



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS – CTRN
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL – UAEC

STELLA BEATRICE SOARES DE ALMEIDA

UTILIZAÇÃO DE MATERIAL PROVENIENTE DE FRESAGEM NA COMPOSIÇÃO DE
CAMADAS DE BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

CAMPINA GRANDE

2019

STELLA BEATRICE SOARES DE ALMEIDA

UTILIZAÇÃO DE MATERIAL PROVENIENTE DE FRESAGEM NA COMPOSIÇÃO DE
CAMADA DE BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Campina Grande –
UFCG, para encerramento do componente
curricular e conclusão da graduação em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena

Coorientador: Eng.º Paulo Roberto Barreto Torres

CAMPINA GRANDE - PB

2019

FOLHA DE APROVAÇÃO

STELLA BEATRICE SOARES DE ALMEIDA

**UTILIZAÇÃO DE MATERIAL PROVENIENTE DE FRESAGEM NA COMPOSIÇÃO DE
CAMADA DE BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Campina Grande –
UFCG, para encerramento do componente
curricular e conclusão da graduação em
Engenharia Civil.

Aprovada em: 24 de julho de 2019.

BANCA EXAMINADORA

_____ Nota: _____

Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena – Orientador – Universidade Federal de
Campina Grande

_____ Nota: _____

Eng.º Paulo Roberto Barreto Torres – Coorientador – Universidade Federal de Campina
Grande

_____ Nota: _____

M.e Paulo Germano Tavares Marinho Filho – Membro Interno – Universidade Federal de
Campina Grande

_____ Nota: _____

M.^a Jeovanesa Régis Carvalho – Examinador externo – Universidade Federal de Campina
Grande

AGRADECIMENTOS

Ao término de toda jornada devemos olhar para trás e reconhecer aqueles que foram tão importantes para a concretização desta conquista, assim, agradeço inicialmente a Deus, o autor de toda ciência, pela sua graça derramada sobre mim em todos esses anos de graduação.

Agradeço também aos meus pais Maria do Carmo e Marcelo, que sempre prezaram pelos meus estudos e não mediram esforços para que eu chegasse a esta etapa de minha vida acadêmica.

Agradeço a minha família, aos meus irmãos Lucas e Eduarda que sempre me apoiaram e às minhas avós Judite e Lourdes que me ensinaram valores pelos quais sou eternamente grata.

Aos meus companheiros durante todos esses anos de graduação, em especial a Cleydson, Jéssica, Higor, Thiago e Alana que tornaram essa experiência mais leve e me incentivaram a sempre buscar melhorar, como pessoa e como estudante.

Às minhas amigas Laís, Evelyn e Luciana, que me ensinaram a importância de mantermos vivos os laços afetivos.

Ao meu orientador, professor Adriano, pela sua enorme demonstração de paciência e zelo durante esta pesquisa, agregando seu conhecimento neste trabalho de orientação, e dando-me a atenção necessária em todos os momentos, sempre disposto a sanar as mais diversas dúvidas que surgiram.

Ao meu coorientador Paulo, por toda disposição em tirar minhas dúvidas e me ajudar em todos os momentos que precisei.

À toda equipe do Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da UFCG, em especial a Jadilson, Ildinho e Mateus, por toda ajuda durante a realização desta pesquisa.

Aos membros da banca examinadora, pela sua disposição e dedicação de seu tempo para contribuição neste trabalho.

Finalmente, a todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram ou acompanharam-me nessa jornada, o meu muito obrigada.

RESUMO

Os serviços de restauração de pavimentos geram uma grande quantidade de material fresado, material com alto potencial construtivo, oriundo de recursos naturais com disponibilidade cada vez mais reduzida. Este material pode ser reciclado para uso como material de pavimentação, como por exemplo, na estabilização granulométrica de camadas estruturais dos pavimentos, serviço em que se utiliza agregados minerais de desempenho semelhante ao oferecido pelo material fresado, entretanto, muitas vezes é desperdiçado, não tendo uma destinação final ecologicamente correta. Esta pesquisa avalia a eficácia da utilização do material fresado na estabilização de solos para composição de camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis. Para isto, foram realizados ensaios de caracterização física e mecânica do solo utilizado na pesquisa e de uma mistura de 45% deste solo e 55% de material fresado, teores estes definidos através da estabilização granulométrica dos materiais, visando enquadrar a mistura em uma das faixas granulométricas especificadas pelo DNIT para bases estabilizadas granulometricamente (DNIT ES 141/2010). A adição do material fresado ao solo proporcionou um incremento das propriedades mecânicas, em termos de módulo de resiliência. Assim, a adição de material fresado, estudada nesta pesquisa, mostrou-se eficaz na estabilização do solo estudado.

