UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

CHRISTIE FROZI FLECK

UTILIZAÇÃO DE EMULSÃO ASFÁLTICA EM UM SOLO DE CAXIAS DO SUL/RS PARA FINS DE ESTABILIZAÇÃO E USO EM SUBLEITO DE PAVIMENTOS

Caxias do Sul
2019

CHRISTIE FROZI FLECK

UTILIZAÇÃO DE EMULSÃO ASFÁLTICA EM UM SOLO DE CAXIAS DO SUL/RS PARA FINS DE ESTABILIZAÇÃO E USO EM SUBLEITO DE PAVIMENTOS

Trabalho entregue como parte dos requisitos para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, da Universidade de Caxias do Sul – RS.

Orientadora: Prof. Jaqueline Bonatto, Msc.

Caxias do Sul
2019

“Aos meus pais, Liselane e José, aos meus irmãos Karen, Helen e Carlos Germano e aos demais familiares, em especial à minha madrinha, Ideliane, que foram grandes incentivadores do estudo e da qualificação pessoal e que sempre acreditaram em mim.”

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família que sempre esteve presente, me apoiando e me incentivando com muito amor e carinho nas horas mais difíceis.

Aos meus pais, pela vida a mim dada; a eles e aos meus irmãos, obrigada pela amizade e por todo aquilo que vivemos juntos durante todos os anos de convivência diária.

À minha orientadora, professora Jaqueline Bonatto, pelo acompanhamento, dedicação na orientação deste trabalho, amizade e ensinamentos transmitidos.

Ao professor Matheus Lemos Nogueira obrigada pelos conhecimentos transmitidos relacionados a pavimentos e materiais betuminosos, à colaboração nos ensaios e a disposição.

A todos que formam parte do laboratório de Solos e Pavimentação, professores, alunos, técnicos, administrativos e de limpeza, obrigada pela acolhida, a boa vontade, a grande ajuda, os conselhos, a força, os papos, a amizade, a confiança.

Ao curso e aos professores de Engenharia Civil, da UCS, pelo apoio recebido.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

José de Alencar

RESUMO

Devido à grande abundancia de solo no planeta, e a sua relativamente fácil extração, além da importância para a estabilização das edificações, visto que suporta suas fundações, esse tornou-se um material de grande importância na construção civil e em obras de pavimentação. Para garantir a estabilidade, aderência, compactação e resistência desejados, ele deve apresentar propriedades físicas e químicas que muitas vezes não são encontradas em sua condição natural. Para tanto, solos em condições não satisfatórias podem ser submetidos às técnicas de estabilização e melhoramento, afim de atingir as propriedades mecânicas desejadas. Desta maneira, as técnicas de melhoramento de solo se mostram de suma importância para preparar o solo para as obras de engenharia e proporcionar maior segurança e menores custos. O presente trabalho propôs um método de melhoramento de solo para o uso na pavimentação utilizando material betuminoso. Como experimentação, foram realizados ensaios de caracterização, compactação e compressão simples com amostras de solo coletadas no município de Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, com adição de ligante asfáltico de ruptura rápida. Com a realização dos ensaios de caracterização mecânica da mistura foi possível concluir que, ao adicionar uma emulsão asfáltica, concomitantemente a um tempo de cura de sete dias, a resistência do corpo de prova se elevou em sete vezes a resistência do solo puro.

Palavras-chave: Melhoramento de solos. Estabilização química. Solo-emulsão. Emulsão asfáltica.

ABSTRACT

Due to the great abundance of soil on the planet, and its relatively easy extraction, this has become a material of great importance in construction and paving works. In order to guarantee the desired stability, grip, compaction and strength, the soil must have certain physical and chemical properties that are often not reached with the soil in its field condition. Therefore, soils under unsatisfactory conditions can be subjected to stabilization and improvement techniques in order to achieve the expected mechanical properties. In this way, soil improvement techniques are of paramount importance to prepare the soil for engineering works and provide greater safety and lower costs. The present work proposed a technique of soil improvement for the use in the pavement, using bituminous material. As experimentation, characterization, compaction and simple compression tests will be performed with soil samples collected in the city of Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, with addition of quick break asphalt emulsion. With the realization of the mechanical characterization tests of the mixture it was possible to conclude that adding an asphalt emulsion, concomitantly to a curing time of seven days, the strength of specimen increased seven times in relation to resistance of the pure soil.

Keywords: Soil improvement. Chemical stabilization. Soil-emulsion. Asphalt emulsion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Distribuição do filme betuminoso na massa de solo. 15
Figura 2 - Camadas de um pavimento e tensões solicitantes. 19
Figura 3 - Seção longitudinal típica de um pavimento de concreto simples. 21
Figura 4 - Dimensões das partículas. 23
Figura 5 - Instalações de fábrica de produção asfáltica. 26
Figura 6 - Execução do destorroamento de um solo. 30
Figura 7 - Conjunto de peneiras granulométricas e agitador. 31
Figura 8 - Estados característicos de consistência dos solos finos e os limites de Atterberg. 32
Figura 9 - Ensaio de limite de liquidez. 32
Figura 10 - Ensaio de limite de plasticidade. 34
Figura 11 - Determinação do peso específico de um solo. 35
Figura 12 - Modelo de Curva de Compactação Proctor Normal 37
Figura 13- Equipamento para ensaio de compactação. 37
Figura 14 - Máquina para compressão simples. 39
Figura 15 - Curva Granulométrica do Solo 45
Figura 16 - Solo Utilizado Para Ensaio 46
Figura 17 - Utilização do Aparelho de Casagrande 47
Figura 18 - Curva de Limite de Liquidez 48
Figura 19 - Aparência dos CPs de solo 51
Figura 20 - Curva de Compactação do solo 51
Figura 21 - CPs de solo puro 52
Figura 22 - Curva média de compactação para solo puro 53
Figura 26 - Aparência dos CPs com emulsão antes e depois dos sete dias de cura 54
Figura 24 - Média dos CPs de solo com 2% emulsão 54
Figura 25 - Média dos CPs de solo com 4% emulsão 55
Figura 26- Tensão x Deformação 56
Figura 27 - Tensões Máximas 56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos dos solos para estabilização solo-emulsão. 23
Tabela 2 - Resultados dos ensaios de caracterização com os solos presentes na área 28
Tabela 3 - Caracterização da emulsão RR-1C 29
Tabela 4 - Parâmetros de dosagem de solo-emulsão 40
Tabela 5 - Resultado das Amostras para Umidade Natural do Solo 44
Tabela 6 - Análise granulométrica do solo 45
Tabela 7 - Análise do solo em estudo 46
Tabela 8 - Amostras para Limite de Plasticidade. 48
Tabela 9 - Peso Específico do Solo 50
Tabela 10 - Resultados do Ensaio de Compactação 51

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADP	Asfalto Diluído do Petróleo
ASTM	American Society for Testing and Material
ATECEL	Associação Técnico-Científica Ernesto Luiz de Oliveira Junior
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CL	Argila de baixa compressibilidade
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Coordenação de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da UFRJ
CP	Corpo de prova
DAER	Departamento Autônomo de Estradas e Rodagem
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte
EA	Emulsão Asfáltica
HRB	Highway Research Board
IC	Índice de Consistência
IG	Índice de Grupo
IP	Índice de Plasticidade
ISC/CBR	Índice de Suporte Califórnia/California Bearing Ratio
kPa	Quilopascal
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MCT	Miniatura Compactada Tropical
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura em Milímetro
MP	Manual de Pavimentação do DNER
MPa	Megapascal
MR	Módulo de Resiliência
NBR	Norma Brasileira Registrada
PEASM	Peso Específico Aparente Seco Máximo
pH	Potencial Hidrogeniônico
RCS	Resistência à Compressão Simples
RL	Ruptura Lenta

RL-1C	Emulsão Catiônica de Ruptura Lenta
RM	Ruptura Média
RM-1C	Emulsão Catiônica de Ruptura Média
RM-2C	Emulsão Catiônica de Ruptura Média
RR	Ruptura Rápida
RR-1C	Emulsão Catiônica de Ruptura Rápida
RR-2C	Emulsão Catiônica de Ruptura Rápida
RTI/RTCD	Resistência à Tração Indireta/Resistência à Tração por Compressão Diametral
SC	Areia argilosa
Sf	Grau de saturação final
Si	Grau de saturação inicial
SM	Areia siltosa
T_{otim}	Teor ótimo de emulsão
TRB	Transportation Research Board
TSS	Tratamento Superficial Simples
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
UFS	Universidade Federal de Sergipe
USCS	Unified Sistem Classification of Soils
WL	Limite de Liquidez
wot (%)	Umidade ótima
WP	Limite de Plasticidade
$\gamma dmax$	Peso Específico Aparente Seco Máximo
γg	Peso Específico dos Grãos do Solo
εp	Deformação permanente ou plástica
εr	Deformação resiliente
$\sigma 1$	Tensão principal maior
$\sigma 3$	Tensão principal menor ou tensão de confinamento
σd	Tensão desvio atuante

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 8

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 10

2.1 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS 10

2.2 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA 10

2.2.1 Solo-betume 11

2.2.2 Solo-cal 12

2.2.3 Solo-cimento 13

2.2.4 Solo-emulsão 14

2.3 ESTABILIZAÇÃO MECÂNICA 17

2.4 HISTÓRICO DA PAVIMENTAÇÃO 18

2.5 ESTRUTURA DO PAVIMENTO 19

2.5.1 Revestimento 20

2.5.2 Bases e sub-base 20

2.5.3 Subleito 21

2.6 SOLO PARA PAVIMENTAÇÃO 22

3 EMULSÃO ASFÁLTICA 25

3.1 TIPOS DE EMULSÃO 26

4. MATERIAIS E MÉTODOS 28

4.1 MATERIAIS 28

4.1.1 Solo 28

4.1.2 Emulsão Asfáltica 28

4.2 MÉTODO 29

4.2.1 Umidade Natural do Solo (w) 29

4.2.2 Peneiramento 30

4.2.3 Limites de Consistência 31

4.2.4 Limite de Liquidez 32

4.2.5 Limite de Plasticidade 33

4.2.6 Índice de Consistência 34

4.2.7 Índice de Plasticidade 35

4.2.8 Peso Específico do Solo (γ_s) 35

4.3 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS 36

4.3.1 Ensaio Proctor Normal 36

4.3.2 Ensaio de Compressão Simples 38

4.4 DOSAGEM DA MISTURA SOLO-EMULSÃO 40

4.5 AVALIAÇÃO MECÂNICA DA MISTURA 42
5 RESULTADOS 44
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO 44
5.1.1 Umidade Natural do Solo 44
5.1.2 Peneiramento 45
5.1.3 Limite de Liquidez 46
5.1.4 Limite de Plasticidade 48
5.1.5 Índice de Consistência 49
5.1.6 Índice de Plasticidade 49
5.1.7 Peso Específico do Solo 50
5.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA 50
5.2.1 Ensaio de Compactação Proctor Normal 50
5.2.2 Ensaio de Compressão Simples 52
6 CONCLUSÕES 58
REFERÊNCIAS 59

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma das mais extensas malhas rodoviárias do mundo, contudo, apenas uma pequena porcentagem desta é pavimentada - cerca de 10%. Esse modal é responsável pelo transporte de, aproximadamente, 90% dos passageiros e mais de 60% das cargas que transitam pelo território nacional e, por esse motivo, a qualidade e durabilidade dos pavimentos asfálticos utilizados para esse modal é imprescindível para garantir a segurança, agilidade e conforto no tráfego (CNT, 2018).

Além disso, em uma pesquisa realizada em 2007, na qual participaram 87.572 Km de rodovias de todo país, mostrou que 54,5% da malha rodoviária pesquisada apresentou-se com o pavimento em estado regular, ruim ou péssimo, totalizando 47.777 km. Esses dados demonstram que uma grande parcela das rodovias brasileiras se encontra em um elevado grau de deficiência, gerada pela degradação do pavimento no decorrer do tempo, de acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2007 e 2018).

Devido a importância dos pavimentos e a constante preocupação em prolongar sua vida útil, surge a necessidade de estudar materiais asfálticos eficientes que sejam capazes de suportar os esforços provenientes do tráfego veicular e da variação térmica associada ao clima de cada região. Além disso, um mal dimensionamento e a utilização de materiais inapropriados podem ocasionar graves problemas estruturais futuros, como deformação e afundamento do pavimento (DNIT, 2006).

A qualidade do subleito, camada cujo material estabilizado irá fazer parte, determina diretamente a espessura da camada de asfalto, visto que quanto melhor ela for, menor a necessidade de grandes espessuras para o pavimento (ROSSI, 2017). Sendo o subleito uma camada tão importante, responsável pela dissipação das tensões, o estudo da viabilidade dos solos naturais com adição de outros materiais convencionais ou alternativos (betume, cal, cimento, emulsão asfáltica) torna-se imprescindível, visto que com base nele é possível garantir uma melhor eficiência técnica, além de buscar deixar seu emprego economicamente vantajoso em obras rodoviárias, por meio da melhoria de suas propriedades mecânicas e hidráulicas (SHERWOOD, 1961; apud SANTOS, 2009).

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a viabilidade técnica da adição de emulsão asfáltica, afim de propiciar a estabilização de um solo de Caxias do Sul/RS.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Tem-se como objetivos específicos:

a) realizar caracterização física do solo;
b) avaliar o comportamento mecânico do solo, por meio do ensaio de compactação;
c) determinar dosagem da mistura solo-emulsão;
d) avaliar o comportamento mecânico da mistura solo-emulsão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Para Palmeira (1990), a definição de estabilização ou reforço de um solo é a de utilizar um meio físico e/ou químico com a intensão de melhorar as suas condições mecânicas. Quando se refere a reforço, o autor entende que está diretamente associado a inclusões no interior da massa do solo, enquanto que a estabilização seria a técnica de melhorar as características dessa massa modificando sua própria estrutura. Contudo é de se destacar que ambas as técnicas têm o mesmo objetivo – proporcionar melhorias no comportamento dos solos.

De acordo com Gorki (2010), as alterações das propriedades de um solo podem ser de origem química, física e biológica. Além disso, segundo Medina e Motta (2005), a estabilização deste material é um tratamento que visa melhorar sua resistência ao cisalhamento, diminuir a compressibilidade e aumentar ou diminuir a permeabilidade.

O melhoramento e a estabilização de solos são métodos utilizados em bases e sub-bases para aterros, pavimentos, fundações e taludes (CONSOLI, 2011). Contudo, segundo Nuñez (1991), o tipo de estabilização escolhida para determinado projeto depende tanto da natureza da estrutura quanto das propriedades geotécnicas e físico-químicas do solo envolvido.

Com relação aos tipos de estabilização, Cristelo (2001) disserta que frequentemente eles são classificados em três grupos: estabilização mecânica - na qual se procura o melhoramento das características do material por meio da organização das suas partículas e/ou recorrendo a correções da sua composição granulométrica; estabilização física - onde se utilizam de fontes de calor ou eletricidade para alterar as propriedades do solo e estabilização química, que modificam irreversivelmente suas propriedades, utilizando de aditivos químicos.

2.2 ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA

O que influencia na escolha do tipo de estabilização são quais propriedades se deseja corrigir e para que fim será utilizado o solo (GONDIM, 2008; MICELI JÚNIOR, 2006). Guimarães (2002) retrata que a preferência pelo método de estabilização, seja mecânica, química ou física, é sugestionada por uma sucessão de razões, dentre estas estão: a finalidade da obra, as econômicas, as propriedades dos materiais e do solo que devem ser corrigidas.

Conforme Medina e Motta (2005), para estabilizar quimicamente um solo é necessário a adição de um ou mais agentes químicos - agente estabilizador - que, ao reagirem com as partículas de solo ou solidificarem, as aglomeram, fecham os poros ou deixam o solo hidrofóbico. Ao utilizar a cal, o efeito mais importante é o químico, enquanto que para o cimento Portland e a emulsão asfáltica ocorrem tanto efeito físico quanto químico. Para McCarthy (1977); apud Pereira (2005), a estabilização química refere-se ao procedimento no qual um material cimentante, ou qualquer material químico, é adicionado ao solo natural para melhorar uma ou mais de suas propriedades.

O agente químico também modifica as relações solo-água, principalmente nos solos argilosos. Ocorre que as partículas de argila de dimensões coloidais apresentam carga elétrica superficial predominante negativa que atrai os cátions adsorvidos hidratados. Isso pode ser alterado conforme se queira quando se introduz os elementos químicos, aumentando ou diminuindo a concentração de eletrólitos na água, por exemplo. A agregação é o fenômeno físico-químico mais importante para a estabilização de solos, visto que transforma a dupla camada de argilominerais (MEDINA e MOTTA, 2005).

2.2.1 Solo-betume

Segundo Lima et al. (1993), ao que se refere à caracterização das misturas solo-betume, três categorias são usualmente adotadas: pedregulho arenoso-betume, areia-betume e solo-betume.

Solo-betume envolve as combinações de materiais betuminosos e solos argilo-siltosos e argilo-arenosos. No caso do solo-betume, o solo já contém forças coesivas e o anseio é de assegurar a estabilidade do teor de umidade do conjunto, após a compactação. Essa constância garante um desempenho hidrofóbico, realizado tanto pela obstrução dos vazios do solo – meio pelo qual poderia ocorrer a ação capilar da água - como pela formação de películas hidrorrepelentes, envelopando agregados de partículas finas e impossibilitando que a água exterior transponha a mistura (LIMA et al., 1993).

