7181[2], que utiliza a peneira nº 10 (abertura de malha de 2,0 mm).
- Nota: O material retido na peneira nº 40 será utilizado nesse ensaio (peneiramento grosso) e o material passante deverá ser separado para fazer os ensaios de sedimentação, umidade higroscópica, peso específico dos grãos e limites de liquidez e plasticidade.
- O ensaio de umidade higroscópica deverá ser iniciado nesse momento: medir uma cápsula vazia; encher essa cápsula com solo; pesar e levar para estufa à temperatura de 110° C até a constância de massa.
- Lavar o material retido na peneira nº 40, a fim de eliminar o material fino eventualmente aderente nas partículas maiores.
- Pesar esse material e colocar o material para secagem na estufa à temperatura de 110° C até a constância de massa. Conforme instruções do técnico do laboratório, deixamos a amostra por 24 horas, garantindo a secagem do material, ou seja, a constância de massa.
- Após as 24 horas, retirar a amostra da estufa e iniciar o peneiramento mecânico.
- Montar o jogo de peneiras e levar para o agitador de peneiras. No nosso caso foi feita a vibração manual. As partículas menores passam para peneira seguinte e, assim, em cada peneira ficará retido apenas grãos com dimensões maiores que a abertura de malha.
- Ao final de 15 minutos de vibração, pesa-se o material retido em cada peneira.
- Para finalizar o ensaio de umidade higroscópica, ao final de 24 horas, deve-se retirar e pesar a cápsula de solo seco.

- Granulometria por sedimentação

O ensaio de granulometria por sedimentação é recomendado para solos finos, com grãos menores que 0,075 mm, em que o peneiramento é impossível. O limite inferior que se consegue medir nesse ensaio são partículas de aproximadamente 0,001 mm.

Inicialmente, a amostra do solo será dispersa na água e, no período de 24 horas, as partículas do solo serão depositadas no fundo de uma proveta, de profundidade padronizada. O método é baseado na Lei de Stokes, em que as partículas serão depositadas com velocidades uniformes proporcionais a sua massa.

Equipamentos do ensaio:

Duas provetas de vidro com volume de 1.000ml; Proveta de vidro menor; Densímetro de bulbo simétrico, calibrado; Termômetro graduado em 0,1°C; Relógio com indicação de segundos; Béquier de vidro, com capacidade de 250 cm³; Defloculante (utilizamos 125 ml de solução hexametáfosfato de sódio com concentração de 45,7g de sal por litro de solução); Bisnaga com água destilada; Aparelho dispersor a hélice com copo (“mix”); Peneira nº 200; Estufa com termostato para manter a temperatura entre 105° e 110° C; Balança de precisão; Dissecador.

Procedimento do ensaio:

- O preparo da amostra foi feito no ensaio anterior, separando 50 g do material passante na peneira nº 40, ou seja, a fração inferior a 0,42 mm.
- Transferir a amostra para um Becker de 250 ml e acrescentar 125 ml de defloculante, que serve para separar as partículas do solo, vencendo suas forças elétricas de atração.
- Agitar o Becker até que todo o material fique imerso e deixar a solução em repouso num tempo mínimo de 12 horas.
- Após 12 horas, colocar a solução no copo do aparelho dispersor e, com o auxílio da bisnaga com água destilada, remover todo o material que fica retido nas paredes da proveta, de modo que não haja perda das partículas do solo.
- Adicionar água destilada até atingir 5 cm abaixo da borda do copo do dispersor e submeter a ação do aparelho dispersor aproximadamente 15 min.
- Transferir a solução para proveta de 1.000 ml, e novamente com cuidado de retirar todo o material que fica retido no copo com auxílio da bisnaga com água destilada. Completar o volume da proveta com água destilada.
- Encher outra proveta com água destilada e introduzir cuidadosamente o termômetro e o densímetro, que devem ficar imersos nessa água durante o ensaio.
- Tampar a proveta com uma das mãos e segurar a base da proveta com a outra mão. Durante 1 min. executar movimentos de rotação pelos quais a boca da proveta passe de cima para baixo e vice-versa. O ideal é que a proveta passe por cima da cabeça do laboratorista.
- Imediatamente anotar a hora exata do início da sedimentação, retirar o densímetro da proveta com água, mergulhar lenta e cuidadosamente o densímetro na solução, e fazer as primeiras leituras de densidade nos tempos 30 segundos, 1 e 2 minutos.
- De modo a não perturbar a solução, retirar lenta e cuidadosamente o densímetro da solução e voltar para proveta de água destilada. Colocar o termômetro na solução e fazer a leitura da temperatura.
- Prosseguir as leituras do densímetro e da temperatura nos tempos padronizados pela NBR_7181 (4, 8, 15 e 30 min., 1, 2, 4, 8 e 24 horas) [2].
- Após a última leitura, novamente com o auxílio da bisnaga, transferir toda solução para peneira nº200 e o material retido será lavado.
- Levantar o material retido e lavado na peneira nº200 para secagem em estufa por 24 horas. Esse material será usado para o peneiramento fino.

- Granulometria por peneiramento fino

Equipamentos do ensaio:

Jogo de peneiras de malhas quadradas, de diâmetros: 0,250 mm (n° 60), 0,149 mm (n° 100) e 0,074mm (n° 200); Escova para a limpeza das peneiras; Tanque para lavagem dos recipientes e do solo; Estufa para secagem para manter a temperatura entre 105° e 110° C; Balança de precisão; Recipientes para guardar a amostra sem variar a umidade, dessecadores.

Procedimento do ensaio:

O procedimento utilizado é similar ao peneiramento grosso, exceto pelo preparo da amostra e pelo espaçamento da malha das peneiras.