Palavras-chave: Módulo de resiliência; estabilização de solos; reciclagem de pavimentos.

ABSTRACT

The pavement restoration services generate a large amount of reclaimed asphalt pavement, material with high constructive potential, coming from natural resources with increasingly reduced availability. This material can be recycled for use as a pavement material, for example, in the granulometric stabilization of pavement layers, a service in which mineral aggregates of similar performance to that offered by reclaimed asphalt pavement are used, however, it is often wasted, not having an ecologically correct final destination. This research evaluates the effectiveness of the use of reclaimed asphalt pavement in the stabilization of soils for composition of base and subbase layers of flexible pavements. For this, physical and mechanical characterization of the soil used in the research was carried out, and a mixture of 45% of this soil and 55% of reclaimed asphalt pavement were determined, through the stabilization of the granulometry of the materials, aiming to frame the mixture in one of the bands granulometrically specified by DNIT for granulometrically stabilized bases (DNIT ES 141/2010). The addition of reclaimed asphalt pavement to the soil provided an increase of the mechanical properties, in terms of resilient modulus. Thus, the addition of reclaimed asphalt pavement, studied in this research, proved to be effective in the stabilization of the studied soil.

Keywords: Resilient modulus; soil stabilization; pavement recycling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Constituição da estrutura e distribuição das tensões em um pavimento rígido e num pavimento flexível.....	5
Figura 2 – Camadas que compõem a estrutura de um pavimento flexível.....	6
Figura 3 – Camadas que compõem a estrutura de um pavimento rígido	7
Figura 4 – Sobreposição de revestimentos asfálticos sem a retirada das camadas anteriores.....	9
Figura 5 – Materiais utilizados na pesquisa: (a) Solo; (b) Material fresado	16
Figura 6 – Local de coleta do material visto por satélite.....	16
Figura 7 – Fresadora na rodovia BR-230/PB	17
Figura 8 – Ensaios para avaliação das características físicas dos materiais utilizados na pesquisa.....	18
Figura 9 – Aparelho Casagrande durante ensaio de Limite de Liquidez	20
Figura 10 – Amostras de solo em picnômetro submetidas a vácuo	20
Figura 11 – Aparelho extrator de betume.....	21
Figura 12 – Rice Test em execução.....	22
Figura 13 – Procedimentos de compactação do solo	23
Figura 14 – Cilindro tripartido e corpos de prova moldados	24
Figura 15 – Corpo de prova no equipamento triaxial de carga repetida	24
Figura 16 – Curva granulométrica do solo	25
Figura 17 – Gráfico do Limite de Liquidez.....	26
Figura 18 – Curva granulométrica do material fresado.....	27
Figura 19 – Curva granulométrica do material fresado após a extração	28
Figura 20 – Granulometria do material obtido e da faixa “B” para bases estabilizadas granulometricamente	30
Figura 21 – Curvas de compactação do solo e da mistura de solo e material fresado	31
Figura 22 - Módulo de Resiliência do Solo Puro em função dos modelos clássicos (a) MR x Tensão de confinamento (b) MR x Tensão desvio e em função do modelo composto (c) MR x Tensão de Confinamento x Tensão Desvio	33
Figura 23 – Módulo de Resiliência da Mistura de Solo e Material Fresado em função dos modelos clássicos (a) MR x Tensão de confinamento (b) MR x Tensão desvio e	

em função do modelo composto (c) MR x Tensão de Confinamento x Tensão Desvio	34
Figura 24 – Valores de MR para amostra de solo e de solo com adição de material fresado.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Granulometria do material de bases estabilizadas granulometricamente .	29
Tabela 2 – Granulometria resultante da mistura de 55% de material fresado e 45% de solo em comparação com a faixa “B” do DNIT	29
Tabela 3 – Umidades ótimas e pesos específicos aparentes secos máximos do solo e da mistura de solo e material fresado	31
Tabela 4 – Dados obtidos no ensaio de módulo de resiliência.....	32
Tabela 5 – Parâmetros de modelagem e coeficientes de determinação	35
Tabela 6 – Parâmetros do modelo composto para os materiais desta pesquisa e de outros autores.....	36
Tabela 7 – Valores usuais de módulo de resiliência	37
Tabela 8 – Valores médios de módulo de resiliência para diversos tipos de solo	38
Tabela 9 – Módulos de Resiliência médios obtidos em diferentes pesquisas	39