Além disso, segundo Cristelo (2011), por via de regra, as misturas solo-betume apresentam teor ótimo de ligante, o que contribuí para um melhor comportamento mecânico do material estabilizado. O teor pode ser estabelecido variando a relação teor de ligante/ peso seco do material e tomando como padrão ou propriedade de seleção do teor ótimo a compressibilidade, a resistência mecânica e a permeabilidade.

Os finos (% < 0,075 mm) dos solos que se utilizam deste tipo de estabilização, em princípio, enquadram-se na faixa de 10% a 50%, sendo que o limite de liquidez deve ser menor que 40% e o índice de plasticidade deve ser inferior a 18% (RICO e DEL CASTILLO, 1977, apud PEREIRA, 2005).

2.2.2 Solo-cal

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2003), a mistura solo-cal contém, como o nome sugere, a mistura de solo com cal. O uso da cal se dá devido a sua característica aglomerante, porém para a estabilização é comumente utilizada a cal hidratada, que é o pó obtido da hidratação da cal virgem, acrescido de uma combinação de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio podendo, ainda, ter a adição de óxido de magnésio.

Destarte, o solo-cal é resultado de uma estabilização físico-química que visa a melhora permanente das propriedades do solo, elevando sua hidrofobia e sua eficiência de suporte. Pode-se identificar algumas reações que se tornam mais importantes para essa estabilização, são elas: floculação e aglomeração, troca de íons, reação pozolânica ou cimentante e carbonatação (BAPTISTA,1976; apud ARRIVABENE, 2017).

Assistindo aos mesmos fins da combinação com cimento, a estabilização físico-química finda tanto a redução da expansão e a trabalhabilidade, quanto o enrijecimento. Quando aplicado a solos siltes caulínicos e solos argilosos, preferencialmente, o solo-cal age principalmente como reforço de subleito ou sub-base (BERNUCCI *et al.,*2006).

Contudo, é de salientar que Sherwood (1962), apud Pereira (2005) observou em suas pesquisas que a progressiva degradação do solo pode se dar devido à presença de sulfatos, principalmente quando fração argilosa se sobressai e a umidade for elevada para valores superiores ao utilizado na sua compactação. Isso ocorre, pois, ao ter seu pH elevado, a mistura sofre uma reação entre a argila e os íons de sulfato na presença de cal e da água em excesso. Se isso ocorrer, pode haver formação de sulfo-aluminato de cálcio, que por possuir um volume consideravelmente maior leva a expansão do mineral, destruindo as ligações existentes no solo estabilizado.

Lovato (2004) realizou ensaios em um solo residual de basalto, pertencente à Formação Serra Geral, pedologicamente classificado como latossolo vermelho aluminoférrico e classificado como A-6 pela AASHTO. No estudo, o solo foi misturado a dois tipos de cales, a dolomítica hidratada e a cálcica hidratada e foi possível observar que para a primeira os valores

de peso específico aparente seco máximo foram um pouco maiores do que para a segunda. Contudo a umidade ótima de compactação foi sensivelmente maior nas misturas de cal cálcica.

Já Santos (2004) adicionou cal a um solo de características típicas da região do Distrito Federal, enquadrando-se como um silte de alta plasticidade (MH) no Sistema Unificado. Com isso, ele pode observar que a adição de cal fez com que a curva de compactação se deslocasse para a direita (aumento da umidade ótima) e para baixo (redução da massa específica aparente seca máxima) com o aumento da quantidade de cal até o limite de 6% determinado pelos métodos de dosagem utilizados. Além disso, as curvas de resistência à compressão em relação ao tempo de cura para as amostras ensaiadas (com ou sem imersão prévia) mostraram um rápido ganho de resistência no período inicial até atingirem um ponto de inflexão, em torno de 10 dias (dependendo do teor de cal), após o qual resistência continua crescendo, porém mais lentamente.

2.2.3 Solo-cimento

Solo-cimento, como o próprio nome preconiza, trata-se da mescla de solo pulverizado finamente com água e cimento (acima de 5% em massa) visando o enrijecimento, ou seja, quando objetiva-se somente a melhoria da trabalhabilidade e um pequeno aumento da capacidade de suporte. O cimento mais usual é o Portland comum, contudo, pode-se utilizar, eventualmente, cimento Portland de Alto-forno e cimento Portland Pozolânico (SENÇO, 2001).

Segundo Cristelo (2011), o porcentual de cimento a ser agregado ao solo costuma variar entre 7 a 15% nas areias, entre os 5 a 7% nos siltes e é em torno de 4% no cascalho. O composto obtido dessa forma é aplicado e compactado, permanecendo em média durante 07 dias hidratando em condições adequadas de umidade, verificando-se o seu enrijecimento progressivo.

Contudo, para Bernucci *et al.* (2006), a faixa exequível para que um solo seja estabilizado com cimento é de 5 a 9% em massa. Salientando, inclusive, que se a taxa de argila for muito alta, este irá demandar de uma quantidade elevada de cimento, tornando sua execução muito onerosa e apresentando muito estreitamento. Sendo assim, é aconselhável que o solo tenha maior proporção de areia.

Em um estudo acerca da estabilização de um solo por meio de material cimentante, Dias (2012) utilizou um solo silto-argiloso proveniente dos Capuchos, no concelho de Almada (Portugal), de cor cinzento azulado. A classificação para fins rodoviários do solo em questão inseriu-se no grupo A-6 (14) (solos argilosos), segundo a AASHTO, ou seja, um solo que possui um comportamento "regular a mau" para o uso em pavimentação, sendo, portanto, necessário

o acréscimo em maior percentagem de cimento para a sua efetiva estabilização. O material cimentante escolhido para realizar a estabilização foi o cimento Portland IV (por ser especialmente indicado para pavimentos rodoviários, betonagens em meios agressivos, ambiente marítimo e misturas de solo-cimento) nas dosagens de 8 e 12% pelas quais foi possível verificar que a resistência se eleva a mesma taxa do aumento da porcentagem de cimento e os maiores ganhos de resistência dão-se durante os sete dias de cura iniciais

2.2.4 Solo-emulsão

A estabilização química do tipo solo emulsão têm um excelente custo-benefício para regiões em que existe ausência de agregados pétreos e elevado custo de transporte para esses materiais granulares, necessários para a pavimentação; para essas regiões a estabilização solo emulsão torna-se alternativa à pavimentação (Rebelo, 2009). Segundo a Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos – ABEDA (2001), a emulsão asfáltica foi introduzida oficialmente no Brasil em 1962, pelo Engenheiro Químico Jean Claude Vogt. Experimentos realizados no Rio de Janeiro foram relatados na década de 1970, com implantações de alguns trechos de solo-emulsão em rodovias estaduais, apresentando-se em bom estado de uso após 20 anos de construção (Thuler, 2005).

De acordo com Rebelo (2009), o desenvolvimento das emulsões asfálticas catiônicas trouxe vantagens para a evolução na construção de pavimentação e, principalmente, para os serviços de conservação. Além disso a estabilização solo-emulsão constitui uma excelente alternativa técnica de baixo custo, destacando-se, também, o seu baixo consumo energético, uma vez que a mistura dos materiais é executada a frio, quando da construção de camadas de um pavimento

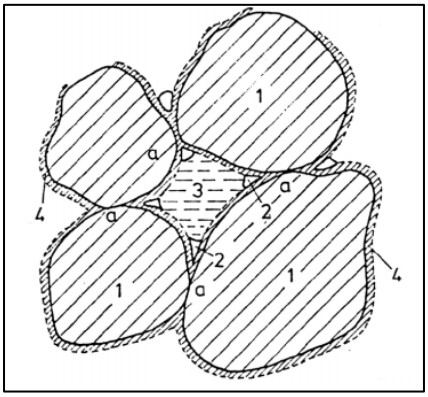
Um dos atributos mais relevantes das emulsões é a velocidade com que acontece a ruptura ao serem combinadas com solo ou agregado, discriminando-se três variedades de emulsões com base nessa característica: as de ruptura lenta, de ruptura média e de ruptura rápida. O tipo mais comum de emulsão a ser utilizado como estabilizante é o de ruptura, para assim evitar que os outros tipos de emulsão rompam precocemente (CRISTELO, 2011).

Por intermédio da estabilização por material betuminoso busca-se sobretudo melhorar a coesão e a resistência ao cisalhamento, através da adequada adesão do filme asfáltico (não tão delgado a ponto de ultrapassar o atrito inter-granular, contudo espesso o suficiente para proporcionar o efeito adesivo) com os grãos de solo. Além disso, se visa a melhora da impermeabilidade, propiciada por meio da ruptura da emulsão com o agrupamento de várias

partículas de ligantes formando conglomerados betuminosos de volumes variados, dispersos pela massa de solo (MATTOS, 1991).

A Figura 1 apresenta a adequada adesão do filme asfáltico com os grãos de solo.

Figura 1 - Distribuição do filme betuminoso na massa de solo.



1 - grão de solo; 2 - poro com ar; 3 - água intergranular; 4 - filme betuminoso; a - contato entre os grãos.

Fonte: Kézdi, 1979 apud Miceli, 2006.

Segundo Moreira (2010), a adição de betume, após a pulverização e mistura, envolve as partículas e propicia coesão sem comprometer o atrito entre elas. Desta forma, a fração de betume a ser aplicado não deve ser exagerada, visto que uma espessura de película muito grande diminui o atrito diminuindo a coesão, fazendo com que o betume passe a agir como um lubrificante.

O número de elementos que constituem a mistura de solo-emulsão (solo, água e emulsão), bem como suas quantidades influenciam diretamente na capacidade de efetivar a estabilização. Além disso, a constituição química e mineralógica do solo utilizado na mistura exerce grande influência no processo de estabilização, bem como, na superfície específica das partículas, isto é, quanto maior a área superficial mais difícil será a estabilização com emulsão asfáltica (JACINTHO, 2005).

A estabilização solo-emulsão pode ser aplicada de maneira satisfatória para solos granulares, sendo exigida a existência de material fino para o aumento do ângulo de atrito interno do material. Contudo, solos altamente plásticos são insatisfatórios e geralmente complicados de estabilizar em decorrência da dificuldade da quebra dos torrões de argila e de misturar inteiramente a emulsão à massa de solo. Além disso, observa-se que a quantidade de água necessária é, de modo geral, inferior ao teor ótimo obtido nos ensaios de compactação, referente à energia do Proctor Normal para um solo natural (REBELO, 2009).

Na mistura de solo com emulsão asfáltica são usados diversos teores do material betuminoso que, em geral, deve variar entre 0% a 10%. O teor ótimo pode alterar conforme a característica do solo e a variedade da emulsão, sendo que a mais utilizada e recomendada pelos fabricantes é a emulsão catiônica de ruptura lenta (RL-1C) (MICELI, 2006).

Moreira (2010) estudou dois trechos de uma via de baixo volume de tráfego. O solo coletado pertence a um trecho do Riacho da Cruz e pode ser classificado na metodologia MCT como NA', solo considerado razoável para pavimentação, entretanto esse solo apresenta a característica de uma alta perda por imersão devido à sua falta de coesão. Após utilizada a mistura solo-emulsão, entretanto, pode ser observada uma melhora considerável no problema da coesão, visto que a emulsão agiu diretamente como aglutinante. Além disso, constatou-se que a presença da emulsão diminuiu a massa específica com o aumento do teor, como esperado. Quando o teor está acima de 7%, passa a agir como lubrificantes, reduzindo a resistência, portanto optou-se por manter uma porcentagem de 3% com a qual não houve mudança no CBR.

Rebelo (2009) utilizou-se da mistura solo-emulsão em um solo da região de Urucu, Amapá. Tendo em vista os estudos de classificação do solo, este foi determinado como tendo uma grande predominância de silte (superior ao dobro da segunda maior fração, que era areia), baixa plasticidade e quanto a sua textura, com defloculante o solo foi caracterizado como silte areno-argiloso e sem a ação do defloculante como silte arenoso. Além disso, em seus estudos, Rebelo (2009) percebeu que o solo de Urucu não obedece aos requisitos granulométricos determinados por outros autores e isso se deve ao fato desse solo possuir quantidade da fração fina fora dos limites aceitáveis, ou seja, as porcentagens granulométricas passantes, em especial na peneira nº 200, ficaram muito acima dos limites propostos (valores estes que chegam a ultrapassar o dobro ou até mesmo o triplo do limite estabelecido). Para o melhoramento do solo, foi utilizada a emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta (RL-1C) e observou-se o aumento da resistência (os corpos de prova tiveram um aumento de mais de 100% de resistência), após um período de 7 dias, o solo natural sem aeração obteve um aumento de resistência em torno do dobro relativo às condições com aeração.

Gandolfi (2013) realizou ensaios de análise granulométrica, compressão e expansão, submetendo um solo tropical laterítico granular a uma emulsão asfáltica do tipo ruptura lenta (RL 1C), com teor de emulsão de 0, 2, 4 e 6% e 2 L de aditivo (a fim de reduzir a porcentagem de resíduo à 50%, de forma a aumentar a trabalhabilidade da emulsão). Após a realização dos ensaios típicos, foi possível observar que entre os teores de emulsão ensaiados, os melhores valores foram para o teor de 2%, o valor mais baixo entre os experimentos, o que pode ser devido à alta plasticidade do solo e ao fato da emulsão contribuir para o aumento dessa

plasticidade. Além disso, o autor ainda sugere testar teores de emulsão entre 0,5 e 3% para solos granulares, visto que houve ganho de resistência nesse intervalo.

2.3 ESTABILIZAÇÃO MECÂNICA

Segundo Medina e Mota (2005), estabilização mecânica se trata do procedimento mais antigo e usual para a construção de estradas. Utilizando uma energia de compactação externa aplicada ao solo é possível reduzir os vazios, aumentando sua resistência aos esforços externos, alterando a sua compressibilidade e permeabilidade, podendo ser utilizada em conjunto a outros métodos de estabilização ou individualmente.

Também é considerada estabilização mecânica a correção granulométrica por meio da mistura de diferentes tipos de solos, ou solos e agregados. Essa técnica procura obter uma mistura que possua maior estabilidade que os materiais de origem. A estabilização granulométrica consiste em compor uma mistura densa, ou seja, que possua material graúdo suficiente para que haja aumento da resistência, a partir do contato entre grãos, e que possua material fino para preencher os vazios, garantindo maior densidade e menor permeabilidade (MICELI JÚNIOR, 2006).

Além disso, Miceli Júnior (2006) menciona a estabilização mecânica feita a partir da drenagem de uma camada de solo. Ou seja, a partir da drenagem, por meio de instalações adequadas e bem monitoradas, se faz a manutenção no teor de água a um nível constante, proporcionando melhorias nas características mecânicas do material.

Ainda acerca da estabilização mecânica, Nascimento (1970); apud Gorski (2009) relata que este método de estabilização rodoviária busca especialmente o aperfeiçoamento das propriedades mecânicas dos solos e a manutenção das suas características ao longo do tempo, aumentando, assim, sua durabilidade, diminuindo sua fragilidade às variações do teor em água. Além disso, é na construção de meios de comunicação que os solos são submetidos a condições mais severas, uma vez que estão submetidos a cargas variáveis, levando à fadiga, bem como às variações de umidade.

A estabilização busca possibilitar a utilização de solos locais na estruturação de pavimentos rodoviários, que em vista à sua baixa qualidade não poderiam ser utilizados isoladamente, dado que não se ajustariam ao exigido pelas normas para a construção de bases e sub-bases. Além disso, a utilização de solos estabilizados em vez dos agregados naturais, que se torna cada vez mais exíguo, torna-se um avanço em relação aos cuidados com o meio

ambiente devido às vantagens ambientais e econômicas (SHERWOOD, 1995; apud GORKI, 2009).

2.4 HISTÓRICO DA PAVIMENTAÇÃO

O pavimento é definido como uma estrutura não perene, ou seja, é projetado para ser uma estrutura resistente formada por camadas de materiais compactados distintos sobrepostos a partir do subleito. Essa estrutura deve ser adequada para a demanda do tráfego estrutural e operacionalmente gerando um mínimo custo possível de manutenção e reabilitação (BALBO, 2007).

Reiterando a definição de pavimento, Balbo (2007) sugere que o ser humano, com o intuito de ter novos acessos às áreas cultiváveis e às fontes de madeira, rochas, minerais e água, além da ânsia por expandir sua área ou território de influência, criou o que é chamado de estradas. Os romanos, por exemplo, aperfeiçoaram suas estradas instalando pavimentos e canais de drenagem, com o objetivo de evitar alagamentos e torna-las duradouras. Além disso, eles fizeram um planejamento de rotas mais inteligente, objetivando galgar montanhas e chegar aos principais portos do Mediterrâneo de maneira mais rápida, utilizando os modais da época da maneira mais eficiente que seus projetistas poderiam conceber. Já havia o entendimento, naquela época, de que as rodovias eram uma parte essencial das sociedades desenvolvidas, mas que devido a facilidade com que se degradavam ao longo dos anos, sua manutenção era imprescindível.