- O preparo da amostra foi feito no ensaio anterior, que consiste em lavar o material que foi utilizado no ensaio de granulometria por sedimentação, deixando-o passar na peneira de n° 200, a fim de eliminar o material aderente nas partículas maiores.
- Pesquisar esse material e colocar para secagem na estufa à temperatura de 105° a 110° C por 24 horas, garantindo a constância de massa.
- Após as 24 horas, retirar a amostra da estufa.
- Montar o jogo de peneiras e levar para vibração mecânica (utilizamos a vibração manual).
- Ao final de 15 minutos de vibração, pesa-se o material retido em cada peneira.

- Peso específico dos grãos

O peso específico real dos grãos consiste na relação entre massa dos grãos e volume dos grãos. O ensaio de peso específico dos grãos consiste em determinar o volume do material sólido de massa conhecida, de forma com que o volume de vazios seja excluído. Este ensaio é normatizado pela NBR_6508 [6].

No laboratório, a obtenção do volume ocupado pelos grãos é possível com base no Princípio de Arquimedes, que diz que um corpo quando imerso em água, desloca um volume de líquido igual ao seu próprio volume.

Equipamentos do ensaio:

Quatro Picnômetros de 250 ml; Balança de precisão; Funil; Dissecador; Água destilada; Conta gotas; Termômetro graduado em 0,1°C; Estufa com termostato para manter a temperatura entre 105 a 110 °C; Equipamento para banho-maria; Bomba de vácuo;

Procedimento do ensaio:

- O preparo da amostra foi feito no ensaio de granulometria por peneiramento, separando aproximadamente 150 g do material passante na peneira n° 40.
- Em quatro picnômetros colocar aproximadamente 10 % de seu volume em massa de solo. No nosso caso, colocamos 25 g da amostra dentro de cada picnômetro de 250 ml.
- Em cada picnômetro, acrescentar água de forma que o solo fique completamente submerso.
- Deixar em repouso por 12 horas.
- Para cada picnômetro transferir a amostra ao dispersor e a dispersar durante aproximadamente 15 minutos.
- Transferir a amostra para o picnômetro, com o auxílio de um funil.
- Retirar do vácuo e completar o volume com água destilada de maneira lenta através das paredes do vidro, de forma que não permita a entrada de ar. O vácuo irá baixar a temperatura da solução.

- Deixar os picnômetros imersos em água (banho-maria) a fim de equilibrar a temperatura. Preencher com água destilada os picnômetros com o auxílio de um conta-gotas.
- Enxugar externamente o picnômetro e pesar cada conjunto (picnômetro+solo+água), determinar a temperatura e a seguir jogar fora a solução solo+água.
- Encher o picnômetro com água e pesar cada conjunto (picnômetro+água), sendo importante que a temperatura de equalização do primeiro conjunto seja igual ao do segundo, no banho-maria.

- Ensaios de Consistência: Limite de Liquidez e de Plasticidade

Os solos finos podem se apresentar em quatro diferentes estados em função do teor de água. Estes quatro estados básicos definidos como sólido, semi-sólido, plástico e líquido representam a consistência do solo. Sendo esta consistência influência do teor de água deste solo.

Estes limites de consistência (ou limites de Atterberg) são fundamentais para a análise do comportamento de solos finos para a engenharia. O estado onde o solo apresenta um comportamento plástico (permitindo ao solo ser moldado) está delimitado pelo limite de liquidez e o limite de plasticidade.

O Limite de Liquidez (LL) marca a transição do estado plástico ao estado líquido, e é definido como sendo o teor de umidade do solo com o qual se unem um centímetro de comprimento os bordos inferiores de uma fissura, feita em uma massa de solo colocada na concha de um aparelho normalizado (aparelho de Casagrande), sob a ação de 25 golpes desse aparelho.

O Limite de Plasticidade (LP) é o teor de umidade em que o solo se rompe quando moldado na forma de um cilindro ao atingir 3 mm de diâmetro, correspondente ao teor de umidade em que o solo passa do estado plástico para o estado semi-sólido. A figura a seguir apresenta o gráfico de Plasticidade de Casagrande relacionando o Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP).

- Limite de Liquidez

Equipamentos do ensaio:

Peneira #40 (0,42mm); Recipiente de metal (utilizado como a cápsula de porcelana) ; Espátula de metal flexível; Garrafa plástica com água destilada ; Aparelho de Casagrande (utilizado aparelho elétrico); Cinzéis; Cápsulas para a determinação de umidade; Estufa (105 a 110°C); Balança com resolução de 0,01g e sensibilidade compatível.

Procedimento do ensaio

- Tomar 100g da amostra preparada de acordo com a NBR 6457/86 [4].
- Colocar a amostra em uma cápsula de porcelana (utilizado um recipiente metálico) e adicionar água destilada em pequenos incrementos amassando e revolvendo o material com uma espátula ate obter uma pasta homogênea de consistência tal que, seja necessário aproximadamente 35 golpes para fechar a ranhura. O tempo de homogeneização deve ficar entre 15 e 30 minutos.
- Transferir parte da mistura para a concha, moldando-a de forma que na parte central a espessura seja de 10 mm aproximadamente. Cuidar para que as bolhas de ar não fiquem no interior da amostra.
- Com o cinzel dividir a massa de solo em duas partes abrindo uma ranhura na parte central.