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Normas utilizadas para caracterização física dos materiais	18
Quadro 2 – Normas utilizadas para caracterização mecânica dos materiais	22

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

σ_3 – Tensão de Confinamento

σ_d – Tensão de Desvio

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM - American Association of State Highway and Transportation Officials

BGS – Brita graduada simples

CBR – Índice de Suporte Califórnia

CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente

Cc – Coeficiente de Curvatura

CNT – Confederação Nacional do Transporte

CNU – Coeficiente de Não Uniformidade

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

HRB – Highway Reserach Board

k – Parâmetros de modelagem

LEP – Laboratório de Engenharia de Pavimentos

MR – Módulo de Resiliência

NBR – Norma Brasileira

R² - Coeficiente de Determinação

SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	2
1.1.1 <i>Objetivo geral</i>	2
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i>	2
1.2 JUSTIFICATIVA	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 PAVIMENTOS	4
2.1.1 <i>Pavimentos flexíveis</i>	5
2.1.2 <i>Pavimentos rígidos</i>	7
2.2 FRESAGEM DE PAVIMENTOS	8
2.2.1 <i>Conceitos</i>	8
2.2.2 <i>Destinação do material fresado</i>	10
2.3 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS	11
2.3.1 <i>Tipos de reciclagem de revestimento asfáltico</i>	11
2.3.2 <i>Utilização de material fresado em misturas asfálticas novas</i>	11
2.3.3 <i>Utilização de material fresado em camadas granulares</i>	12
2.4 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS	13
2.4.1 <i>Estabilização mecânica</i>	14
2.4.2 <i>Estabilização granulométrica</i>	14
2.4.3 <i>Estabilização química</i>	14
3. MATERIAIS E MÉTODOS	16
3.1 MATERIAIS	16
3.1.1 <i>Solo</i>	16
3.1.2 <i>Material fresado</i>	17
3.2 MÉTODOS	17
3.2.1 <i>Avaliação das propriedades físicas</i>	17
3.2.2 <i>Avaliação das propriedades mecânicas</i>	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	25
4.1.1 <i>Massa específica do solo</i>	25

4.1.2	<i>Composição granulométrica do solo</i>	25
4.1.3	<i>Limites de Atterberg</i>	26
4.1.4	<i>Rice test</i>	26
4.1.5	<i>Composição granulométrica do material fresado</i>	27
4.1.6	<i>Percentagem de betume e composição granulométrica do material fresado após extração</i>	27
4.2	DOSAGEM DO MATERIAL FRESADO NA ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DO SOLO	28
4.3	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	30
4.3.1	<i>Compactação</i>	30
4.3.2	<i>Módulo de resiliência</i>	32
5.	CONCLUSÕES	40
	REFERÊNCIAS	41

1. INTRODUÇÃO

As rodovias pavimentadas são a principal via de deslocamento da população brasileira. Ao longo do tempo, o tráfego de veículos provoca o desgaste dos pavimentos destas rodovias, assim, são necessárias manutenções periódicas para garantir o desempenho adequado, já que a qualidade insatisfatória desta estrutura prejudica a economia, segurança e o conforto dos usuários.

Estas manutenções, durante muito tempo, foram realizadas apenas adicionando novas camadas de revestimento, porém para conferir uma maior aderência ao pavimento, nivelar a superfície da pista, e em situações em que se existem limitações quanto às cotas do pavimento acabado, tornou-se notável que a melhor solução seria remover parte do revestimento já existente, para então aplicar a nova camada. De forma a possibilitar a manutenção do greide do pavimento e a reciclagem do material retirado (BONFIM, 2007).

Esta técnica de restauração de pavimentos é denominada fresagem, e consiste no desbaste ou corte de uma ou mais camadas do pavimento, na qual é retirada parte do revestimento asfáltico deteriorado para posterior aplicação de um novo revestimento, por meio de um processo mecânico (DNIT, 2011; GARCÊS et al., 2014).