Trazendo ao contexto do país, apenas no final do século XVIII foi construída a primeira estrada pavimentada do Brasil, por iniciativa do governador de São Paulo. A estrada que fora chamada de “a Calçada do Lorena” ligava o Planalto Paulista ao porto de Santos e foi construída, sob vários aspectos, com base em preceitos de engenharia (BALBO, 2007).

Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), no ano de 1926, São Paulo criava a Diretoria de Estradas de Rodagem que, por sua vez, se tornaria, em 1934, no Departamento de Estradas de Rodagem: o primeiro órgão rodoviário brasileiro com autonomia técnica e administrativa. Além disso, com a criação de deste departamento, foi possível abrir caminhos para que, um ano depois, o governo federal fundasse a Comissão de Estradas de Rodagem Federais, um órgão de ancestral do DNER. Após a colocação de sobretaxas nos impostos sobre a gasolina, veículos e acessórios sob a alegação de ser um “fundo

especial" de financiamento, a Comissão construiu importantes obras para a época, como a Rio-Petrópolis e a parte fluminense da primeira ligação entre Rio de Janeiro e São Paulo.

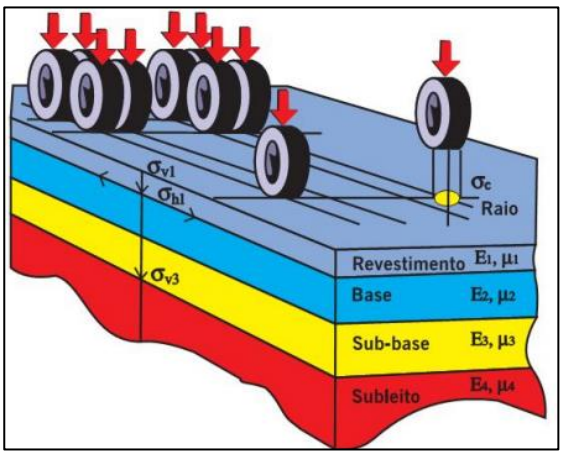
De acordo com o Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (DAER), seu surgimento se deu a partir da instauração do DNIT em meados dos anos 1930, quando um grupo de engenheiros ligados à Sociedade de Engenharia de Porto Alegre começaram a defender a criação de um departamento autônomo estadual para construir e conservar, a fim de oferecer melhores condições de tráfego, visto que uma viagem até algum município do interior poderia levar dias. Assim, em 11 de agosto de 1937, surge o 2º órgão de fiscalização de rodovias, o Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (DAER) criado como autarquia estadual responsável pela gestão do transporte rodoviário do Estado do Rio Grande do Sul, vinculada à Secretaria de Estado dos Negócios das Obras Públicas.

2.5 ESTRUTURA DO PAVIMENTO

A estrutura do pavimento é constituída para receber e transmitir esforços a fim de suavizar as tensões de compressão sobre as camadas inferiores, que geralmente são menos resistentes. Além disso, para que tenha um funcionamento adequado, todas as camadas que a constituem devem permitir deformações compatíveis com sua característica e capacidade de suporte, isto é, de modo que não haja ruptura ou dano de forma precoce e sem aviso nos materiais de constituem os níveis do pavimento (BALBO, 2007).

A Figura 2 apresenta como se dá a transmissão dos esforços resultantes das tensões de compressão aplicadas ao revestimento.

Figura 2 - Camadas de um pavimento e tensões solicitantes.



Fonte: Bernucci et al.(2008).

Respeitando uma terminologia coerente, o pavimento em si é constituído das camadas a seguir: revestimento, base e sub-base e reforço do subleito. Além disso, às vezes não haverá necessidade de o pavimento possuir uma camada de sub-base ou de reforço. Contudo, as camadas de revestimento e de fundação (subleito) se fazem necessárias por serem requisitos mínimos para que o sistema possa receber a terminologia de pavimento (BALBO, 2007).

Ainda de acordo com Balbo (2007), cada camada do pavimento dispõe de um ou mais usos característicos, que devem estabelecer aos meios de transportes as condições pertinentes de suporte e rolamento sem depender do estado climático. As tensões empregadas sobre a camada mais superficial do pavimento acarretam determinado estado de tensões na estrutura, que irá depender muito do comportamento mecânico de cada um dos níveis e do conjunto destes.

Toda a estrutura do pavimento está acima do subleito, que age como a fundação do sistema que irá receber os esforços absorvidos pelo pavimento. Acima desse subleito basicamente a estrutura do pavimento é constituído de uma regularização do subleito, um reforço de subleito, caso haja necessidade, uma sub-base acima desse reforço de subleito, seguido de uma base e por fim um revestimento (ROSSI, 2017).

2.5.1 Revestimento

O revestimento é a camada de maior custo (devendo, portanto, ter sua espessura respeitada para que não haja a redução da resistência daquele pavimento), além de ser a mais externa existente na estrutura e é ela que irá receber propriamente a ação do tráfego e será diretamente ligada à qualidade do subleito. Além disso, a qualidade do revestimento é essencial para garantir resistência aos esforços solicitantes do tráfego e um bom rolamento da pista, fornecendo maior conforto ao usuário (ROSSI, 2017).

Com relação a sua função estrutural, Balbo (2007) elucida que o revestimento deve receber as tensões, estáticas ou dinâmicas, sem apresentar grandes deformações elásticas ou plásticas, fragmentação de elementos ou, ainda, redução da compactação. Desta forma, o revestimento requer a composição de materiais bem associados ou arranjados de modo a conter seu deslocamento horizontal.

2.5.2 Bases e sub-base

Como fora elucidado por Rossi (2017), a base fica localizada logo abaixo do revestimento e será responsável pelo suporte estrutural do pavimento tendo que dissipar as

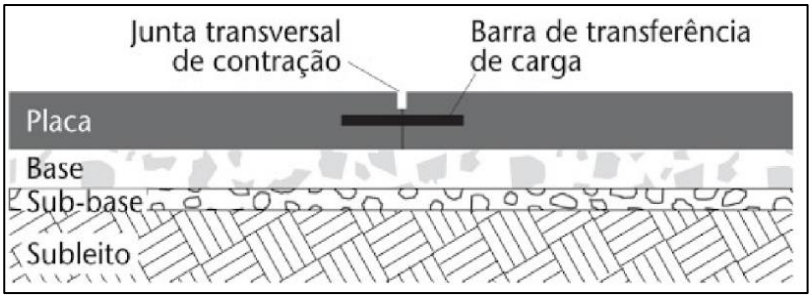
cargas para os próximos níveis, reduzindo sua intensidade. Caso a qualidade da base não seja boa, é muito provável que esse pavimento sofra algum dano.

Segundo Balbo (2007), para reduzir a intensidade das forças de compressão sobre as camadas de solos inferiores, surge a base e sub-base, que inclusive podem exercer papel significativo na drenagem superficial do pavimento. Quando a camada de base demandada para exercer tal função (difundir os esforços para níveis inferiores) é muito espessa, costuma-se fracioná-la em duas, formando-se, assim, uma sub-base, geralmente de menor custo.

As bases e sub-bases podem ser compostas por solo estabilizado naturalmente ou por misturas. Quando se fala de misturas deve-se ter em mente que são formadas por solo e agregados (solo-brita), brita graduada, brita graduada tratada com cimento, solo estabilizado quimicamente com ligante hidráulico ou asfáltico, concretos, dentre outras (BALBO, 2007).

A Figura 3 apresenta o corte de um modelo típico de pavimento de concreto simples. Entretanto é válido ressaltar que a camada logo abaixo da placa de concreto já é a sub-base, visto que a placa de concreto tem função de revestimento e de base, apesar da figura não apresentar essa informação.

Figura 3 - Seção longitudinal típica de um pavimento de concreto simples.



Fonte: Balbo, 2007.

Além disso, é interessante acrescentar que, segundo o Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (DAER, 1998), os materiais ou misturas empregadas na camada de base do pavimento, devem apresentar as seguintes propriedades geotécnicas: - capacidade de suporte superior ou igual a 80% e expansão máxima de 1%.

2.5.3 Subleito

Em relação ao subleito, Balbo (2007) explica que as tensões aplicadas sobre sua superfície são aliviadas na sua profundidade, geralmente dissipando-se já no primeiro metro. Devido a isso, a maior preocupação deve se ater aos estratos superiores, visto que é onde os esforços solicitantes atuam com mais intensidade. Acerca de sua composição, o autor elucida

que deve ser constituído de material natural compactado e consolidado ou por um material transportado e posteriormente compactado.

Tratando-se da reutilização de material do subleito de estradas já implantadas, se houver ocorrência de solos com Índice de Suporte Califórnia (ISC) inferior a 2%, deve-se substituir estes solos por uma espessura que deve ser definida de acordo com os critérios adotados nos estudos geotécnicos. Para subleito que possuam solos com expansão superior a 2%, deve ser determinada, experimentalmente, a sobrecarga necessária para o solo apresentar expansão menor que 2%, para que o peso próprio do pavimento projetado possa transmitir para o subleito pressão igual ou maior do que a determinada pelo ensaio. Caso o peso próprio da estrutura não atinja uma pressão maior ou igual à determinada no ensaio de sobrecarga, deve-se efetuar a substituição de solos em espessura definida nos estudos geotécnicos realizados (Departamento de Estradas de Rodagem, 2006).

2.6 SOLO PARA PAVIMENTAÇÃO

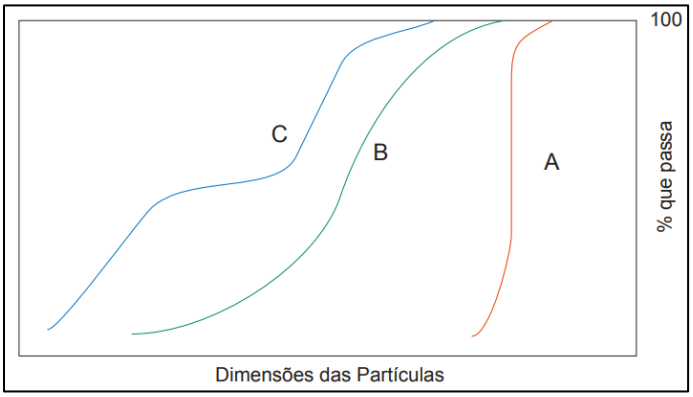
Segundo o DNIT (2006), a princípio qualquer solo pode ser utilizado como material constituinte das camadas de pavimentação. Contudo, alguns não apresentam resultados satisfatórios quanto às normas estabelecidas para durabilidade e resistência, por exemplo. Para estes casos, se faz necessária a utilização de métodos de melhoramento.

Para determinar se um solo é inadequado, utilizam-se alguns limites relacionados ao material que, se for confirmada a necessidade de intervenção, permitem definir qual método de melhoramento do solo será necessário. Dentre estes limites estão a granulometria e os limites de consistência. A granulometria de um solo permite construir a curva granulométrica do solo em estudo, podendo, então, realizar a verificação se a curva real se enquadra na faixa de serviço, ou seja, da faixa granulométrica especificada pela Fiscalização. Quando a curva não se encontra entre essa faixa esperada é necessário misturar o solo com outro, de maneira a obter uma mistura em que a granulometria se encontre dentro das especificações (DNIT, 2006).

Em casos mais graves em que o custo para misturar o solo local com um solo adequado até que a mistura torne-se viável é muito elevado, o DAER-RS (1998) propõe a remoção e substituição do solo local, por meio da escavação e substituição de materiais nitidamente instáveis do subleito de cortes e aterros, devido ao excesso de umidade e de aeração ou por características correlacionadas. A Figura 4 mostra um exemplo de faixa granulométrica

especificada (curvas A e C), entre as quais a curva do solo (curva B) em estudo deve estar inserida.

Figura 4 - Dimensões das partículas.



Fonte: DNIT (2006).

Quando se refere aos índices de consistência, alguns autores, como mostrado na Tabela 1, apresentam requisitos quanto às características granulométricas e aos índices de plasticidade dos solos a serem empregados na estabilização solo-emulsão.

Tabela 1 - Requisitos dos solos para estabilização solo-emulsão.

Tipo de solo mm	LL/LP do solo	% Passante # 0,074	Fonte
Areias IP	máximo de 12 %	25 % máximo	YODER e WITCZAK (1975)
Pedregulhos e Areias pedregulhosas	IP máximo de 12 %	15 % máximo	
Solos finos	IP máximo de 18 % LL máximo de 40 %	35 % máximo	
Solos em geral	IP máximo de 18 % LL máximo de 40 %	Entre 10 % a 50 %	KEZDI (1979)
Solos em geral	IP máximo de 14 %	5 % máximo	VOGT (1971)
Solos arenosos		35 % máximo	DER (1991)
Solos argilosos	IP máximo de 6 % LL máximo de 30 %	35 % máximo	
Materiais britados		15 % máximo	ABEDA (2001)
Solos em geral	IP máximo de 8 %	20 % máximo	
Solos em geral		25 % máximo	ASTM (2006)

Fonte: Miceli (2006).

Farias (2005) utilizou um solo classificado como de comportamento granular (dependente da pressão de confinamento) e pertencente ao Grupo A -5 do sistema HRB de classificação e comportamento não laterítico argiloso (NG´) pela classificação MCT e estabilizado quimicamente por meio de cinza pesada para fins de pavimentação. Os resultados mostram que com o "destorroamento" da cinza há uma significativa mudança nas porcentagens de silte e areia da cinza, indicando um "afinamento" da granulometria, o que é interessante quando se referindo a estudos de estabilização, pois quanto mais fino o material maior é a atividade pozolânica e, com isso, maior seria o potencial de estabilidade.

Santos (2009) ateu-se a váriar o tipo de solo mantendo o tipo de estabilização; ele utilizou uma areia argilosa, uma areia argilo-siltosa e uma argila siltosa, todos da região de Sergipe. Os três solos foram expostos ao mesmo tipo de estabilizante, uma mistura asfáltica do tipo ruptura lenta, de carga elétrica de partícula positiva (RL-1C). Além disso, esses solos passaram por três distintos métodos de compressão: com cura, sem cura e sob imersão. Os resultados desses ensaios promoveram a conclusão de que houve melhoria na RCS de quase todos os solos, com exceção do solo mais argiloso, sem o período de cura. Também foi possível perceber que a determinação do teor de emulsão para estabilizar o solo está diretamente associado ao tipo de solo e o seu nível de coesão.

3 EMULSÃO ASFÁLTICA

Para a ABEDA (2001), a definição de uma emulsão nada mais é do que a difusão de pequenas partículas de um líquido em um outro líquido. Assim, a emulsão asfáltica é uma mistura do cimento asfáltico de petróleo (CAP) dispersos em água. Por esse motivo a facilidade de manuseio a frio.

De acordo com Bernucci (2008), para que o cimento asfáltico de petróleo (CAP) seja capaz de recobrir de modo eficiente os agregados é preciso que ele possua uma viscosidade baixa, característica obtida através do aquecimento do ligante que, por sua vez, após sofrer uma sequência de aquecimentos e resfriamentos, envelhece e perde sua qualidade. Para evitar que o ligante seja submetido a esse aquecimento, além de facilitar o manuseio, foi desenvolvido a emulsão asfáltica.

A definição de emulsão é a de uma mistura estável de dois líquidos imiscíveis ou mais. Ao se tratar da emulsão asfáltica de petróleo (EAP), as duas substâncias que a originam são a água e o ligante asfáltico. A emulsão asfáltica (EA) configura uma classe específica de mistura óleo-água em que a fase oleosa tem um valor elevado de viscosidade e os dois elementos não são capazes de formar uma emulsão simplesmente pela mistura e agitação dos dois componentes, devendo ser utilizado um produto auxiliar afim de manter a estabilidade da emulsão. Além disso, o asfalto necessita de uma ação mecânica para que se transforme em pequenas partículas ou glóbulos (ABEDA, 2001).

Os emulsificantes são produtos tensoativos utilizados na fabricação das emulsões (Figura 5) e são divididos em duas grandes categorias: aniônico (onde o emulsificante é um sabão com um ânion orgânico ligado a um álcali) e catiônico (onde o emulsificante é um sal de amina). Geralmente, esses emulsificantes são adicionados em pequena quantidade, na ordem de 1 a 1,5%, sobre a emulsão (PINTO, 1998). A Figura 5 mostra as instalações de uma fábrica de produção de emulsão asfáltica.

Figura 5 - Instalações de fábrica de produção asfáltica.

Fonte: Nascimento, 2005.

Historicamente, é possível afirmar que as emulsões asfálticas tiveram sua produção em nível industrial iniciada na cidade de Lutterbach, em 1905, pelo químico Emile Feigel. Entretanto, apenas em 1951 foi iniciada a comercialização das emulsões de maior uso na pavimentação, as asfálticas catiônicas (ABEDA, 2001).

Segundo Gandolfi (2013), devido à grande extensão territorial do Brasil, os pavimentos exigem um ajuste diferente para cada região. Visando atender à carência de novos investimentos rodoviários e simultaneamente resolver a questão de falta de recursos, procura-se utilizar solos locais que estão acessíveis no próprio leito da obra e, assim, reduzir as despesas com transporte de materiais. Contudo, esses materiais, mesmo após ser estabilizado granulometricamente, nem sempre corresponder adequadamente às exigências regionais e as especificações.

A estabilização química por meio do uso de emulsão asfáltica irrompeu da necessidade de perscrutar materiais e técnicas construtivas alternativas que possibilitem a utilização de solos locais em obras de engenharia (MICELI, 2006).