- Colocar a concha contra a base, deixando-a cair em queda livre, girando a manivela do excêntrico a razão de duas voltas por segundo (neste ensaio foi utilizado o aparelho de Casagrande elétrico, o qual aplica automaticamente os golpes na concha sem que se gire manivela alguma). Anotar o número de golpes necessários para que as bordas inferiores da ranhura se unam ao longo de 13 mm de comprimento.
- Transferir, imediatamente, uma pequena quantidade de material junto às bordas que se uniram para uma cápsula para determinação de umidade.
- Passar o restante da massa para a cápsula de porcelana. Lavar e enxugar a concha e o cinzel.
- Adicionar água destilada a amostra e homogeneizar por 3 minutos.
- Repetir as operações de modo a obter pelo menos mais três pontos de ensaio, cobrindo o intervalo de 15 a 35 golpes (o ensaio foi repetido de forma a se obter 5 valores).

- Limite de Plasticidade

Equipamentos do ensaio:

Peneira #40 (0,42mm); Recipiente de metal; Espátula de metal flexível; Garrafa plástica com água destilada; Cápsulas para a determinação de umidade; Placa de vidro de superfície esmerilhada; Gabarito cilíndrico para comparação, com 3mm de diâmetro e cerca de 100mm de comprimento; Estufa (105 a 110°C); Balança com resolução de 0,01g e sensibilidade compatível.

Procedimento do ensaio:

- Tomar 100g da amostra preparada de acordo com a NBR 6457/86 [4].
- Colocar a amostra no recipiente, adicionar água destilada com pequenos incrementos, amassando e revolvendo, vigorosa e continuamente, com a espátula, de forma a obter uma pasta homogênea, de consistência plástica. O tempo de homogeneização deve estar entre 15 e 30 minutos.
- Tomar cerca de 10g da amostra assim preparada e formar com os dedos uma pequena bola, que deve ser rolada sobre a placa de vidro com pressão suficiente da palma da mão para lhe dar forma de cilindro.
- Se a amostra se fragmentar antes de atingir o diâmetro de 3 mm, retorná-la ao recipiente, adicionar um pouco mais de água destilada, homogeneizar durante pelo menos 3 minutos, amassando e revolvendo vigorosa e continuamente com auxílio da espátula e repetir passo 3.
- Quando a moldagem do cilindro com as dimensões mencionadas for conseguida, estará caracterizado que o solo está no estado plástico. Refazer a esfera e repetir a rolagem até que haja fragmentação do cilindro com dimensões próximas às do gabarito de comparação.
- Transferir imediatamente as partes fragmentadas para uma cápsula para determinação da umidade.

Ensaio de Compactação

Geralmente na prática da engenharia geotécnica, o solo de um determinado local não apresenta as condições requeridas para executar uma determinada obra. Ele pode ser pouco resistente, muito compressível ou apresentar características que deixam inviável o projeto do ponto de vista econômico. Uma das possibilidades é tentar melhorar as propriedades do solo local.

A compactação é um método de estabilização e melhoria do solo através de processo manual ou mecânico, visando reduzir o volume de vazios do solo. A compactação tem em vista estes dois aspectos: aumentar a intimidade de contato entre os grãos e tornar o terreno mais homogêneo melhorando as suas características de resistência, deformabilidade e permeabilidade, para poder viabilizar um projeto de engenharia desde o ponto de vista geotécnico.

A compactação de um solo é a sua densificação por meio de equipamento mecânico, geralmente um rolo compactador, embora, em alguns casos, como em pequenas valetas até soquetes manuais podem ser empregados. Um solo, quando transportado e depositado para a construção de um aterro, fica num estado relativamente fofo e heterogêneo e, portanto, além de pouco resistente e muito deformável, apresenta comportamento diferente de local para local.

A compactação é empregada em diversas obras de engenharia, como: aterros para diversas utilidades, camadas constitutivas dos pavimentos, construção de barragens de terra, preenchimento com terra do espaço atrás de muros de arrimo e reenchimento das inúmeras valetas que se abrem diariamente nas ruas das cidades. Os tipos de obra e de solo disponíveis vão ditar o processo de compactação a ser empregada, a umidade em que o solo deve se encontrar na ocasião e a densidade a ser atingida.

O início da técnica de compactação é creditado ao engenheiro Ralph Proctor, que, em 1933, publicou suas observações sobre a compactação de aterros, mostrando ser a compactação função de quatro variáveis: a) Peso específico seco; b) Umidade; c) Energia de compactação e d) Tipo de solo. O processo de compactação dos solos é de grande importância para as obras de engenharia geotécnica, já que através do processo de compactação consegue-se dar um aumento na resistência do solo e uma diminuição de sua compressibilidade e permeabilidade.

No presente trabalho foi feito o ensaio de compactação tipo Proctor, com reuso do solo, para a obtenção da curva de compactação, massa específica aparente seca, máxima umidade ótima e curva de saturação. Para a realização deste ensaio, foram seguidas as diretrizes da norma NBR 7182/86 [7].

Equipamentos do ensaio:

Cilindro de Proctor pequeno; Soquete pequeno (2500 ±10) g ; Régua de aço biselada com comprimento de 30 cm; Espátulas; Bandejas metálicas; Provetas de vidro com capacidade de 1000 cm³; Extrator de corpo-de-prova; Estufa; Cápsulas para a determinação de umidade ; Balança que permitam pesar 10 kg a 200 g com resolução de 1 g 0,01 g, respectivamente e sensibilidade compatível.