A recuperação do revestimento asfáltico, utilizando essa técnica, gera uma grande quantidade de material fresado, que é constituído, em geral, de agregado graúdo, agregado miúdo, material de enchimento (fíler) e ligante asfáltico. Este material, pelas suas propriedades nobres, pode ser reutilizado pela reciclagem como material de pavimentação. Entretanto, quando não destinado corretamente ou reaproveitado, o material fresado se torna um passivo ambiental (MARDER E MALYSZ, 2016).

No contexto da necessidade de encontrar um destino ecologicamente correto para o material fresado, reduzindo os impactos ambientais decorrentes de seu descarte inapropriado, surge a reciclagem do revestimento de pavimentos. Uma das vantagens desta destinação em relação à fabricação do revestimento asfáltico novo seria a possibilidade de reutilização dos agregados do material fresado, reduzindo a velocidade de exploração das jazidas minerais e as distâncias de transportes. Gerando, assim, uma maior economia na execução destes pavimentos.

Atualmente, tem sido difundida a possibilidade de utilização do material fresado na camada estrutural de pavimentos. Solução que, além das vantagens econômicas e ambientais, vem mostrando eficácia no aumento da capacidade de suporte dos solos de camada de base e sub-base.

De acordo com Moreira e Pereira (2007), a reciclagem de pavimentos não é uma técnica recente de reabilitação de pavimentos, entretanto ainda precisa ser aperfeiçoada e economicamente justificada. Portanto, o desenvolvimento de pesquisas que validem a aplicação desse método é de suma importância, como forma de dar embasamento para que sua prática seja cada vez mais difundida.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a utilização de material fresado, proveniente das atividades de manutenção e restauração de pavimentos flexíveis, na composição de camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar as propriedades físicas e mecânicas do solo e da mistura de solo e material fresado utilizados na pesquisa;
- Verificar qual o teor de material fresado a ser utilizado para enquadrar o solo estudado em uma das faixas granulométricas exigidas pela norma para bases estabilizadas granulometricamente;
- Estudar o efeito da adição do material fresado nas propriedades mecânicas após estabilização granulométrica do solo;
- Sugerir uma alternativa de utilização do material fresado, propondo uma possível destinação final ambientalmente adequada.

1.2 JUSTIFICATIVA

No contexto em que, cada vez mais, os órgãos ambientais têm intensificado as exigências no que diz respeito aos impactos ambientais em obras civis e seus resíduos, a reciclagem do revestimento asfáltico desponta como uma destinação ecologicamente correta,

que visa reduzir o impacto ambiental causado pela má disposição do material fresado gerado em grande quantidade nas obras de manutenção e restauração de pavimentos rodoviários.

Na execução de obras de pavimentação se utilizam materiais de elevado padrão de qualidade, provenientes de recursos naturais cuja disponibilidade é cada vez mais reduzida. Tais materiais apresentam desempenho e características semelhantes ao oferecido pelo resíduo proveniente de fresagem. Portanto, a não utilização do material fresado resulta no desperdício de material com alto potencial construtivo.

Este potencial foi verificado em estudos, como os realizados por Barros (2013) e Garcês et al (2014), que demonstram que a utilização do material fresado nas camadas granulares contribui para um incremento na resistência do solo em relação ao solo puro. Barros (2013) obteve, para um solo com 50% de material fresado, compactado na energia intermediária, um aumento de cerca de 46% no Índice de Suporte Califórnia (CBR) em relação ao solo local puro. Já Garcês et al. (2014) encontrou para mistura de 70% solo local e 30% material fresado, utilizando energia de compactação normal, um aumento do CBR de 9,5% para 23,70%.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PAVIMENTOS

Pavimento é uma estrutura projetada técnica e economicamente para resistir aos esforços causados pelo tráfego de veículos e pelo clima, e para proporcionar aos usuários melhores condições de rolamento, com conforto, economia e segurança (BERNUCCI et al., 2008).