3.1 TIPOS DE EMULSÃO

Gandolfi (2013) relata que emulsões necessitam ser minimamente estáveis à ruptura, a fim de permitir o transporte adequado e o seu correto armazenamento. Esta estabilidade, por sua vez, é obtida através da qualidade e quantidade do emulsificante empregado. As emulsões asfálticas podem ser classificadas quanto à sua velocidade de ruptura e são divididas em:

a) Ruptura rápida (RR): emulsões asfálticas de ruptura rápida;

b) ruptura média (RM): emulsões asfálticas de ruptura média;

c) ruptura lenta (RL): emulsões asfálticas de ruptura lenta.

De acordo com David (2006), as emulsões catiônicas são distribuídas dentre três categorias, as de ruptura rápida (RR), ruptura média (RM) e ruptura lenta (RL). Além disso quanto a determinação da segunda sigla de sua nomenclatura, elas podem ser classificadas de 1C e 2C, onde a letra C representa que é uma “emulsão do tipo catiônica” e os números 1 e 2 estão associados à viscosidade relativa e à quantidade de cimento asfáltico utilizado na fabricação.

Também é esclarecido por Gandolfi (2013) que há as emulsões RC, ou seja, “ruptura controlada” que, por intermédio do aditivo usado e a concentração atribuída, pode vir a apresentar tempos de ruptura distintos daqueles previstos para as emulsões RR, RM e RL. Incluso ao tempo, há outras propriedades que podem ser alteradas nas emulsões e isso ocorre através da adição de aditivos químicos a emulsões ditas modificadas.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Solo

Foi utilizado um solo da cidade de Caxias do Sul, situada na região da Serra Gaúcha, pertencente ao estado do Rio Grande do Sul, mais precisamente na Rua Vergílio Perotoni, próximo à rua Alzerina de Oliveira Freitas, no bairro Nossa Senhora do Saúde. De acordo com Bressani, Flores e Nunes (2005), o solo de Caxias do Sul é composto em sua maioria por cinco materiais rochosos: os Dacitos Galópolis, Canyon, Caxias, Forqueta e Ana Rech. Após a realização de diversos ensaios mineralógicos, os autores elaboraram uma tabela onde é possível verificar os percentuais de solo predominante em cada região e seus limites de consistência, como pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados dos ensaios de caracterização com os solos presentes na área

Solo	Pedre. (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	LL	LP	IP	γs (g/cm²)
Forqueta	1,0	10,5	17,0	71,5	69,5	59,5	10,0	2,707
Caxias	2,0	17,0	27,0	54,0	60,0	32,5	27,5	2,637
Canyon	2,5	19,5	29,0	49,0	71,0	45,5	25,5	2,692
Ana Rech	-	-	-	-	-	-	-	-
Galópolis	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Bressani et al, 2005.

Por meio desse estudo é possível observar um predomínio de material argiloso no solo de Caxias do Sul, tornando este o alvo de estudo do presente trabalho.

4.1.2 Emulsão Asfáltica

O material asfáltico empregado é uma emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida (RR-1C), devido à dificuldade em se obter uma emulsão de ruptura lenta. Os ensaios de caracterização da emulsão asfáltica são relativamente simples e tem como finalidade controlar a qualidade da emulsão. Todos os resultados obtidos para a emulsão em estudo foram averiguados pela empresa fornecedora, junto às normas técnicas que os regulam.

Os principais parâmetros ensaiados pelo fornecedor e que foram utilizados neste trabalho são:

a) viscosidade Saybold Furol (NBR 14491) – avalia as propriedades de consistência (velocidade de escoamento) das emulsões asfálticas;

b) sedimentação (NBR 6570) – verifica a tendência de os glóbulos de asfalto precipitarem durante a estocagem das emulsões asfálticas;

c) carga da partícula (NBR 6567) – trata-se de um ensaio de identificação de emulsões asfálticas catiônicas de ruptura rápida e media;

d) destilação (NBR 6568) – usa-se para determinar as proporções relativas de cimento asfáltico e água na emulsão asfáltica.

Para esses ensaios, o fabricante disponibilizou os valores representados na Tabela 3.

Tabela 3 - Caracterização da emulsão RR-1C

Ensaio	**Resultados**
Viscosidade Saybolt-Furol a 50 °C	20-90
Sedimentação	5
Ponto de Fulgor	NA
Ponto de Fluidez	NA
Carga da partícula	Positiva
Resíduo da destilação, % em peso sobre o total	62

Fonte: Fabricante, 2019.

4.2 MÉTODO

4.2.1 Umidade Natural do Solo (w)

A umidade natural de um solo é definida como a quantidade de água presente naturalmente no solo em condições normais. De acordo com a norma que rege o ensaio utilizado para definir a umidade natural de um solo (NBR 6457, 2016), deve-se inicialmente inserir cerca de 200 g de solo destorroado e em estado fofo em uma cápsula metálica com tampa, realizando em seguida a pesagem do conjunto. Após, deve-se retirar a tampa e levar a cápsula com o material para uma estufa aquecida de 105 a 110ºC, até que esse apresente constância de massa

(isso ocorre de 16 a 24h de secagem na estufa). Finalmente, após o material ser resfriado até chegar à temperatura ambiente através de um dessecador, deve-se tampar novamente a cápsula (tomando o cuidado de utilizar a mesma tampa que fora utilizada na pesagem anterior) e pesar novamente o conjunto. Devem ser realizadas três determinações de umidade por amostra e utilizar a média dos valores encontrados.

4.2.2 Peneiramento

Tomando como base a norma NBR 7181 (2016), que regula a análise granulométrica de solos, a amostra de solo retirada do campo deve secar ao ar ou por meio de uma estufa, de modo que a temperatura não exceda 60ºC, a fim de não interferir nas características do solo. Após, deve ser realizado o destorroamento do material com a mão de gral recoberta de borracha, de maneira a evitar que o tamanho natural das partículas individuais do solo, sejam reduzidas, ou seja, para evitar a quebrado grão de solo, como demonstrado na Figura 6.

Figura 6 - Execução do destorroamento de um solo.

Fonte: SILVA, 2017.

Após, o solo ser destorroado, o material preparado é reduzido utilizando-se o método de quarteamento, até se obter uma amostra de aproximadamente 1kg para solos argilosos e 1,5kg para solos arenosos ou pedregulhosos; o peso utilizado após o quarteamento é tratado como peso total da amostra seca.

Realizado o quarteamento, deve-se encaixar as peneiras previamente limpas, de modo a formar um único conjunto de peneiras, com abertura de malha da maior para a menor (3/4’’, 3/8’’, 4, 10, 16, 20, 30, 40, 60, 80, 100 e 200), como no modelo da Figura 7. Então, deve-se colocar porções da amostra sobre a peneira superior do conjunto e promover a agitação mecânica do conjunto por um tempo razoável, para permitir a separação e classificação prévia dos diferentes tamanhos de grão da amostra.

Figura 7 - Conjunto de peneiras granulométricas e agitador.

Fonte: Didática, SP.

Após o material retido na peneira deve ser retirado e levado para uma bandeja identificada para ser pesado O material removido pelo lado interno das peneiras dever ser considerado como retido e deve der pesado junto à bandeja e o desprendido na parte inferior como passante e deve fazer parte do solo da próxima bandeja.

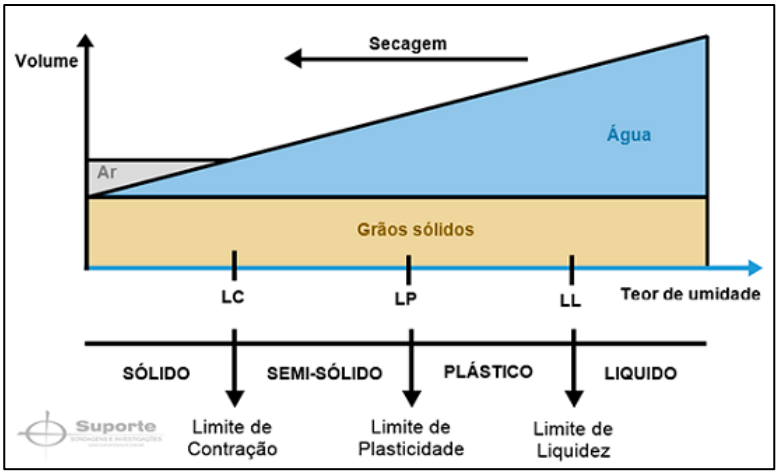
Deve-se então pesar o material de cada peneira, a fim de obter a massa total de solo retido em cada uma das peneiras e no fundo do conjunto. O somatório de solo de todas peneiras não deve diferir mais de 0,3% da massa da amostra que foi introduzida no topo do conjunto de peneiras.

Realizado o ensaio, deve-se calcular a porcentagem retida, em massa, em cada peneira, com aproximação de 0,1% e fazer a curva granulométrica do solo, seguido de sua classificação.

4.2.3 Limites de Consistência

Também conhecidos como Limites de Atterberg, devido ao seu criador Albert Mauritz Atterberg, estes ensaios permitem determinar os limites de consistência do solo. O termo “consistência” é usado para descrever um estado físico, ou seja, o grau de ligação entre as partículas das substâncias. Quando aplicado aos solos finos ou coesivos, a consistência está ligada à quantidade de água existente no solo, ou, em outras palavras, ao teor de umidade. Na Figura 8 é possível visualizar a variação dos limites de Atterberg em relação as diferentes condições de água e ar.

Figura 8 - Estados característicos de consistência dos solos finos e os limites de Atterberg.



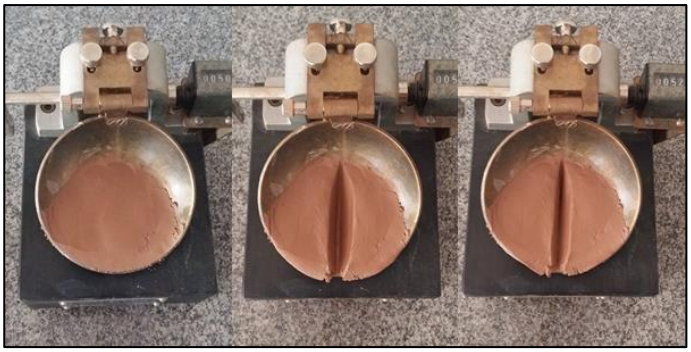
Fonte: Suporte – sondagens e investigações.

4.2.4 Limite de Liquidez

Limite de liquidez é o valor de umidade no qual o solo passa do estado líquido para o estado plástico. Para realizar o ensaio, de acordo com a NBR 6459 (2017), deve-se colocar em uma cuba de porcelana uma amostra de 200g de solo passante na peneira 0,42 mm e acrescentar, lentamente, água destilada, misturando vigorosa e continuamente com o auxílio de uma espátula, até obter uma mistura homogênea.

Após, deve ser colocada uma porção da mistura na concha do aparelho de Casagrande, moldando-a de forma que a espessura na parte central seja de aproximadamente 10 mm, retornando o excesso de solo à cuba. Dividir a pasta de solo em duas abrindo uma ranhura em sua parte central com um cinzel. A sequência de golpes deve ser iniciada girando a manivela à uma velocidade média de duas voltas por segundo, até que a ranhura se una ao longo de 13 mm de comprimento, como pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 - Ensaio de limite de liquidez.



Fonte: SILVA, 2017.

Deve-se repetir o experimento com novas concentrações de água destilada, até que se obtenham pelo menos mais três pontos que cubram o intervalo de 35 a 15 golpes para que a ranhura se feche. Com os resultados obtidos deve ser construído um gráfico no qual no eixo x deve constar os números de golpes e no eixo y os teores de umidade correspondentes, ajustando uma reta pelos pontos obtidos.

Observando a reta, obtem-se o teor de umidade correspondente a 25 golpes. Este é o limite de liquidez do solo que deverá ser expresso em porcentagem e aproximado para o número inteiro mais próximo. Quando for impossível a abertura da ranhura ou o fechamento com mais de 25 golpes, considera-se a amostra como não apresentando limite de liquidez.

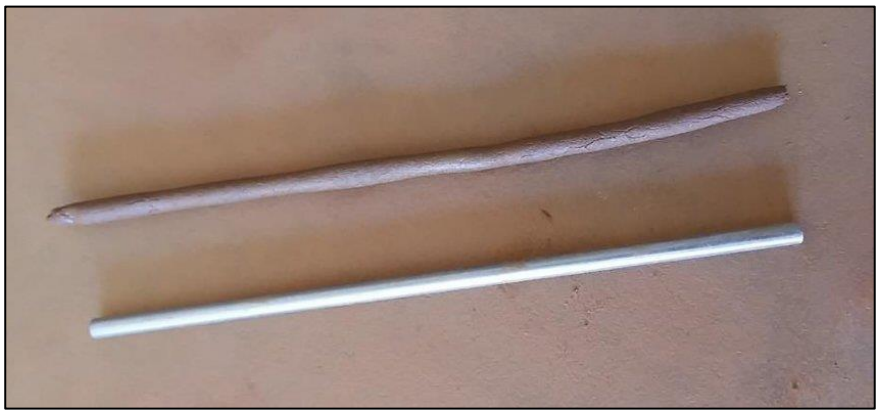
4.2.5 Limite de Plasticidade

Limite de plasticidade é o valor de umidade na qual o solo passa do estado plástico para o estado semissólido. Segundo a NBR 6459 (2017), deve-se colocar em uma cuba de porcelana uma amostra de 200g de solo passante na peneira 0,42mm e acrescentar lentamente água destilada, misturando vigorosa e continuamente com o auxílio de uma espátula, até obter uma mistura homogênea.

Deve-se tomar uma pequena fração da amostra assim preparada e formar uma bola, que deve ser rolada sobre a placa de vidro com uma leve pressão da palma da mão, apenas o suficiente para lhe dar a forma de cilindro que deve se aproximar em tamanho (100mm) e diâmetro (3mm) do cilindro modelo.

Se a amostra se fragmentar antes de atingir o diâmetro de 3mm, retorná-la à cuba de porcelana, adicionar água destilada, homogeneizar novamente, amassando e revolvendo vigorosa e continuamente com auxílio da espátula e repetir o procedimento. Se a amostra atingir o diâmetro de 3mm sem se fragmentar, é necessário amassar o material e repetir o procedimento, visto que o cilindro deve se fragmentar quando atingir os 3mm e 100mm de comprimento, como pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 - Ensaio de limite de plasticidade.



Fonte: SILVA, 2017.

Quando for possível chegar a essas condições, transferir imediatamente as partes dele para um recipiente metálico com tampa, previamente pesado, e pesá-lo novamente. Deve-se repetir pelo menos três vezes o ensaio, anotando os valores de peso final encontrado em cada um deles como M_1, M_2 e M_3.

Após, deve-se retirar a tampa e levar o recipiente metálico com o solo para uma estufa à temperatura de 105ºC a 110ºC, onde deve permanecer em um intervalo de 16 a 24 horas para a secagem do material. Esperar que o material atinja a temperatura ambiente, recolocar a tampa e voltar a pesar o conjunto. O teor de umidade deverá ser calculado por meio da Equação 1.

$$h = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3}\ x\ 100 \qquad (1)$$

Onde:

H = teor de umidade em percentual;

M_1 = massa do solo úmido mais o peso do recipiente, em gramas;

M_2 = massa do solo úmido mais o peso do recipiente, em gramas;

M_3 = massa do recipiente (cápsula metálica com tampa), em gramas.

O resultado final é a média de, pelo menos, três valores de umidade considerados satisfatórios (quando nenhum deles diferir da respectiva média de mais que 5% dessa média), aproximado para o inteiro mais próximo.

4.2.6 Índice de Consistência

O índice de consistência dos solos deve ser obtido utilizando a Equação 2.

$$IC = \frac{LL - h}{IP} \qquad (2)$$

Onde:

LL = limite de liquidez;

h = teor de umidade natural do solo;

IP = índice de plasticidade.

4.2.7 Índice de Plasticidade

O índice de plasticidade dos solos deve ser obtido utilizando-se a Equação 3.

$$IP = LL - LP \qquad (3)$$

Onde:

IP = índice de plasticidade;

LL = limite de liquidez;

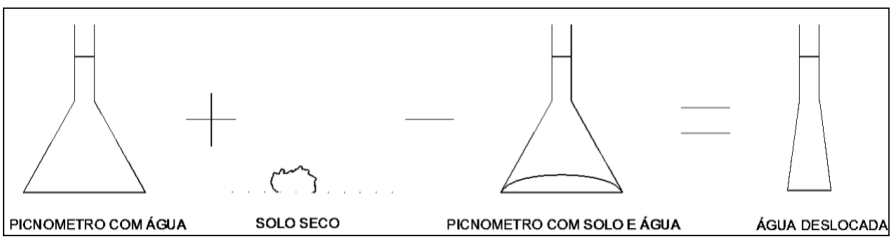
LP = limite de plasticidade.

O resultado final deve ser expresso em porcentagem.

4.2.8 Peso Específico do Solo (γ_s)

O ensaio em que é possível determinar o peso específico do solo é regido pela NBR 6458 (2016), cujo conteúdo determina que, em laboratório, o peso específico de um solo é obtido somando-se os valores de peso individuais encontrados para o conjunto picnômetro com água e para o solo, determinando, então o peso total. Após, deve-se colocar o solo no picnômetro com água, sendo possível determinar o peso do conjunto. Ao subtrair do valor do peso total, o peso do conjunto, é possível concluir o peso da água que foi substituída pelo solo, como pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 - Determinação do peso específico de um solo.