Procedimento do ensaio:

- Preparação da amostra: Toma-se certa quantidade de material seco ao ar e faz-se o destorroamento até que não haja torrões maiores que 4,8mm.
- Peneira-se a amostra na peneira nº 4 (4,8mm) e em seguida determina-se sua umidade higroscópica.
- Adiciona-se água à amostra até se verificar certa consistência. Deve-se atentar para uma perfeita homogeneização da amostra.
- Compacta-se a amostra no molde cilindro em 3 camadas iguais, aplicando-se em cada uma delas 26 golpes distribuídos uniformemente sobre a superfície da camada, com o soquete caindo de 30,5 cm.) A compactação de cada camada deve ser precedida de uma ligeira escarificação da camada subjacente.
- Remove-se o colarinho e aplaina-se a superfície do material à altura do molde e pesa-se o conjunto cilindro + solo úmido compactado + a base do cilindro.

- Retira-se a amostra do molde com o auxílio do extrator (macaco hidráulico), e partindo-a ao meio, coleta-se uma pequena quantidade para a determinação da umidade.
- Faz-se novamente o destorroamento do material compactado até que possa ser passado pela peneira n°4, misturando-se em seguida ao restante da amostra inicial fazendo o reuso do material.
- Adiciona-se água à amostra homogeneizando-a, acrescentando água proporcional da ordem de 2,5% da massa original de solo, em peso. Repete-se o processo pelo menos por mais cinco vezes, até encontrar a diminuição do peso do conjunto molde cilindro, base e solo úmido.

Ensaio de Cisalhamento Direto

A ruptura dos solos é quase sempre um fenômeno de cisalhamento, o que ocorre, por exemplo, quando há o escorregamento de um talude. A resistência ao cisalhamento de um solo pode ser definida como a máxima tensão de cisalhamento que o solo pode suportar sem sofrer a ruptura, ou a tensão cisalhante no plano em que a ruptura estiver ocorrendo. Esta resistência depende do peso, da tensão normal atuante, e do grau de “aspereza” da superfície de contato, ou seja, do atrito entre as partículas do solo. Quanto maior a tensão normal atuante no plano, maior terá que ser a tensão cisalhante para que haja deslocamento do solo. No entanto, a atração química existente entre as partículas, pode provocar uma resistência que independe da tensão normal atuante no plano e que constitui uma coesão real, como se uma cola fosse aplicada aos corpos.

A coesão real deve ser diferenciada da chamada coesão aparente. Esta última constitui uma parcela da resistência ao cisalhamento de solos úmidos não saturados. A coesão correspondente a uma equação de resistência ao cisalhamento indica o coeficiente linear de uma equação de resistência válida para uma faixa de tensões mais elevadas e não para tensão normal nula ou tendendo a zero.

A resistência por atrito entre as partículas do solo é semelhante a um problema de deslizamento de um corpo sobre uma superfície horizontal plana. A resultante da força vertical aplicada, que é transmitida pelo corpo através do peso ou carregamento, com a força horizontal, aplicada para deslocar o corpo, forma um ângulo ϕ com a força vertical, chamado ângulo de atrito. Levando-se em consideração uma superfície horizontal, ou um plano inclinado, o ângulo de atrito pode ser entendido também, como o ângulo máximo que a força transmitida pelo corpo à superfície pode fazer com a normal ao plano de contato sem que ocorra deslizamento.

O ensaio de cisalhamento direto se baseia diretamente no critério de Coulomb, onde uma tensão normal é aplicada num plano e a tensão cisalhante que irá provocar a ruptura é verificada. Ele constitui o mais antigo procedimento para determinação da resistência ao cisalhamento. Através deste ensaio é possível se determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo: coesão efetiva c' e ângulo de atrito interno efetivo Φ' .

O ensaio de cisalhamento direto é executado em uma caixa metálica bipartida, deslizando-se a metade superior do corpo de prova em relação à inferior. O corpo de prova é inicialmente comprimido pela força normal (aplicada a partir do topo da caixa de cisalhamento no corpo de prova), seguindo-se a aplicação da força cisalhante (que move uma metade da caixa em relação a outra). Acima e abaixo do corpo de prova são colocadas pedras porosas, para que a drenagem, estando o CP completo ou parcialmente saturado, possa ocorrer livremente. A força cisalhante impõe um deslocamento horizontal à amostra até a ruptura do corpo de prova que ocorre ao longo do plano. Para

cada tensão normal aplicada, obtém-se um valor de tensão cisalhante de ruptura, permitindo o traçado da envoltória de resistência.

No ensaio de cisalhamento direto a tensão pode ser controlada. Assim, enquanto uma força vertical é aplicada sobre o corpo de prova, a força de cisalhamento é aplicada em incrementos iguais até que o corpo de prova sofra a ruptura, que ocorre ao longo do plano de divisão da caixa, ou seja, uma taxa constante de cisalhamento é aplicada na metade superior da caixa por um motor de engrenagens a uma velocidade determinada por um fator que vai de acordo com a carga aplicada verticalmente.

Equipamentos do ensaio:

- Amostra indeformada do solo para ensaio protegida por papel filme (Figura 4a), amostra no molde (Figura 4b), amostra na caixa de cisalhamento (Figura 4c);



Figura 4a - amostra



Figura 4b - Molde



Figura 4c - Amostra no molde

- Cap de Acrílico (Figura 5a e 5b);

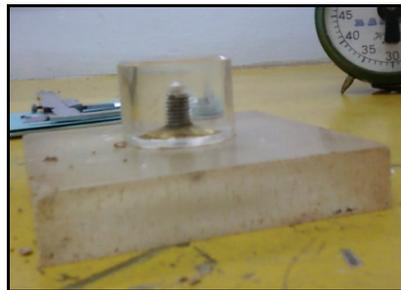


Figura 5a - Detalhe do Cap de acrílico



Figura 5b - Cap acrílico

- Cap de ferro (Figura 6a) e Cap de ferro + esfera pendural (Figura 6b);