A estrutura de um pavimento é formada por múltiplas camadas de espessura finitas. Seu comportamento estrutural dependerá da espessura e rigidez de cada uma dessas camadas, da interação entre elas e do subleito (fundação sobre a qual essas camadas estão assentadas). Essa estrutura é planejada para receber e transmitir esforços de forma a aliviar as pressões sobre as camadas inferiores, que geralmente são menos resistentes (BALBO, 2007; BERNUCCI et al., 2008).

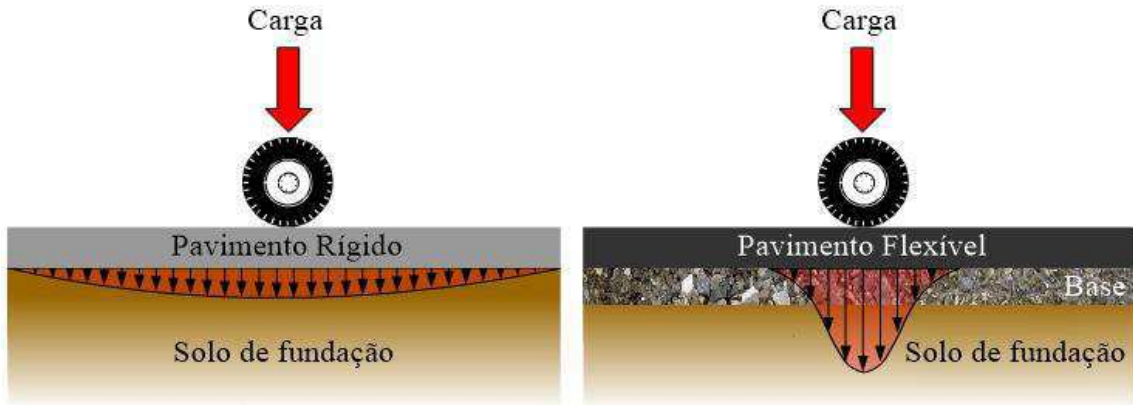
Historicamente, os pavimentos têm sido divididos em duas grandes categorias: rígidos ou flexíveis. Segundo Francisco (2012), a escolha entre o tipo de pavimento a ser utilizado dependerá da intensidade do tráfego, da resistência do solo de fundação e da qualidade dos materiais disponíveis.

Pavimentos flexíveis apresentam um custo inicial menor e uma execução mais rápida, porém, ao longo do tempo os pavimentos rígidos proporcionam uma vida útil maior, pois podem frequentemente atender as exigências de uso durante cerca de 20 anos, com quase nenhuma manutenção, enquanto os pavimentos flexíveis necessitam de alguma medida de restauração em um tempo máximo de 10 anos (FERNANDES et al., 2009).

Segundo Senço (2007), para as mesmas cargas aplicadas, os pavimentos rígidos teriam espessuras reduzidas em torno de 50%, com relação as espessuras dos pavimentos flexíveis.

Devido as diferentes constituições da estrutura dos pavimentos, a forma de degradação das cargas causadas pelo tráfego também difere. Nos pavimentos flexíveis a distribuição das tensões dissipa-se em maiores profundidades, atingindo as camadas mais inferiores, enquanto nos pavimentos rígidos a distribuição é mais superficial, como ilustrado na Figura 1 (SANTOS, M., 2009).

Figura 1 – Constituição da estrutura e distribuição das tensões em um pavimento rígido e num pavimento flexível



Fonte: Adaptado de Pavement Interactive, 2018.