Fonte: Autor (2019), adaptado de PINTO (2000).

A partir do peso de água substituída pelo solo, pode-se calcular o volume de água deslocada pelo solo e que é o volume do solo. Com o peso e o volume, tem-se o peso específico.

A variação do peso específico dos grãos de solo para solo é muito pequena e por si só não traz segurança para identificar o solo em questão, mas é necessário para cálculos de outros

índices. Além disso, apesar de não ser fator de classificação se solos possui algumas faixas de valores característicos para alguns tipos de solos. Os valores mais comuns situam-se em torno de 27 kN/m³, sendo este o valor a seu utilizar quando não se dispõe de equipamentos para realizar o estudo do peso especifico do, sabe-se que para solos com grãos de quartzo (areia) costumam apresentar pesos específicos de 26,5 kN/m^3 e argilas lateríticas, em virtude da deposição de sais de ferro, valores até 30,00 kN/m^3.

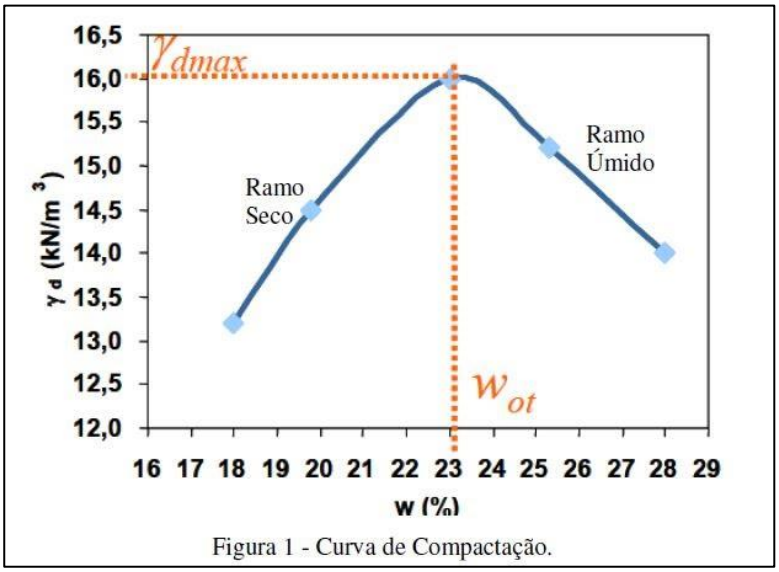
4.3 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

4.3.1 Ensaio Proctor Normal

A compactação por si só já é um método de estabilizar e melhorar um solo por meio de processo manual ou mecânico, visando reduzir o volume de vazios do solo, como já foi visto nesse trabalho. A compactação tem em vista estes dois aspectos: aumentar o contato entre os grãos e tornar o solo mais homogêneo, melhorando as suas características de resistência, deformabilidade e permeabilidade.

O Ensaio de Compactação ou Proctor, padronizado pela ABNT por meio da NBR 7182 (2016), consiste em compactar uma amostra de solo em três camadas sucessivas, através de um cilindro metálico de volume conhecido. Aplica-se uma certa energia de compactação (número de golpes de um soquete sobre o solo contido em um molde) e a massa específica resultante é função da umidade em que o solo estiver. Quando a umidade de compactação é muito baixa, o atrito das partículas é muito alto e não se consegue uma significativa redução de vazios. Com o acréscimo da umidade no ramo seco, a água provoca um certo efeito de lubrificação entre as partículas, que deslizam entre si, acomodando-se em um arranjo mais compacto e ocasionando um o acréscimo do peso especifico aparente seco (eixo vertical). Contudo, quando o acréscimo de água fica muito elevado, a umidade deixa de ser lubrificante e torna-se amortizadora, visto que começa a haver mais água do que sólidos, acarretando, por essa razão, na diminuição do peso especifico aparente seco. A observações podem ser visualizadas na Figura 12.

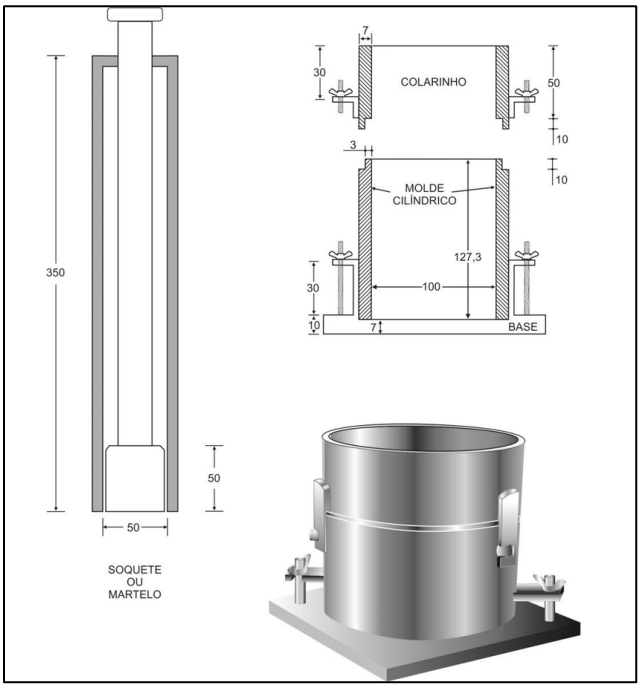
Figura 12 - Modelo de Curva de Compactação Proctor Normal



Fonte: Site Geotecnia e Fundação.

Para iniciar o ensaio, a amostra deve ser previamente seca ao ar e destorroada e então deve-se acrescentar lentamente água até que o solo fique com cerca de 5% de umidade abaixo da umidade ótima. O solo é então colocado num cilindro padrão (10cm de diâmetro, altura de 12,73cm, volume de 1.000cm^3) e submetida a 26 golpes de um soquete com massa de 2,5kg e caindo de 30,5cm, como o da Figura 13.

Figura 13- Equipamento para ensaio de compactação.



Fonte: Walter Jr, 2017.

A porção do solo compactado deve ocupar cerca de um terço da altura do cilindro. O processo é repetido mais duas vezes, escarificando a camada adjacente, atingindo-se na compactação da última camada uma altura que não deve ser superior à do cilindro em mais de 10mm, o que é possibilitado por um anel complementar. Nivela-se o volume raspando o excesso com a ajuda de uma espátula. Retira-se três amostras do interior do corpo de prova e determina-se a umidade, a fim de se obter a massa específica do corpo de prova. Com estes dois valores, calcula-se a densidade seca.

Após, o corpo de prova obtido é descartado e uma nova amostra de solo é considerada aumentando a sua umidade em cerca de 2% em relação à umidade utilizada para moldar o corpo de prova anterior e nova compactação é realizada, por meio da qual um novo par de valores umidade-densidade seca é obtido.

A operação deve ser repetida até que se perceba que a densidade, depois de ter aumentado, já tenha decaído em duas ou três operações sucessivas. Em outras palavras, deve-se repetir até serem obtidos cinco pontos sendo dois no ramo seco, um próximo à umidade ótima, preferencialmente no ramo seco e dois no ramo úmido da curva de compactação.

Por meio dos dados obtidos, desenha-se a curva de compactação, que consiste na representação da densidade seca em função da umidade, geralmente, associa-se uma reta aos pontos ascendentes do ramo seco, outra aos pontos descendentes do ramo úmido e unem-se as duas por uma curva parabólica. Como se justificou anteriormente, a curva define uma densidade seca máxima, à qual corresponde uma umidade ótima.

4.3.2 Ensaio de Compressão Simples

O ensaio determina a resistência à compressão simples sem confinamento lateral, que é o valor da pressão correspondente à carga que rompe um cilindro de solo submetido à um carregamento axial.

Os materiais a serem ensaiados deverão ser confeccionados compactando um corpo de prova cilíndrico na energia Proctor Normal com umidade ótima e massa específica seca máxima. Retira-se uma porção da amostra em questão com dimensões maiores que as requeridas para o corpo de prova. Leva-se a amostra para o talhador, onde reduz-se para o diâmetro desejado com auxílio da serra de arrame fino ou faca. Em seguida coloca-se no berço de amostras que tenha a altura e o diâmetro requeridos para o ensaio (o diâmetro deve ser a média entre as medidas das extremidades e do centro e a altura a média de pelo menos duas medidas). A relação entre altura e diâmetro deve estar entre 2 e 3, cortando-se paralelamente as suas extremidades.

Após ajustadas as dimensões, coloca-se o corpo de prova na máquina de compressão (Figura 14) coincidindo o seu eixo com o centro da placa de carregamento sobre o prato inferior e de modo que o prato superior apenas encoste ao corpo de prova. Em seguida, zera-se os extensômetros (do anel dinamométrico e das deformações) e inicia-se o carregamento de modo a se obter uma velocidade de deformação axial constante. Os carregamentos devem ser aplicados até que os valores da carga diminuam a partir da evolução dos deslocamentos, ou até que se obtenha 15% de deformação axial específica.

Figura 14 - Máquina para compressão simples.

Fonte: Autor, 2019.

Deve-se tomar nota dos valores de carga e de deformação até que se verifique a ruptura do corpo de prova, caracterizada pela queda no valor lido de carga. Para o caso de não haver queda no valor da carga, a ruptura deverá ser considerada como sendo correspondente a uma deformação específica de 20%.

Para uma maior representatividade dos resultados, realizam-se ensaios em três corpos de prova por mistura e determina-se a massa e as dimensões de cada corpo-de-prova antes de irem para a máquina de compressão.

4.4 DOSAGEM DA MISTURA SOLO-EMULSÃO

Segundo Santos (2009), devido às poucas pesquisas científicas acerca das técnicas de estabilização solo-betume, não há uma norma que estabeleça um método de identificação do teor de emulsão a ser utilizado. Em algumas pesquisas nas quais houve a preocupação com a dosagem de um teor ótimo, foram criados métodos particulares para obtê-la, não havendo uma uniformização de processos, como pode ser observado na Tabela 4, onde constam alguns autores e os métodos por eles utilizados para chegarem ao teor utilizado em seus ensaios.

Tabela 4 - Parâmetros de dosagem de solo-emulsão

Fonte	**Parâmetros de dosagem**
DER 3.07/1991 (1991)	MVS (Moisture Vapor Susceptibility) e Hubbard – Field
ASTM D 4223 (2006)	Estabilidade Marshall, MR e Resistência à Tração Indireta
Lucena et al., (1982)	Resistência à Compressão Simples, Resistência à Tração Indireta
Mattos et al., (1991), Guarçoni et al., (1988)	CBR e Mini-CBR
Araujo et al., (1983)	Ensaios Triaxias UU

Fonte: Miceli Jr. (2006).

Além disso, observa-se que grande parte dos parâmetros de dosagem utilizados está em desuso há algum tempo, como por exemplo os ensaios de Hubbard-Field, ou não são ensaios adequados para a avaliação de misturas estabilizadas, como se vem observando com relação ao ensaio de ISC. Além disso, não há nenhum ensaio que leve em consideração o módulo de resiliência.

Apesar disso, um estudo realizado pelo IPR/DNER na década de 1980, propôs um procedimento de dosagem e uma especificação de serviço de solo-emulsão que se baseou na preparação de corpos-de-prova com teores de emulsão asfáltica variando de 0, 2, 4, 6, 8 e 10%, compactados em moldes tipo MCT e , posteriormente, levados à estufa a 60ºC durante 6 horas. Após o tempo de estufa, deveriam ser resfriados ao ar e, então, imersos em água por 24 horas, devendo-se após realizar o ensaio Mini-CBR (Gandolfi, 2013).

Mas Miceli (2006), por exemplo, estudou três solos do estado de Rio de Janeiro misturados com teores de emulsões RM e RL-1C, entre 0 e 8%, e a avaliação dos resultados embasou-se no ponto de vista da Mecânica dos Pavimentos e incluiu a caracterização das

emulsões utilizadas na mistura com os solos. Os ensaios realizados nos solos puros e com adição de emulsão foram: fotografias com o microscópio eletrônico de varredura, resistência à compressão simples, ensaio triaxial dinâmico, resistência à tração indireta, módulo de resiliência na tração diametral, ensaios de desgaste (LWT e WTAT) e tiveram como resultado que a adição de emulsão RM aos solos proporciona um aumento da resistência à compressão simples e do módulo de resiliência mais intenso nos sete primeiros dias de cura seca, enquanto com a adição de emulsão RL esse ganho é mais distribuído pelos 28 dias de cura seca. Porém, a mistura com emulsão RL é mais fácil de ser executada em laboratório que as misturas com emulsão RM. Além disso, o tempo de 7 dias de cura de solo-emulsão parece ser suficiente para ser adotado numa avaliação de resistência de corpos-de-prova de solo-emulsão em laboratório.

Já Gandolfi (2013) buscou reduzir a concentração de asfalto de 60% para 50%. Para isso, utilizou teores de emulsão iguais a 0, 2, 4 e 6% em massa. Na preparação da amostra para o ensaio com cura de sete dias, considerou um tempo de abertura para a ruptura da emulsão de 20 minutos antes da compactação dos corpos-de-prova. Contudo o objetivo não foi alcançado, levando o autor a optar por aumentar o tempo de abertura para aproximadamente uma hora. Além disso, observou-se que existe um aumento de resistência até um valor do teor de emulsão próximo a 3% (após esse ponto ocorrendo a perda da resistência da mistura, que para os teores de 2 e 4% de emulsão), que os valores foram melhores sem a realização da cura e que, enquanto para o teor de 0% houve um aumento de resistência com a cura de 7 dias, para o teor de 6% a diferença de resistência foi mínima.

Jacintho et al. (2005) realizou seu estudo variando o teor de emulsão (2, 4, 6 e 8 %) e o tempo de aeração (0, 2, 3 e 4 h). Enquanto o material foi mantido sob aeração, era mantido em bandejas abertas à temperatura de aproximadamente 25 ºC. Além disso, verificar melhor o efeito da aeração, foram realizados ensaios para os teores de 2, 4, 6 e 8 % de emulsão asfáltica com um tempo de aeração de 2 h e com reposição da umidade evaporada. Para os teores de 0, e 8% de emulsão a variação ocorrida nos resultados seguiu os resultados esperados pela curva de compactação, isso demonstrou que a aeração não acarretou mudanças nos valores de peso específico, além daqueles provenientes da redução da umidade. Além disso ao realizar os ensaios com reposição da umidade evaporada, foi possível observar que foram obtidos valores de peso específico seco próximos aos dos demais ensaios com mesma umidade, o que demonstra que com aeração não ocorrem modificações significativas na interação solo-betume.

De acordo com Soliz (2007), que utilizou em seu estudo um solo classificado como arenoso foram realizados ensaios com emulsão do tipo RM-1C (Emulsão Catiônica de Ruptura Média) e tempo de cura de sete dias para teores de umidade de 0, 2, 4 e 6%, como vinha sendo

observado característico em diversos trabalhos. Contudo, se obtiveram resultados não favoráveis e a bibliografia pesquisada indicava que para este tipo de solo (arenoso) os valores de emulsão deveriam ser menores, então, passou-se a ensaiar CPs com 1, 2 e 3% de RM-1C com tempos de cura de 7 e 28 dias. Essa nova leva de ensaios trouxe a conclusão que o solo reagiu melhor, ou seja, maior valor de resistência a compressão simples, para o teor de emulsão de 1% de RM-1C.

Observando que o solo estudado foi caracterizado como um solo arenoso e apresentou uma baixa coesão, optou-se por seguir as recomendações de Soliz (2017) que verificou que solos arenosos respondem melhor a baixos teores de emulsão. Portanto, para este trabalho serão utilizados teores de 2 e 4% de emulsão asfáltica com um período de cura de sete dias.

4.5 AVALIAÇÃO MECÂNICA DA MISTURA

Santos (2009) utilizou uma emulsão asfáltica de ruptura lenda (RL-1C), de carga elétrica positiva para estabilizar três tipos de solo: um arenoso, um predominantemente argiloso e um de características intermediárias. Para Santos (2009), o processo de estabilização foi necessário optar por teores de umidade aos quais foram determinados os valores de w_{ot} e γ_{dmax}, os teores de emulsão escolhidos foram de 2%, 4%, 6% e 8% para os três solos. Após a preparação do material Santos utilizou a energia do Proctor Modificado para realizar o ensaio de compactação e para o ensaio de compressão simples se definiu que o tempo de aeração seria de uma hora e que, após, seriam moldados três CPs para cada teor (três para fossem rompidos imediatamente após a moldagem, três que fossem rompidos após o tempo de cura, em câmara úmida, de sete dias e três que, após a cura, foram imersos em água por quatro horas, sendo rompidos logo em seguida). Além disso tomou-se o cuidado de acoplar pequenas sacolas plásticas em cada CP, antes de serem colocadas em repouso em uma câmara úmida, a fim de evitar a perda de umidade.

Quanto ao ensaio de compactação, os resultados de Santos (2009) mostraram que para um solo arenoso, quanto mais que se aumenta o teor de emulsão a umidade ótima da mistura diminui e a γ_{dmax} teve uma variação ínfima, podendo ser considerado que a emulsão asfáltica praticamente não modificou essa propriedade. Para o solo argiloso, valores de γ_{dmax}, observa-se uma tendência ao decréscimo no valor deste parâmetro à medida que se aumenta o teor de emulsão, com a diferença para o peso específico aparente seco máximo com adição de 8% de emulsão, atingindo uma variação superior a 5% em relação ao solo original (SANTOS, 2009).