Figura 6a - Cap de ferro



Figura 6b - Esfera pendural

- Pedra porosa;
- Papel filtro;
- Placa de cisalhamento;
- Capsulas de alumínio;

- Cronometro;
- Anel de Carga (Figura 7a e 7b);



Figura 7a – Anel de carga (vista superior)



Figura 7b – Anel de carga (vista lateral)

- Sistema de aquisição de dados;
- Equipamento de teste de Cisalhamento Direto (Figuras 8 e 9)

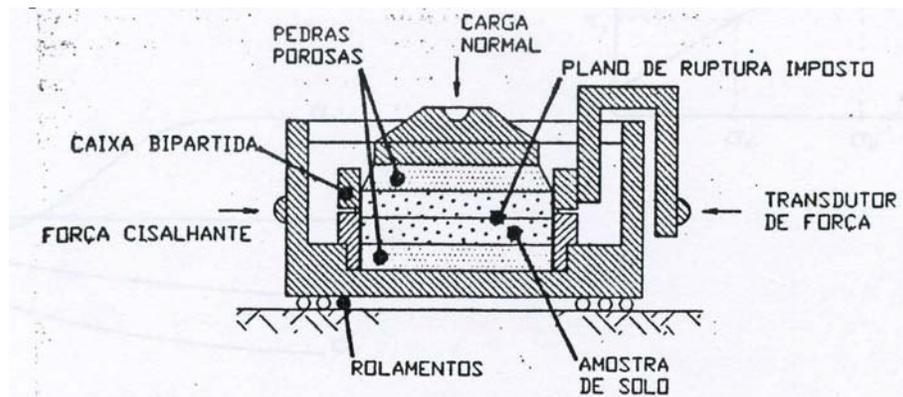


Figura 8 - Detalhe da caixa metálica bipartida.

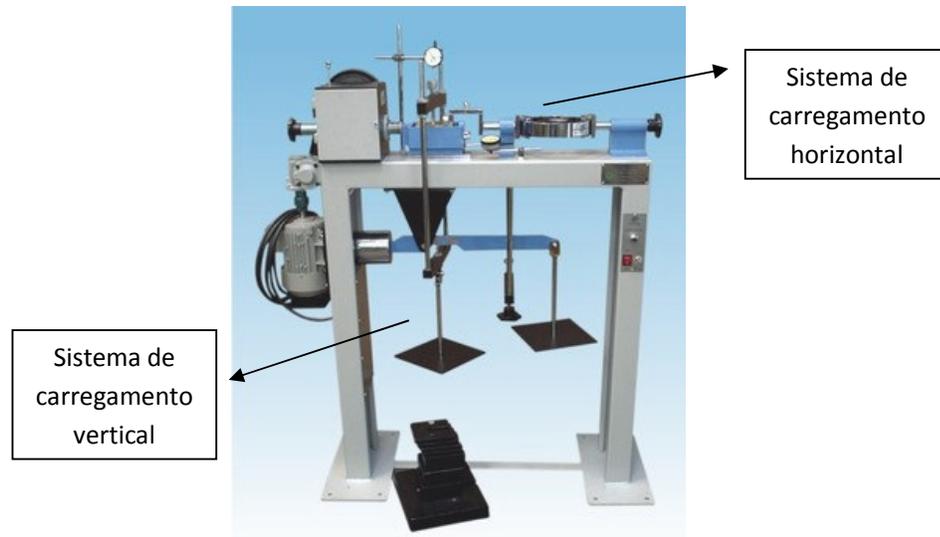


Figura 9 - Equipamento de ensaio de cisalhamento direto.

Procedimento de ensaio:

- O corpo de prova é colocado em uma caixa de cisalhamento metálica, que é dividida horizontalmente em duas metades, e a força normal é aplicada a partir do topo da caixa de cisalhamento no corpo de prova. Para o presente ensaio, o CP foi moldado tendo 25 mm de espessura.
- A força de cisalhamento é aplicada movendo-se uma metade da caixa em relação à outra para provocar a ruptura. Acima e abaixo do corpo de prova são colocadas pedras porosas, para que a drenagem, estando o CP completo ou parcialmente saturado, possa ocorrer livremente.
- Durante o ensaio a tensão pode ser controlada. Assim, enquanto uma força vertical é aplicada sobre o corpo de prova, a força de cisalhamento é aplicada em incrementos iguais até que o corpo de prova sofra a ruptura, que ocorre ao longo do plano de divisão da caixa, ou seja, uma taxa constante de cisalhamento é aplicada na metade superior da caixa por um motor de engrenagens a uma velocidade determinada por um fator que vai de acordo com a carga aplicada verticalmente. Essa taxa, isto é, o deslocamento horizontal da metade superior da caixa, é medido pelo extensômetro horizontal. As variações da altura do corpo de prova, ou seja, as variações do volume do mesmo ao longo do ensaio são obtidas pelas através das leituras no extensômetro vertical.

Mesmo sabendo-se que o cisalhamento ocorre num plano preferencial, o horizontal, ele pode ser precedido de rupturas internas em outras direções, o que se constitui numa das limitações do ensaio. Os ensaios de cisalhamento direto são repetidos em corpos de prova similares, com diferentes tensões normais sendo aplicadas. Através do gráfico da Tensão Cisalhante Máxima, que indica o momento da ruptura, versus Tensão Normal, podem-se determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo.