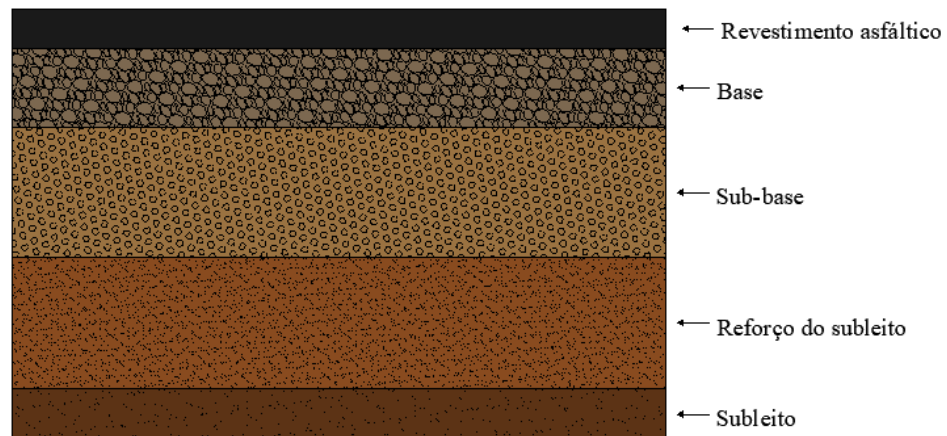
2.1.1 Pavimentos flexíveis

Os pavimentos flexíveis, em geral associados aos pavimentos asfálticos, são compostos por camadas betuminosas, de elevada deformabilidade, que se situam na parte superior da estrutura, apoiadas sobre camadas constituídas por materiais granulares, que estão assentes sobre a fundação (BERNUCCI et al., 2008; SANTOS, M., 2009).

Mallick e El-Korchi (2013) conceituam pavimentos flexíveis como uma estrutura em camadas com qualidade e resistência decrescente, com melhores materiais próximos a camada do topo, distribuindo a carga de tal forma que a tensão resultante nas camadas inferiores seria tão mínima que não causaria deformação significativa da camada.

O pavimento asfáltico é formado por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito (Figura 2). Algumas dessas camadas podem ser eliminadas, o que vai depender do volume de tráfego, da capacidade de suporte do subleito, da rigidez e espessura das camadas, e condições ambientais (BERNUCCI et al., 2008).

Figura 2 – Camadas que compõem a estrutura de um pavimento flexível



Revestimento asfáltico: Recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos, portanto, deve assegurar uma boa aderência entre o pavimento e suas rodas. É constituído por material betuminoso com agregados de alta resistência, para que possa receber as cargas sem que sofra grandes deformações elásticas ou plásticas, desagregação de componentes ou perda de compactação. Essa camada deve ser tanto quanto possível impermeável, de forma a proteger as camadas subjacentes de possíveis infiltrações (BALBO, 2007; BRANCO, PEREIRA E SANTOS, 2008).

Base: É a camada sobre a qual se constrói o revestimento. Estruturalmente, é uma das camadas mais importantes, pois assegura a capacidade de carga para suportar o tráfego previsto. Resiste e distribui os esforços verticais oriundos do trânsito dos veículos ao subleito, aliviando as pressões sobre as camadas inferiores. Pode ser constituída de solo estabilizado naturalmente, mistura de solos e agregados, materiais betuminosos de baixa qualidade, brita graduada, tratada com cimento ou não, dentre outros (BALBO, 2007; SANTOS, A., 2009; MEDINA E MOTTA, 2005).

Sub-base: É executada quando a camada de base necessária para distribuir os esforços é muito espessa, e se torna conveniente, economicamente, reduzi-la, ou quando a execução da camada de base diretamente sobre o reforço do subleito não for aconselhável. Fornece suporte estrutural, porém, apresenta menor resistência do que a camada de base. Além disso, previne que os materiais finos do subleito contaminem a camada de base (MALLICK E EL-KORCHI, 2013; QUEIROZ, 2011).

Reforço do subleito: É a camada executada entre a camada de subleito e a sub-base, servindo como um reforço para que o subleito receba pressões menores, compatíveis com sua

resistência. Possui características geotécnicas superiores à do material do subleito. Seu emprego não é obrigatório, no entanto, por razões económicas, é atrativo, visto que torna possível reduzir a espessura das camadas de base ou sub-base. Pode ser constituída por material granular ou por solos com capacidade de suporte superior ao subleito (BALBO, 2007; FONTES, 2009).

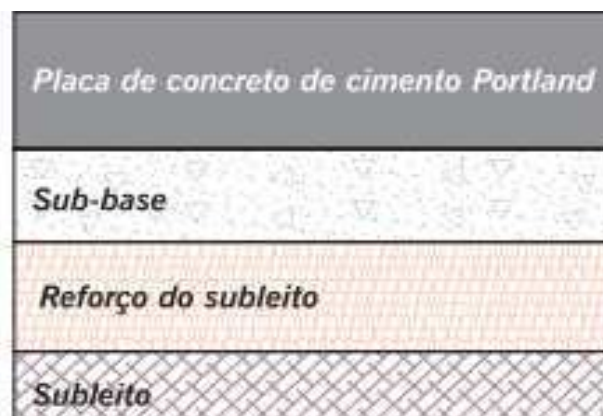
Subleito: Constituído de material natural consolidado e compactado, é a camada sobre a qual as camadas das estruturas de pavimentos estão assentes, o terreno de fundação (MEDINA; MOTTA, 2005).