Já quando se refere ao ensaio de compressão simples, Santos (2009) relatou que o solo arenoso demonstrou melhora em todas a situações quando comparadas ao solo sem emulsão com o uma tendência de o maior ganho de resistência ocorrer para o solo após cura de 7 dias na câmara úmida, evidenciando a necessidade do processo de cura. Para um solo argiloso, em contrapartida, houve queda nos valores de resistência a partir de 2% de emulsão, além de constatar-se, mais uma vez, que os maiores incrementos de resistência ocorrem somente após os 7 dias de cura.

Assim, com base nos estudos já feitos, observa-se uma tendência a se avaliar mecanicamente a mistura utilizando-se ensaios de compactação e compressão. Devido a observação desses estudos, a avaliação mecânica da mistura estudada por esse trabalho (solo+2% e solo+4%) será realizada por meio da análise dos resultados obtidos nos ensaios de compactação utilizando a energia do Proctor Normal e a compressão simples.

5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos experimentos referentes à(aos):

a) caracterização do solo procedente do loteamento Altos do Seminário, Bairro Nossa Senhora da Saúde, no município de Caxias do Sul - RS, por meio da granulometria, limites de consistência, peso específico e classificação geotécnica;

b) caracterização da emulsão asfáltica catiônica utilizada nas misturas solo emulsão, por meio de dados fornecidos pelo distribuidor;

c) ensaios mecânicos: compactação Proctor Normal e resistência a compressão simples (RCS).

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

A caracterização, em geral, tem por objetivo avaliar o tipo de solo de acordo a sua textura e consistência. Para esse trabalho, realizaram-se os seguintes ensaios: determinação da umidade natural, granulometria, massa especifica dos sólidos, limites de liquidez e de plasticidade, baseados nas especificações da Associação Brasileira de normas Técnicas (ABNT).

5.1.1 Umidade Natural do Solo

Para determinar sua umidade natural, tomou-se uma amostra do solo e, após ser devidamente pesada, levou-se à estufa (105ºC) por um período mínimo de 24 horas. Após o período, o material foi retirado da estufa e pesado novamente. Para a realização do ensaio, foram retiradas 3 amostras do solo, com as quais foi possível obter os resultados exibidos na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultado das Amostras para Umidade Natural do Solo

Cápsula	Umidade %
Cápsula 1	15,49
Cápsula 2	15,44
Cápsula 3	16,18
Média	15,70

Fonte: Autor, 2019.

5.1.2 Peneiramento

Para os estudos de análise granulométrica foi utilizada uma amostra de solo de 963,31g. Os resultados dos ensaios de peneiramento grosso e fino são apresentados na Tabela 6.

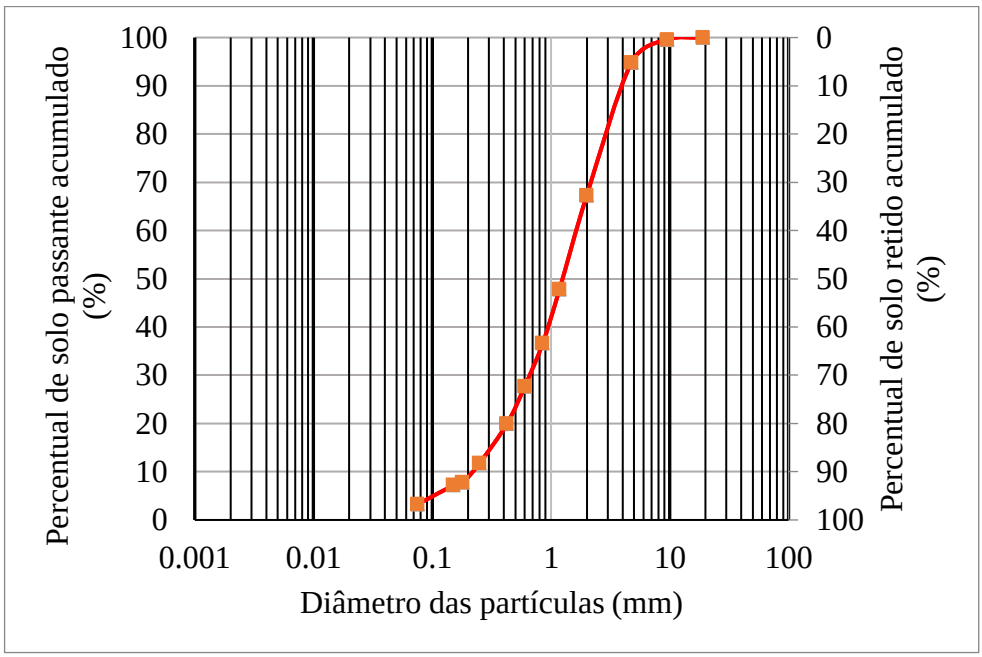
Tabela 6 - Análise granulométrica do solo

Peneiras		**Peso do Material (g)**		Percentual Passante Acumulado (%)
Nº	Abertura (mm)	Retido	Passante	
3/4"	19	0	963,31	100
3/8'	9,5	4	959,31	99,58
4	4,75	46,32	912,99	94,78
10	2	264,76	648,23	67,29
16	1,18	187,33	460,9	47,85
20	0,85	108,57	352,33	36,57
30	0,6	85,86	266,47	27,66
40	0,425	74,63	191,84	19,91
60	0,250	78,41	113,43	11,78
80	0,180	38,86	74,57	7,74
100	0,150	5,61	68,96	7,16
200	0,075	41,81	30,81	3,20
Fundo		27,15	0	
Total		963,31	0	

Fonte: Autor, 2019.

A partir dos dados coletados e da análise dos percentuais de solo passantes, foi possível gerar a sua curva granulométrica apresentada na Figura 15.

Figura 15 - Curva Granulométrica do Solo



Fonte: Autor, 2019.

Por meio da aparência da curva granulométrica, observa-se que o solo estudado possui a característica de ser mal graduado, ou seja, os tamanhos das partículas de solo tendem a ser semelhantes. Isso pode ser concluído devido à homogeneidade da curva gerada.

A partir da curva granulométrica, foi possível obter os percentuais de partículas de solo de diferentes espessuras (Tabela 7), a fim de obter a sua classificação.

Tabela 7 - Análise do solo em estudo

Descrição	Percentual de Material Retido (%)
Argila	0%
Silte	0%
Areia Fina	17%
Areia Média	50%
Areia Grossa	28%
Pedregulho	5%
Pedra	0%
Matacão	0%

Fonte: Autor (2019).

Com base nos resultados obtidos, determinou-se que a classificação do solo, segundo ao sistema universal é a de uma Areia Média.

5.1.3 Limite de Liquidez

Para definir teor de umidade ótimo do solo foi necessária a realização do ensaio de limite de liquidez. Para isso, foi separada uma amostra de solo passante na peneira 4,25 mm (Figura 16), a qual foi adicionada água destilada.

Figura 16 - Solo Utilizado Para Ensaio

Fonte: Autor, 2019.

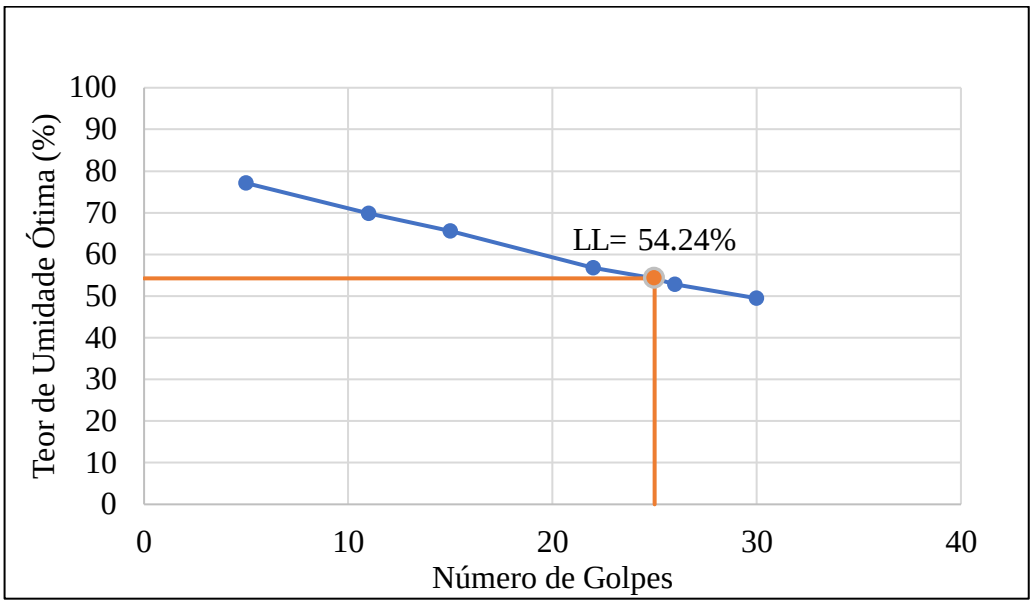
A água foi acrescentada aos poucos e foi seguida de uma mistura vigorosa, a fim de manter a homogeneidade da umidade. Após cada nova inserção de água foi realizado o ensaio de Limite de Liquidez, utilizando o aparelho de Casagrande (Figura 17).

Figura 17 - Utilização do Aparelho de Casagrande

Fonte: Autor, 2019.

Foram realizados seis ensaios de Limite de Liquidez com diferentes teores de umidade e número de golpes. A partir dos valores obtidos, foi possível construir a curva de limite de liquidez (Figura 18), a fim de obter o valor do teor de umidade ótima para o solo, que se verifica como a umidade correspondente aos 25 golpes.

Figura 18 - Curva de Limite de Liquidez



Fonte: Autor, 2019.

Com base na análise da Figura 18, observa-se que o limite de liquidez resultante dos vinte e cinco golpes é de 54,24% e pode ser considerado um valor alto para umidade natural. Contudo, o valor encontrado pode ser explicado pelo período de chuvas em que o solo foi exposto e, mesmo aguardando 1 semana de tempo firme, o solo ainda manteve a umidade alta devido a característica do solo de absorver umidade e o fato de o terreno estar em uma posição solar menos favorável.

5.1.4 Limite de Plasticidade

Limite de plasticidade é o valor de umidade para a qual o solo passa do estado plástico para o estado semissólido. É o limite no qual o solo começa a se tornar quebradiço. O ensaio que determina esse limite se baseou em atingir o ponto em que o solo se torna fissurado quando enrolado em cilindros de 3 mm de diâmetro. Para realizar o ensaio, foram preparadas quatro amostras, cujos resultados se encontram na Tabela 8.

Tabela 8 - Amostras para Limite de Plasticidade.

Limite de Plasticidade			
Amostra 1	**Peso (g)**	**Amostra 3**	**Peso (g)**
cápsula	12,00	cápsula	11,3
cápsula + solo úmido	13,35	cápsula + solo úmido	12,52
cápsula + solo seco	12,92	cápsula + solo seco	12,11
solo úmido	1,35	solo úmido	1,22

solo seco	0,92	solo seco	0,81
umidade	46,74	umidade	50,62
Amostra 2		**Amostra 4**	
cápsula	10,67	cápsula	10,81
cápsula + solo úmido	12,42	cápsula + solo úmido	12,62
cápsula + solo seco	11,84	cápsula + solo seco	12,00
solo úmido	1,75	solo úmido	1,81
solo seco	1,17	solo seco	1,19
umidade	49,57	umidade	52,10

Fonte: Autor, 2019.

A umidade responsável pelo menor teor de umidade em que o solo se comporta plasticamente se determina fazendo a média das umidades encontradas para as amostras, de acordo com a Equação 4.

$$W = \frac{w_1 + w_2 + w_3 + w_4}{4} \qquad (4)$$

$$W = \frac{46{,}74 + 49{,}57 + 50{,}62 + 52{,}10}{4}$$

W= 49,76%

5.1.5 Índice de Consistência

O índice de consistência dos solos deve ser obtido utilizando a Equação 2. Assim, o índice de consistência encontrado para o solo estudado é de 5,51, apresentando, portanto, consistência rija, ou seja, o solo apresenta uma predominância de grãos de quartzo e feldspato, característica que ajuda a confirmar a classificação de Areia.

5.1.6 Índice de Plasticidade

O índice de plasticidade dos solos deve ser obtido utilizando-se a Equação 3. O resultado final deve ser expresso em porcentagem. Dessa forma, o índice de plasticidade encontrado para o solo estudado é de 4,48%, solo com baixa plasticidade, ou seja, devido ao baixo percentual de argila e silte, visto que os grãos finos são os responsáveis por dar trabalhabilidade e plasticidade ao solo.

5.1.7 Peso Específico do Solo

Para realizar a determinação do peso específico do solo, foi feito o ensaio laboratorial utilizando-se um picnômetro. Para assegurar a integridade do ensaio, este foi embasado na norma NBR 6458 (2016).

Para o solo estudado, foram encontrados os valores apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Peso Específico do Solo

Peso Específico dos Grãos	
Picnômetro + água destilada	490,41 g
Solo	44,81 g
Picnômetro + solo + água destilada	518,45 g
Volume de água deslocada	16,77 cm^3
Massa específica do solo	2,672 kg/m^3
Peso específico do solo	**26,72 kN/m^3**

Fonte: Autor, 2019.

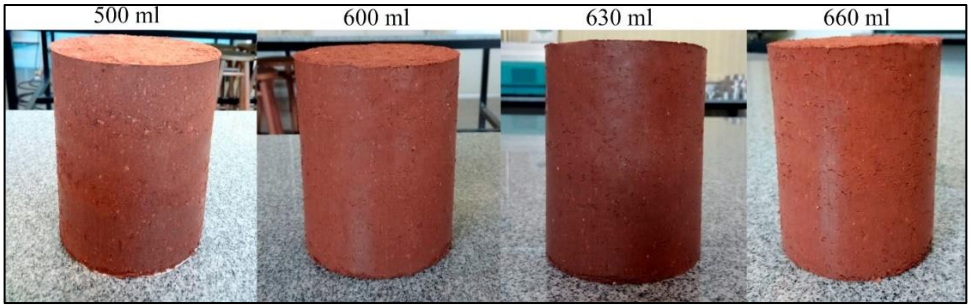
A partir dos dados referenciados, pode-se concluir que o peso específico do solo está de acordo com o esperado para solos arenosos.

5.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

5.2.1 Ensaio de Compactação Proctor Normal

Para realizar o ensaio de compactação Proctor normal, necessitou-se descobrir a quantidade de água a ser adicionada ao solo para se chegar a uma umidade de partida, para tanto partiu-se da determinação da umidade natural do solo que no momento se encontrava em 5%. O objetivo inicial foi iniciar o ensaio com 30% de água, contudo muitas dificuldades surgiram, pois o solo estudado apresentou a característica de absorver uma grande quantidade da água adicionada, não permitindo que a umidade se elevasse. A aparência dos solos compactados em relação a adição de água pode ser vista na Figura 19, a diferença de cor entre os 630 ml e os 660 ml deu-se pela luminosidade do local e não por quantidade de água.

Figura 19 - Aparência dos CPs de solo



Fonte: Autor, 2019.

Devido a isso, os resultados do ensaio de compactação seriam cinco valores de umidade do solo e seus respectivos pesos específicos secos calculados. Mas em frente às dificuldades (observou-se nos quatro CPs da Figura 19 que com o aumento de sua umidade houve uma queda em seus pesos específicos), sete valores acabaram sendo calculados (foram acrescentados três CPs com umidades inferiores para que se enquadrassem no ramo seco do gráfico) e estão previstos na Tabela 10.

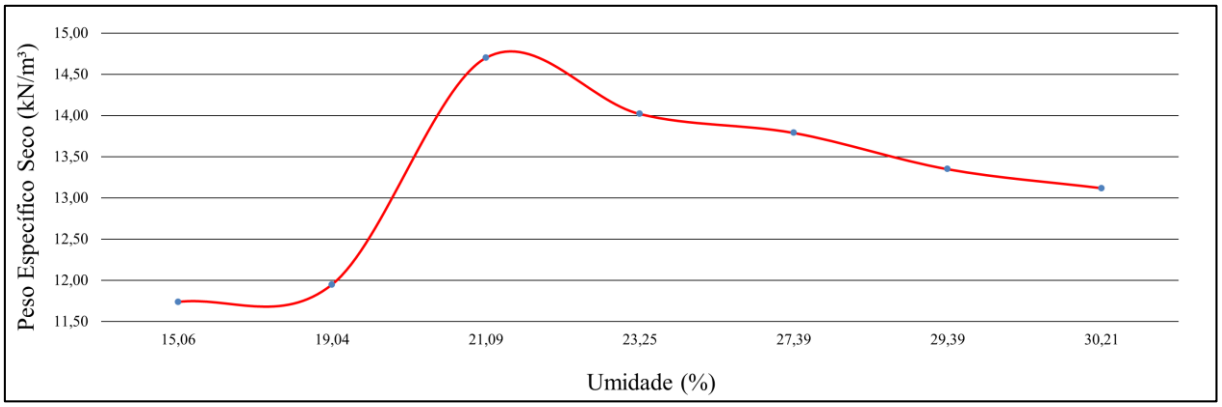
Tabela 10 - Resultados do Ensaio de Compactação

Peso Específico Seco (kN/m³)	**Média Umidade (%)**
11,74	15,06
11,95	19,04
14,70	21,09
14,02	23,25
13,79	27,39
13,35	29,39
13,12	30,21

Fonte: Autor, 2019.