Foram realizados 4 ensaios de cisalhamento direto no Laboratório de Geotecnia da PUC-Rio, 2 utilizando solo puro (nas tensões de 50 e 200 kPa) e outros 2 (nas mesmas tensões) utilizando a mistura solo com a adição de 30% de borracha moída de pneu (porcentagem esta em relação ao peso do solo seco). Os ensaios foram realizados em conformidade com o método de ensaio ASTM D 3080 padrão.

Resultados

A seguir são apresentados os resultados e as análises dos ensaios descritos anteriormente, para amostras de solo e solo-borracha.

A Figura 10 apresenta as curvas granulométricas referentes ao solo e à mistura de solo com a inserção de 30% de borracha moída de pneu (porcentagem esta calculada em relação ao peso do solo seco).

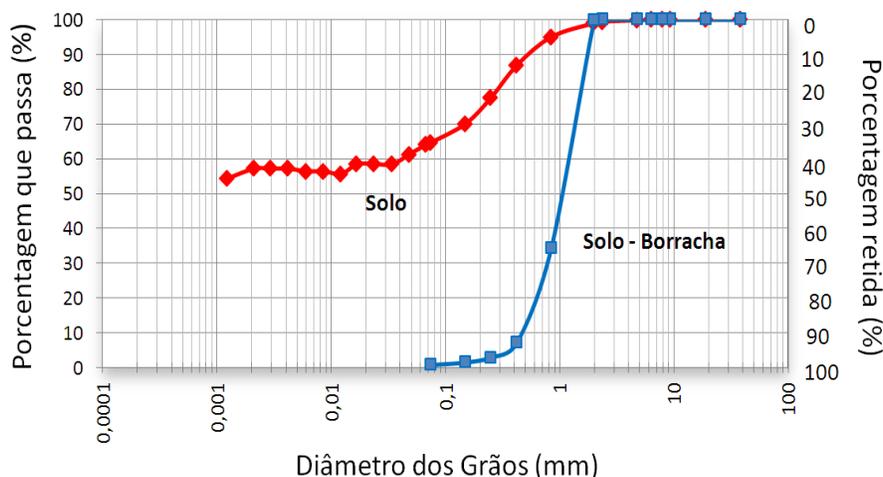


Figura 10 - Curvas granulométricas

A classificação dos solos, segundo o sistema internacional padronizado, dada a curva de distribuição granulométrica, descreve o seguinte critério:

- Frações do solo cujas partículas têm diâmetro entre 76 e 4,8 mm são de pedregulho.
- Frações do solo cujas partículas têm diâmetro entre 4,8 e 0,05 mm são de areia.
- Frações do solo cujas partículas têm diâmetro entre 0,05 e 0,005 mm são de silte.
- Frações do solo cujas partículas têm diâmetro inferior a 0,005 mm são de argila.

Analisando as curvas apresentadas, e utilizando o critério acima mencionado, pode-se concluir que o solo ensaiado é uma argila silto arenosa. Com a inserção da borracha de pneu moída, observa-se um aumento da fração classificada como areia, podendo-se classificar a mistura como referente à um solo arenoso. A Tabela 1 apresenta as porcentagens de cada fração na composição do solo puro e do solo-borracha.

Tabela 1 – Resultados das análises granulométricas

Amostra	Argila (%)	Silte (%)	Areia			Pedregulho (%)
			Fina (%)	Media (%)	Grossa (%)	
Solo	56,8	6,2	10,8	16,5	8,6	1
Solo - Borracha	0	0	2,2	16,5	81,1	0,2

Através do ensaio para determinação da densidade real dos grãos, foi obtido um valor igual a 2,47 para o solo puro e 2,04 para a mistura solo-borracha, através dos quais observa-se uma diminuição do G_s com a inserção da borracha. O solo possui peso específico seco igual a 13,24 kN/m³.

Os resultados do Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade do solo puro, podem ser observados na Figura 11 e Tabela 2, respectivamente.

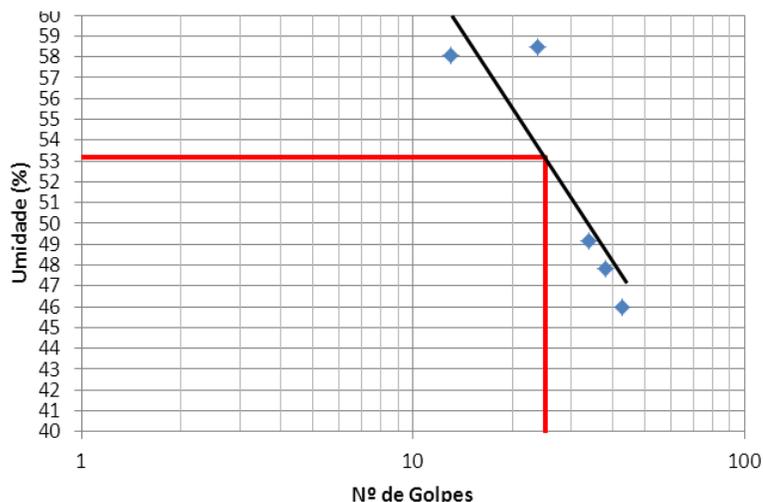


Figura 11 – Gráfico de determinação do Limite de Liquidez.

Tabela 2 – Tabela de Limite de Plasticidade.