Com base nos valores obtidos foi possível a construção da curva de compactação (Figura 20), necessária para obter o valor da umidade ótima do solo.

Figura 20 - Curva de Compactação do solo



Fonte: Autor, 2019.

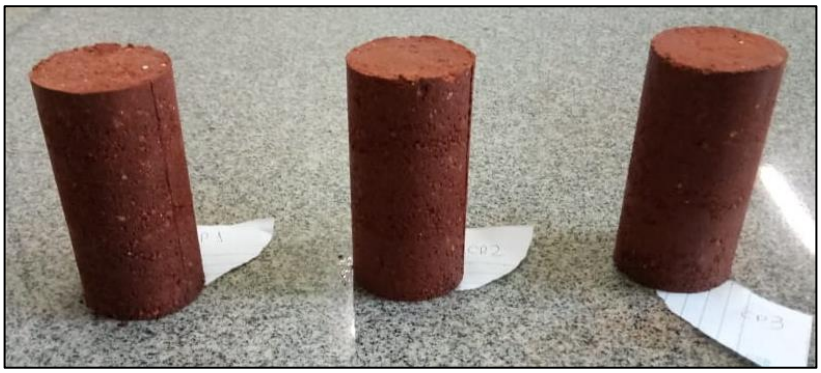
A umidade ótima do solo ficou determinada como a umidade para qual os CPs apresentaram maior peso específico seco, correspondendo a 21% e o peso especifico de 14,7 kN/m³. Além disso, observa-se do gráfico que os últimos quatro pontos são os mesmos apresentados pelos CPs da Figura 19.

5.2.2 Ensaio de Compressão Simples

Os ensaios de Resistência à compressão simples (RCS) foram realizados moldando corpos de prova em moldes de 10cm de altura e 5cm de diâmetro com energia Normal. Foram moldados três CPs para o solo puro e outros três CPs para cada teor de emulsão asfáltica (2 e 4%). Para gerar os CPs com emulsão, inicialmente optou-se por umedecer o solo e então acrescentar a emulsão ao solo. Entretanto percebeu-se que ela não se homogeneizava completamente ao solo, gerando pequenos aglomerados de emulsão e essa falta de adesão se comprovou ao realizar o ensaio de compressão, pois este obteve um resultado inferior ao para solo puro. Então, foi decidido utilizar metade da água para umedecer o solo e a outra metade foi misturada com a emulsão em um frasco, afim de colaborar para a completa adesão aos grãos o que pode ser comprovado pela ausência dos aglomerados presentes na mistura anterior. Para fins de parâmetro, o valor médio da resistência à compressão simples para cada teor de emulsão, foi comparado ao valor obtido para o solo sem emulsão asfáltica.

Para o ensaio de compressão com o solo puro, tomou-se três corpos de prova moldados na umidade ótima (Figura 21) que foram rompidos, posteriormente, no aparelho Marshall.

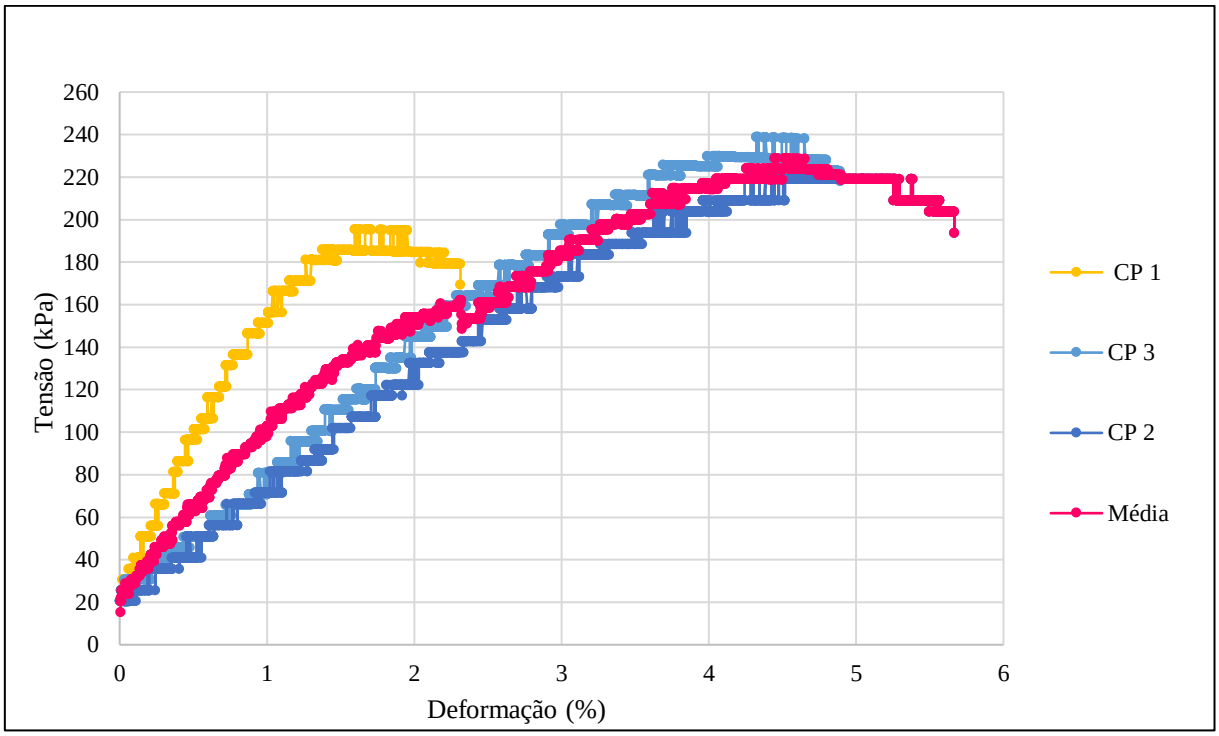
Figura 21 - CPs de solo puro



Fonte: Autor, 2019.

Com os resultados do ensaio de compressão, foi possível gerar uma curva de tensão por deformação para cada um dos CPs e por fim uma curva média das três outras curvas. As curvas geradas pelo solo puro podem ser observadas na Figura 22.

Figura 22 - Curva média de compactação para solo puro



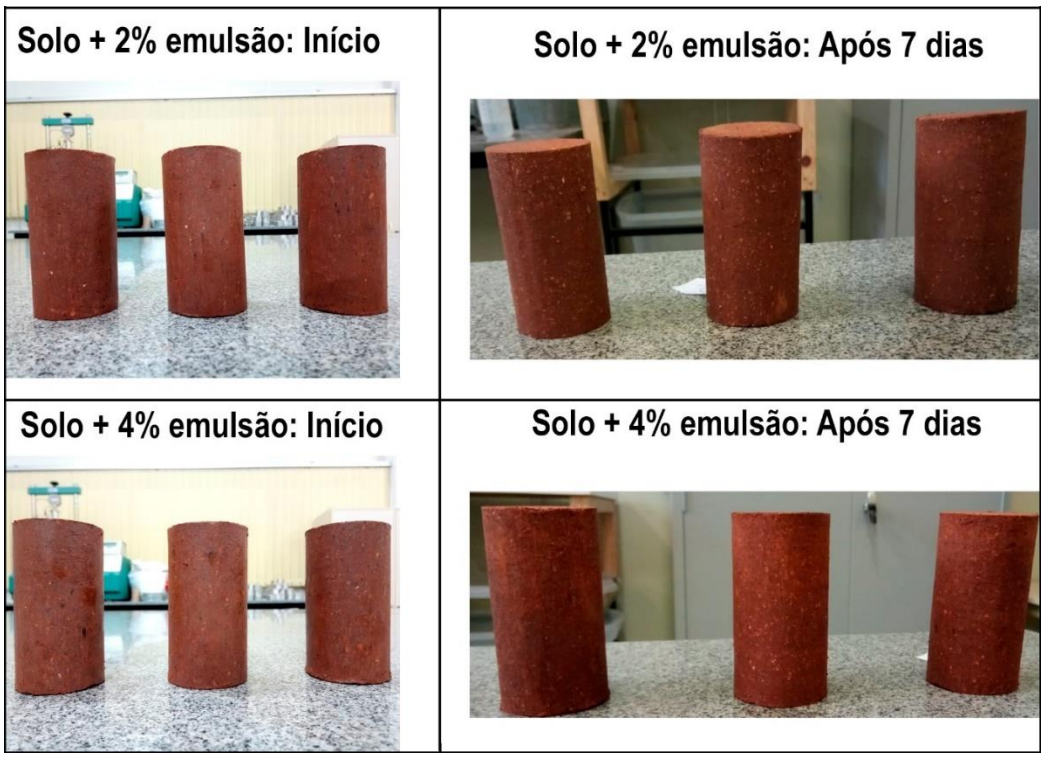
Fonte: Autor, 2019.

Com o ensaio realizado no solo puro, observou-se a baixa tensão suportada por ele cargas na faixa de 30 a 35 kg, ou seja, aproximadamente 229 kPa. Após obter os resultados de compressão suportados pelo solo em seu estado puro, foi possível ter um parâmetro de comparação para os ensaios que viriam a ser realizados utilizando a emulsão asfáltica.

Inicialmente tinha-se o planejamento de realizar o ensaio com as dosagens de emulsão sem o tempo de cura. Contudo, após o primeiro ensaio realizado com emulsão asfáltica, observou-se que, apesar de ter havido um aumento de coesão no solo, houve uma queda no valor de tensão suportado durante o ensaio de compressão, não sendo, portanto, o resultado desejado para essa mistura, visto que se buscava um aumento de resistência.

Tendo em vista os resultados insatisfatórios obtidos pelo rompimento dos CPs sem tempo de cura, optou-se por realizar os ensaios com tempo de cura de sete dias ao ar livre. A aparência dos CPs gerados pela mistura solo+emulsão no inicio e após os sete dias podem ser vistos na Figura 26.

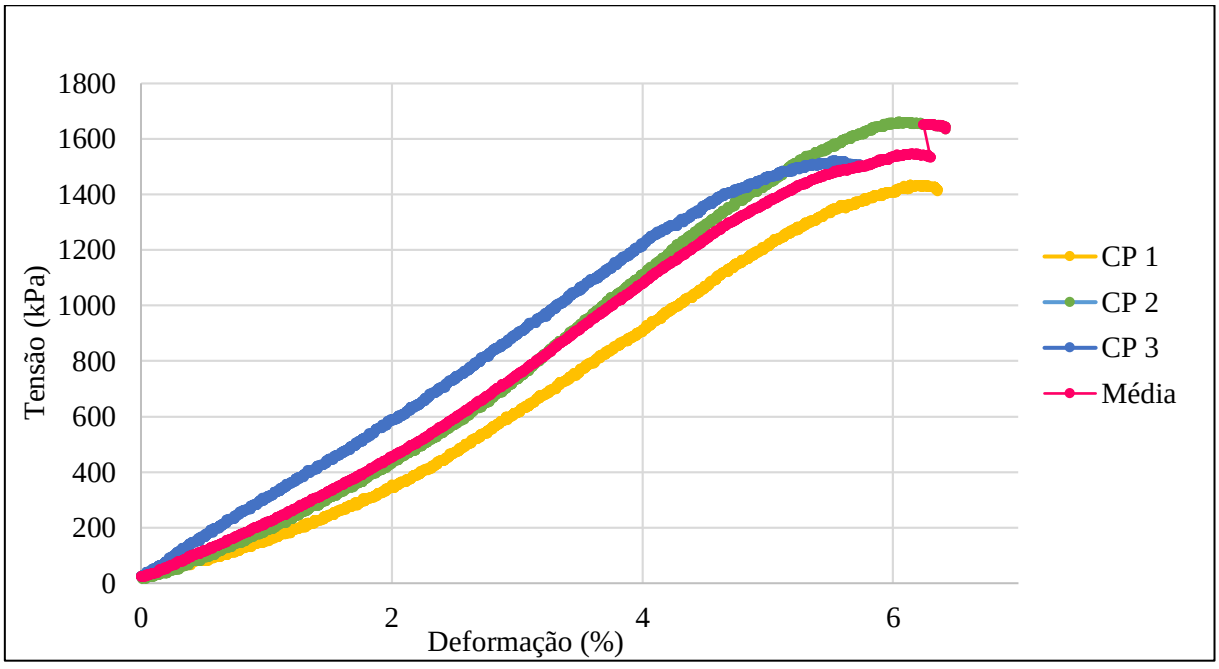
Figura 23 - Aparência dos CPs com emulsão antes e depois dos sete dias de cura



Fonte: Autor, 2019.

Os resultados obtidos no rompimento dos novos CPs para a mistura solo com 2% de emulsão asfáltica, bem como a curva média deles podem ser observados na Figura 24.

Figura 24 - Média dos CPs de solo com 2% emulsão

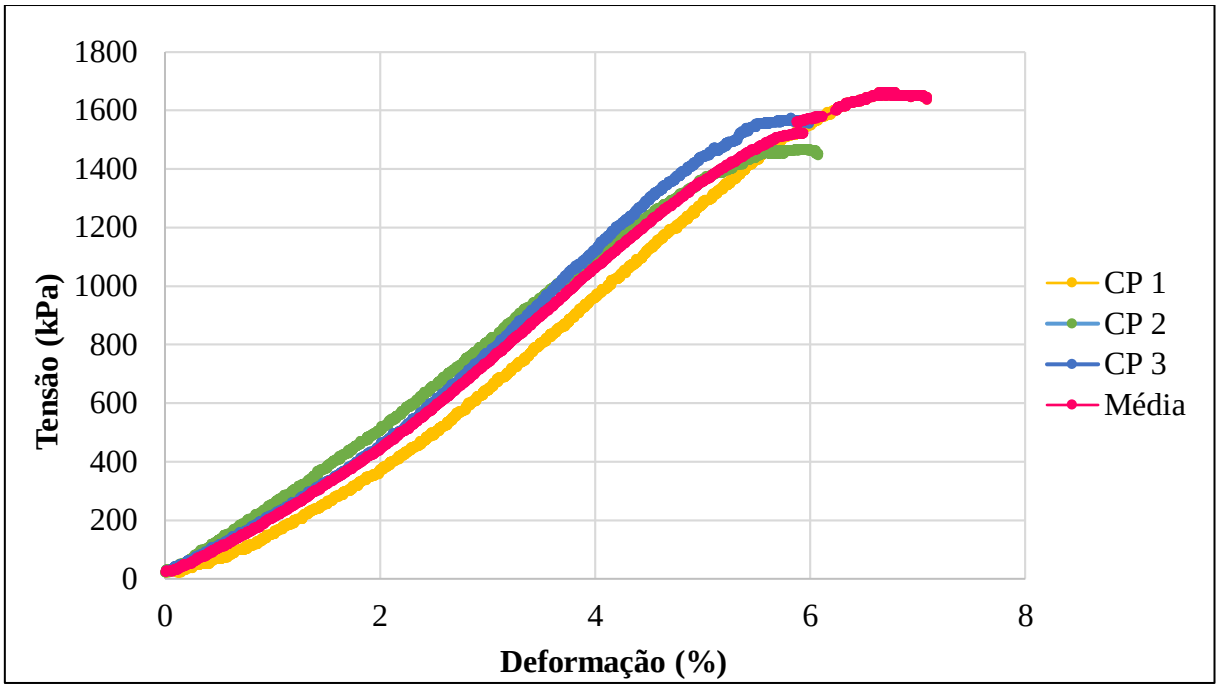


Fonte: Autor, 2019.

Com base no gráfico gerado pela compressão da mistura solo e 2% de emulsão foi possível observar que a emulsão, somada ao tempo de cura, elevou a resistência do solo em relação ao mesmo puro, obtendo-se valores médios de tensão de 1652,22 kPa.

Após obter os resultados apresentados pelas curvas, foi realizado o ensaio para os CPs de solo com 4% de emulsão que resultaram em três curvas de tensão por deformação (uma para cada CP rompido) e mais uma curva responsável pela curva média. Os resultados podem ser observados nas Figuras 25.