Limite de Plasticidade				
Capsula nº	37	132	127	86
Peso da Capsula (9g)	11,08	11,39	10,81	10,1
Peso da Capsula+solo+água (g)	13,54	14,2	12,96	12,88
Peso da Capsula+solo seco (g)	12,86	13,4	12,4	12,1
Peso da água (g)	0,68	0,8	0,56	0,78
Peso do solo (g)	1,78	2,01	1,59	2
Umidade (%)	38,2	39,8	35,22	39
Umidade Média (%)	39			

Dos ensaios de Limites de consistência tem-se que o teor de umidade correspondente a 25 golpes é de aproximadamente 53,15, desta forma o Limite de Liquidez do solo é igual a 53. O Limite de Plasticidade é 39. O Índice de Plasticidade (IP) exprime o grau de argilosidade do solo fino e está relacionado aos Limites de Liquidez e de Plasticidade. $[IP = LL - LP = 53 - 39 = 14]$

O Índice de Consistência (IC) é a relação entre a diferença do Limite de Liquidez e a Umidade Natural pelo Índice de Plasticidade. Esse índice trata da classificação do solo quanto à consistência dos solos finos, que podem ser subdivididos em muito moles, moles, médias, rijas e duras. Tem-se que: $IC = (LL - w_{nat}) / IP = (53 - 1,1) / 14 = 3,71$. De acordo com os cálculos realizados nas seções anteriores, obtivemos os seguintes valores: $LL = 53$; $LP = 39$; $IP = 14$ e $IC = 3,71$. O que significa dizer que o solo analisado, segundo os Limites de Liquidez e Plasticidade, pode ser classificado como uma Caulinita.

Seguindo o critério de Jenkins, conforme a tabela a seguir, e considerando o Índice de Plasticidade $IP = 14$, pode-se concluir que o solo aqui analisado é medianamente plástico. Em relação ao Índice de Consistência, aplicando o valor de $IC =$

3,71 ao critério de classificação apresentado na NBR 6502, pode-se dizer que o solo analisado é duro.

O Limite de Plasticidade do solo reforçado com 30% de borracha moída de pneu foi de 26,41%. Não foi possível obter o limite de liquidez, pois o solo com a borracha fica mais granular.

A Figura 12 apresenta as curvas de compactação obtidas para o solo puro e para o solo reforçado com 30% de borracha. Observa-se que a inserção da borracha diminui tanto o peso específico aparente seco máximo do material, como também a sua umidade ótima, sendo este um bom resultado, onde em campo será necessária menos energia mobilizada para se alcançar os parâmetros ótimos.

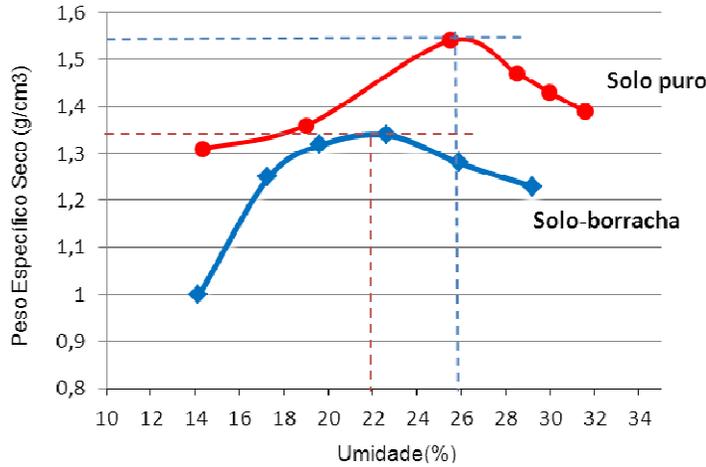


Figura 12 - Curvas de compactação

Dos ensaios de cisalhamento direto, através dos valores da variação do deslocamento horizontal, e das tensões cisalhantes, foi possível plotar o gráfico de tensões de cisalhamento (em kPa) versus deslocamento acumulado (em milímetros) para cada estágio do cisalhamento, como mostra a Figura 13.

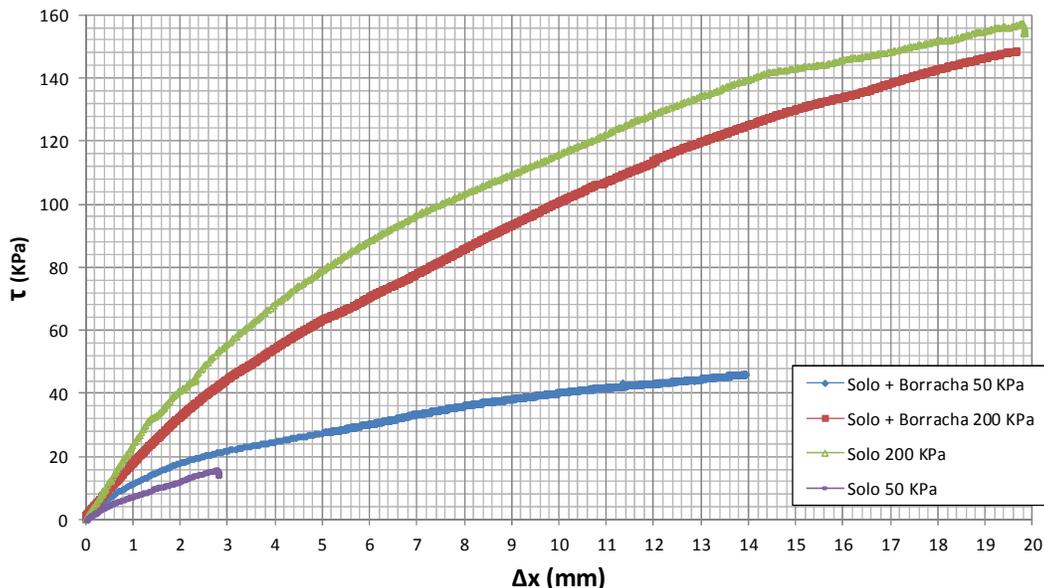


Figura 13 - Curvas tensão-deslocamento horizontal

A representação da tensão cisalhante em função do deslocamento, no sentido do deslocamento, nos permite identificar a tensão de ruptura e a tensão residual, que o corpo de prova ainda sustenta depois de ultrapassada a situação de ruptura.

Nota-se que as curvas tensão-deslocamento referentes ao solo reforçado com a borracha não apresentam uma ruptura, o que demonstram que o reforço ainda está atuante na superfície de cisalhamento. Por este motivo recomenda-se a execução de ensaios triaxiais em uma próxima pesquisa, com a possibilidade de se obter os parâmetros resistentes a deformações superiores e sem impor uma superfície de ruptura ao material estudado.

A tensão cisalhante, no plano de ruptura, no instante da ruptura, nos dá a resistência ao cisalhamento do solo. Através dos valores da tensão cisalhante máxima encontrados, e das tensões normais aplicadas em cada ensaio, para cada corpo de prova, obtém-se o gráfico da Figura 14, que representa a envoltória de ruptura e nos permite determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo.

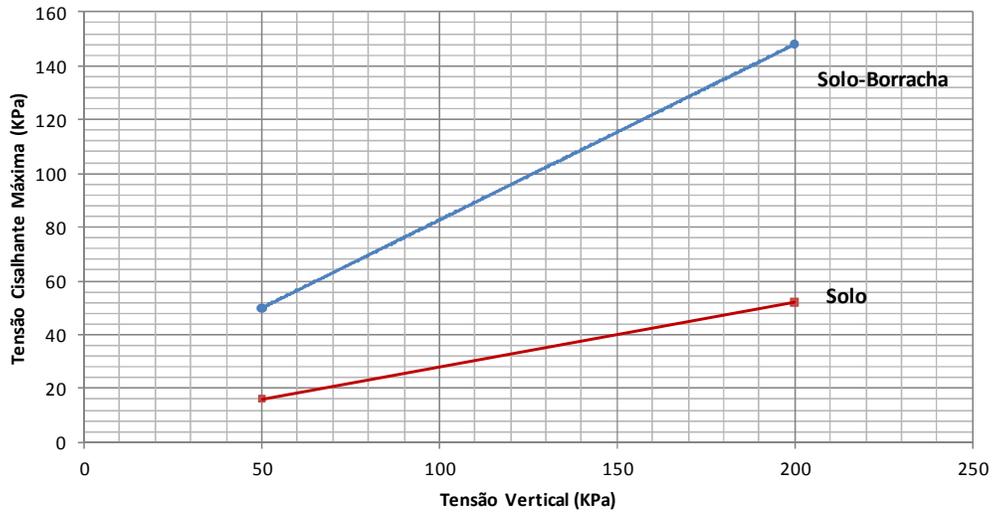


Figura 14 - Envoltórias de ruptura

Pode-se presumir que as relações são lineares, e então a envoltória de tensão máxima nos dá o ângulo de resistência ao cisalhamento Φ (em graus), e a interceptação da reta com o eixo das ordenadas nos dá a coesão aparente C (em kPa). Os valores obtidos para os parâmetros de resistência se encontram na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros de resistência

Solo	Solo-Borracha
$c = 4 \text{ kPa}$	$c = 17 \text{ kPa}$
$\Phi' = 13,5^\circ$	$\Phi' = 33,1^\circ$

Onde:

C = valor obtido através da interceptação da reta no eixo das ordenadas

$\Phi' = \tan^{-1}(\tau / \sigma)$ --- (inclinação da reta)

A inserção da borracha moída de pneu ao solo nitidamente melhora os parâmetros de resistência deste em mais de 130%, o que comprova que este resíduo pode ser utilizado

como reforço de solos em obras geotécnicas, como por exemplo, em camadas de aterro sanitário, fundações rasas, taludes e aterros sobre solos moles.

Conclusão

Pode-se concluir que a borracha influencia na composição da mistura, com características próprias que melhoram as propriedades mecânicas desse novo material. A adição da borracha moída tem o efeito de reduzir a massa específica seca aparente e a umidade ótima, devido à menor densidade real dos grãos da borracha quando comparado às partículas do solo. A mistura requer menor energia de compactação, sendo assim um material de melhor comportamento em obras geotécnicas.

Através da realização dos ensaios de cisalhamento direto foram obtidos resultados satisfatórios que comprovam a melhora dos parâmetros de resistência do solo, sendo este material compósito considerado adequado para utilização em obras geotécnicas, dentro do ponto de vista ambiental e econômico, proporcionando um fim mais nobre para este material inservível.

Referências

- 1 - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 6270:** Standard practice for use of scrap tires in civil engineering applications. West Conshohocken, Pa. 2008.
- 2 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:** Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.
- 3 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459:** Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.
- 4 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:** Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.
- 5 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180:** Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.
- 6 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508:** Grãos de Solo que passam na Peneira 4,8mm – Determinação da Massa específica. Rio de Janeiro, 1984.
- 7 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182:** Solo – Ensaio de Compactação, 1986.
- 8 - CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 258, de 26 de Agosto de 1999. Ministério do Meio Ambiente, Governo Federal, Brasil. 1999.
- 9 - MORILHA JR., A.; GRECA, M. R. Considerações Relacionadas ao Asfalto Ecológico – Ecoflex. IEP, Apostila sobre Asfalto Borracha, Instituto de Engenharia do Paraná. 2003.
- 10 - IPT/CEMPRE. Lixo Municipal: Manual de gerenciamento integrado. São Paulo: CEMPRE, 2008.
- 11 - LUND, H. F. The McGraw-Hill Recycling Handbook. New York: McGraw-Hill, 1993.