Figura 25 - Média dos CPs de solo com 4% emulsão

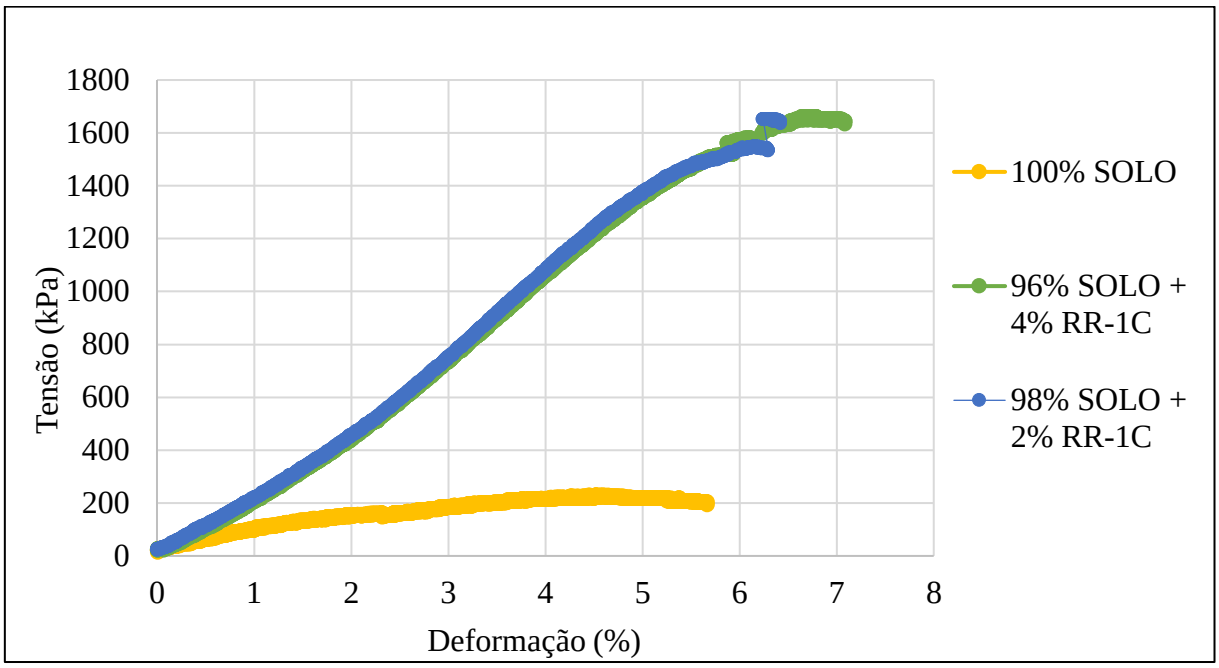


Fonte: Autor,2019.

Ao finalizar a análise dos dados das amostras para o teor de emulsão de 4%, observou-se que a resistência quando em relação aos 2% se manteve praticamente inalterado. Tendo em vista os resultados obtidos, constatou-se que não há necessidade de se investir em uma quantidade maior de emulsão, visto que 2% de emulsão se mostraram suficientes para elevar consideravelmente a resistência da mistura.

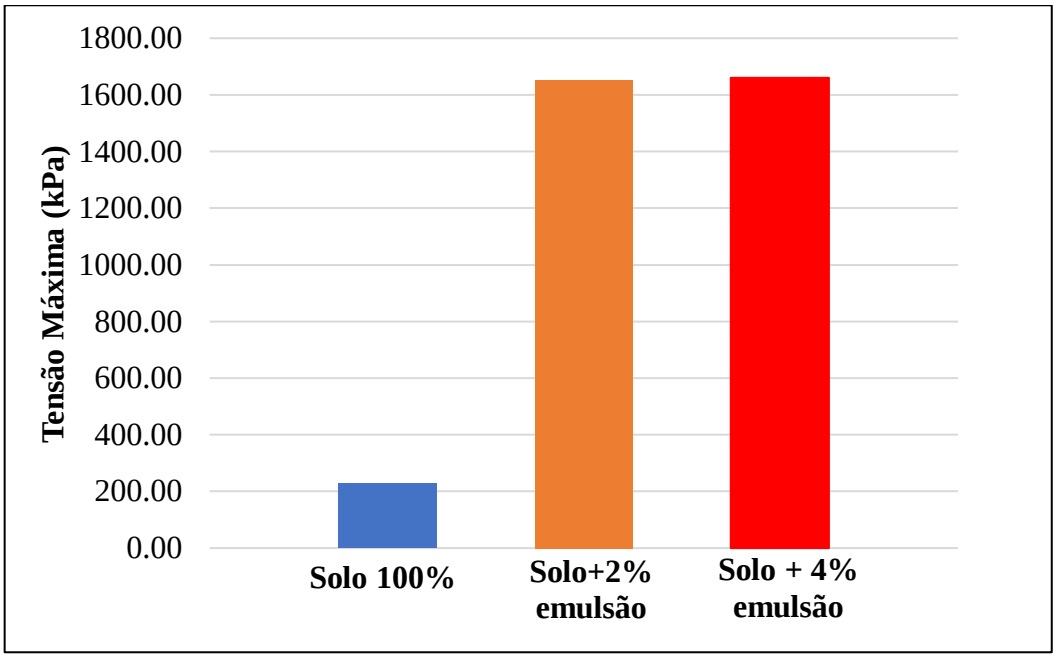
Após observados os dados anteriores, optou-se por construir mais dois gráficos com os resultados comparativos entre as curvas tensão por deformação geradas para a mistura e o solo puro, como pode ser visto nas Figuras 26 e 27.

Figura 26- Tensão x Deformação



Fonte: Autor, 2019.

Figura 27 - Tensões Máximas



Fonte: Autor, 2019.

Com base na Figura 27 é possível perceber que a inserção da emulsão, somado ao tempo de cura, aumentou a resistência do solo em aproximadamente sete vezes quando comparado à

resistência do solo puro. O resultado também permite averiguar que não há necessidade de se utilizar do teor de 4%, visto que a diferença foi tão ínfima que não vale o gasto com o material.

Os ensaios realizados nesse trabalho foram baseados em diversos outros estudos. O principal trabalho acadêmico que teve participação nas decisões tomadas para a realização dos ensaios feitos nesse estudo, foi o de Soliz (2007) que utilizou um solo classificado como arenoso, uma emulsão do tipo RM-1C (Emulsão Catiônica de Ruptura Média) e tempo de cura de sete dias para teores de umidade de 0, 2, 4 e 6%. Nesse caso, se obtiveram resultados não favoráveis e a bibliografia pesquisada indicava que para este tipo de solo (arenoso) os valores de emulsão deveriam ser menores, então, passou-se a ensaiar CPs com 1, 2 e 3% de RM-1C com tempos de cura de 7 e 28 dias. Essa nova leva de ensaios trouxe a conclusão que o solo reagiu melhor, ou seja, maior valor de resistência a compressão simples, para o teor de emulsão de 1% de RM-1C.

Da mesma forma o solo estudado nesse trabalho é arenoso e com a realização dos ensaios, se observou que, sem o tempo de cura, a resistência da mistura se mostrou inferior a do solo puro, e apesar de apresentar uma coesão maior, a emulsão pareceu agir como um lubrificante. Entretanto, ao adicionar um tempo de cura à mistura a resistência e a coesão se elevaram muito. Além disso, um mês após romper os corpos de prova, foi possível observar que os CPs de solo perderam a coesão e muitas bordas já estavam se soltando, enquanto os CPs em que foi adicionada a emulsão, apresentavam a mesma consistência firme de quando foram rompidos, apresentando apenas uma diferença de coloração devido à perda de umidade.

6 CONCLUSÕES

Ao concluir esse trabalho, observou-se que a resistência obtida pelo solo, utilizando a emulsão asfáltica justifica o uso desse material. Contudo, por haver outros meios de estabilização mais baratos, considera-se interessante o uso de emulsão asfáltica quando se tratar de uma rodovia ou pista de rolamento que sofrerá ou sofre a ação de grandes cargas, afim de evitar a movimentação do solo do subleito, resultando em uma maior estabilidade do revestimento. Além disso, notou-se que a adição de emulsão a um solo arenoso melhora as características de coesão e de impermeabilidade.

O tempo de cura mostrou ser um fator importante, visto que as amostras submetidas a ruptura imediata sofreram uma leve queda em sua resistência, enquanto as que tiveram um período de cura aumentaram sua resistência em aproximadamente sete vezes.

Para analisar o comportamento mecânico do solo estudado foi utilizado o ensaio de resistência a compressão simples. Com base nos resultados encontrados, verificou-se que a resistência está diretamente ligada à umidade da mistura. A maneira de adicionar a água (dispersa no solo, diluída na emulsão ou uma mescla das duas) também interfere nos resultados.

Percebeu-se, também, que o teor de emulsão adicionado, juntamente à presença, ou não, de um período de cura foi a característica que mais interferiu nos resultados de resistência, visto que quando foi adicionada uma quantidade maior de emulsão sem um período de cura, os resultados apresentaram uma queda na resistência, enquanto ao adicionar a um valor menor de emulsão, um período de cura de sete dias, a resistência aumentou expressivamente se comparado ao solo puro, além de colaborar para o aumento de coesão do solo.

Com o estudo dos resultados, também se conclui que não há necessidade da compra de maiores quantidades de emulsão para atender a demanda de 4% de emulsão, visto que os resultados para 2 e 4% se mostraram muito próximos. Além disso, observou-se que misturar a emulsão em uma quantidade de água de diluição antes de aplicar ao solo tornou a mistura mais homogênea sem a formação de aglomerados de emulsão.

REFERÊNCIAS

_____. **NBR 12770**: Solo coesivo - Determinação da resistência à compressão confinada. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 6457**: Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água.

_____. **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016, versão corrigida 2017.

_____. **NBR 7175**: cal hidratada para argamassas. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 7180:** Solo - Análise granulométrica.

_____. **NBR 7180**: Solo – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7182**: Solo – ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7217**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ABEDA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO. **Manual básico de emulsões asfálticas. Soluções para pavimentar sua cidade.** 1. Ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2001.

ARRIVABENE, B. S. **Alternativas para Estabilização Granulométrica e Química de Solo de Estradas Florestais**. 2017. Tese de Pós-graduação, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) – **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016, versão corrigida 2:2017.

BALBO, J.T. **Pavimentação asfáltica:** materiais, projeto e restauração. Ed. Oficina de textos: São Paulo, Brasil, 2007.

BERNUCCI, L. B. *et al*. **Pavimentação asfáltica:** formação básica para engenheiros. 1º ed. (3º reimp.). Rio de Janeiro: Petrobras, Abeda, 2008.

BRESSANI, L. A.; FLORES, J. A. A.; NUNES, L. F.; 2005. **Desenvolvimento de estudos de engenharia geotécnica/geologia com vistas à geração de relatório e mapa geotécnico dos solos e rochas superficiais da área urbana da cidade de Caxias do Sul.** Relatório Final, Prefeitura Municipal de Caxias o Sul.

CARVALHO, Carlos Alexandre B. et al. **A experiência da ufv no emprego de estabilizantes químicos em estradas florestais.** In: 6º SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL.

CONFEDERAÇAO NACIONAL DO TRANSPORTE (2007). **Relatório Anual dos Transportes.** Disponível em: www.cnt.org.br. Acesso em: 28 out. 2018.

CONSOLI, Nilo; ROSA, Daniela A.; CRUZ, Rodrigo C.; DALLA ROSA, Amanda. **Water Content and Voids/Cement Ratio as Parameters Controlling Strength of Artificially Cemented Clays**, 2011.

CRISTELO, N.M.C. **Estabilização de Solos Residuais Graníticos através da adição de Cal.** Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil) - Universidade de Minho, Braga - Portugal, 2011.
DAER/RS – Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem. **Especificações Gerais**, 1998.
DALLA ROSA, Amanda. **Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2009.

DAVID, Daniela de. **Misturas asfálticas recicladas à frio:** estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsionado. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2006.

DER - Departamento de Estradas de Rodagem. **Instrução de pavimentação**. Janeiro de 2006.

DIAS, J. J. F. M S. **Tratamento de solos com cimento para obtenção de melhores características mecânicas.** Dissertação (Mestrado). Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2012.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de pavimentação**. 3rd ed. Rio de Janeiro: DNIT; 2006.

FARIAS, E. R. **A utilização de misturas solo/cinza pesada na pavimentação** - análise de aspectos de comportamento mecânico e ambiental**.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2005.

GANDOLFI, Guilherme G; CARDOSO, Letícia S. **Estudo da estabilização química do tipo solo-emulsão em solo tropical laterítico granular utilizado em obras de pavimentação.** Trabalho de conclusão de curso, Engenharia Civil. Universidade Federal de Goias, Brasil, 2013.

GONDIM, L. M. **Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do agropolo do baixo Jaguaribe/estado do Ceará.** 2008.213 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Transportes) – Programa de Mestrado em Engenharia dos Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

GORSKI, Cristina Maria F. M. **Estabilização de Solos Argilosos com Ligante Hidráulico LIPIDUR DS.** Dissertação (Mestrado). Universidade da Beira Interior. Covilhã, Portugal, 2010.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal** – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil. 2ª ed. São Paulo: PINI, 2002.

HUNTER, R.N. **Asphalts in road Construction**. London: Thomas Telford Ed., 2000.

IBP (INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO). **Informações básicas sobre materiais asfálticos**. Rio de Janeiro: IBP – Comissão de asfalto, 1999.

JACINTHO, Elza Conrado. **Estudo do Comportamento de Misturas Solo-Emulsão para Uso em Barragens**. 2005. 160 f. Dissertação de M. Sc., Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.

KÉZDI, Á. **Stabilized earth roads:** developments in geotechnical engineering. Amisterdam: Elserier, 1979.

LIMA, D.C.; BUENO, B.S.; SILVA, C.H.C. **Estabilização dos Solos II** (Técnicas e Aplicações a Solos da Microrregião de Viçosa). Viçosa-MG, Imprensa Universitária, Universidade Federal de Viçosa, Publicação no. 333, 1993.

LIMA, D.C.; ROHM, S.A.; BARBOSA, P.S.A. **Estabilização dos Solos III** (Misturas Solo-Cal para Fins Rodoviários). Viçosa-MG, Imprensa Universitária, Universidade Federal de Viçosa, 1993.

LOVATO, R.S. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2004.

MATTOS, A.B.G. **Estabilização de solo com betume.** In: RAP, 25,1991, São Paulo, Anais. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 1991.

McCARTHY, D. F. P. E. **Essential of soil mechanics and foundations**. Virginia: Reston Publishing Company, 1977.

MEDINA, J., MOTTA, L. M.G. **Mecânica dos Pavimentos**, (2ª edição). Editora COPPE, Rio de Janeiro, RJ, 2005.

MICELI JR, G.; MOTTA, L. M. G.; OLIVEIRA, J. R. M. S.; VIERA, A**. Comportamento de Dois Solos do Estado do Rio de Janeiro Estabilizados com Emulsão Asfáltica**. In: 37a REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO/ 11º ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, ABPv, Goiânia, GO, 2006.

MICELI, Junior Giuseppe. **Comportamento de Solos do Estado do Rio de Janeiro Estabilizados com Emulsão Asfáltica**. 2006. 256 f. Dissertação de M. Sc. Instituto Militar de Engenharia, IME, Rio de Janeiro.

MOLINA JR,W. F. **Comportamento Mecânico do Solo em Operações Agrícolas.** Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" ESALQ / USP. 2017.

MOREIRA, E. D. **Desempenho de dois trechos de solo-emulsão em vias de baixo trafego.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, 2010.

NOGUEIRA, C. **Pavimentação:** projeto e construção. Rio de Jaaneiro: Ao livro técnico, 1961.

NUNEZ, W. P. **Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu visando seu emprego na pavimentação.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 1991.

PALMEIRA, E. M. (1990). **Melhora de Solos.** Publicação GA 001ª/90, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

PEREIRA, R. S. **Viabilidade Técnica do Empreso de Resíduos da Indústria de Celulose para Construção de Estradas Florestais**. 2005. Tese de Pós-graduação, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.

PINTO, Carlos de Souza. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**, 2000.

REBELO, E.P. **Estudo de mistura solo-emulsão para a região de Urucu (Coari-AM).** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Amazonas, Amazonas, Brasil, 2009.

ROSSI, A. C. **Etapas de uma obra de pavimentação e dimensionamento de pavimento para uma via na ilha do fundão.** Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2017.

SANTOS, Janaína. **Estabilização de uma argila laterítica do distrito federal para uso em rodovias de baixo volume de tráfego.** Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília, Brasil, 2004.

SANTOS, W. J. **Avaliação do uso de emulsão asfáltica na estabilização química de três solos de Sergipe.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2009.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação.** 1º ed. São Paulo: Pini, 1997. V. 1.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação.** 1º ed. São Paulo: Pini, 2001. V. 2.

SHELL. **The shell bitumen handbook**. 5. ed. Cambridge, 2003.

SHERWOOD, P. **Effect of sulfates on cement and lime stabilized soils, Highway Research Board,** bulletin 353, Washington, 1962.

SHERWOOD, P. **Soil Stabilization with Cement and Lime** – State of the Art Rewiew, Transport Research Laboratory, HMSO, London, 1995.

SILVA, A. C. S. **Caracterização geotécnica por meio das metodologias SUCS e TRB para os principais solos encontrados em Palmas – TO.** Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Civil, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, Tocantins, 2017.

Site Geotecnia e Fundação. **Terraplenagem: compactação de solos.** Disponível em: <https://sites.google.com/site/geotecniaefundacao/terraplenagem/compactacao-de-solos> Acesso em: 10 de abril de 2019.

SOLIZ, V. V. P. **Estudo de três solos estabilizados com emulsão asfáltica.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.

THIER, L. H. **Comportamento mecânico de um solo residual de dacito da área urbana de Caxias do Sul – RS.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2017.

THULER, R. B. **Estudo de Solos do Estado do Rio de Janeiro para Aplicação em Rodovias de Baixo Volume de Tráfego**. 2005. 125 f. Tese, COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

YODER, E.J. & WITCZAK, M.W. (1975). **Principles of Paviment Design**. John Wiley & Sons, INC, New York.