A camada superficial em material betuminoso, devido à sua flexibilidade e espessura, não tem capacidade de suportar e distribuir a tensão gerada pelo tráfego sozinha, conseqüentemente, a camada de base (betuminosa ou granular) desempenhará essa função, o que conduz a uma maior concentração das tensões do solo da fundação (FRANCISCO, 2012; FONTES, 2009).

2.1.2 Pavimentos rígidos

Associados, em geral, aos pavimentos de concreto de cimento Portland, os pavimentos rígidos são constituídos por uma camada superficial de placas, armadas ou não, de cimento Portland, apoiadas em uma sub-base de material granular ou estabilizado com cimentos, assentada sobre o subleito ou um reforço de subleito (Figura 3) (BERNUCCI et al., 2008).

Figura 3 – Camadas que compõem a estrutura de um pavimento rígido



Fonte: BERNUCCI et al., 2008.

A principal característica do pavimento rígido é a presença de uma camada de revestimento de concreto de cimento, que desempenha o papel de camada de desgaste e base. Essa camada apresenta uma elevada resistência, de forma que não sofre deformação do tipo viscoplástica, mesmo sob altas temperaturas e condições severas de tráfego. O pavimento rígido não pode sofrer deformações sem se romper (FRANCISCO, 2012; SENÇO, 2007).

Neste tipo de pavimento, a camada de concreto absorve praticamente todas as solicitações provenientes do carregamento aplicado, e apenas uma pequena fração da pressão de contato pneu-pavimento atinge a fundação, sendo assim, a fundação não necessita de um grande suporte, mas sim, de um suporte constante e uniforme (RODRIGUES, 2003).

Devido a rigidez característica dos pavimentos rígidos, a distribuição das cargas se dá em uma área bem mais ampla no leito ou sub-base, de modo que as pressões que chegarão ao subleito são consideravelmente menores do que as transmitidas pelos pavimentos flexíveis (FRANCISCO, 2012).

2.2 FRESAGEM DE PAVIMENTOS

2.2.1 *Conceitos*

Oliveira (2003) afirma que as estradas pavimentadas que constituem a malha rodoviária brasileira são compostas predominantemente por pavimentos do tipo flexível, cuja estrutura se deteriora mais rapidamente quando comparado a outros tipos de pavimento.

As passagens dos veículos causam tensões que geram alterações nos materiais que compõem o pavimento, reduzindo sua qualidade. Assim, seus materiais estarão sujeitos a um processo de degradação acumulativa, e em certa fase será necessária uma intervenção para que a qualidade desse pavimento seja recuperada (FONTES, 2009).

A manutenção periódica é imprescindível para o bom desempenho de um pavimento. De acordo com a CNT (2017), a qualidade das rodovias tem impacto direto no desempenho dos veículos e no consumo de combustível. O tráfego em rodovias com infraestrutura inapropriada pode levar ao desperdício, em volume, de cerca de 5% do combustível, influenciando diretamente os níveis de emissão de poluentes.

Atualmente, a fresagem de pavimentos asfálticos é frequentemente aplicada como parte de um processo de restauração de pavimentos deteriorados, e vem mostrando bons resultados no meio rodoviário (MARDER E MALYSZ, 2016).

Os esforços horizontais, gerados pelo tráfego de veículos, provocam o desgaste da superfície de rolamento do pavimento asfáltico, assim, quando sua estrutura se torna deteriorada, surge a necessidade de recuperar sua capacidade de carga através da superposição de uma camada adicional (recapeamento) ou através do corte de uma parte ou de todo o revestimento deteriorado e execução de uma nova camada de revestimento asfáltico (BERNUCCI et al., 2008; SENÇO, 2007).

Dellabianca (2004) conceitua fresagem, no contexto do meio rodoviário, como o corte de uma ou mais camadas do pavimento, se utilizando de uma fresadora, dotada de cortador giratório, por processo mecânico contínuo.

Segundo Senço (2001), a inclusão da etapa da fresagem no processo de restauração se apresenta como a melhor opção, por conta dos inconvenientes que a sucessão de recapeamentos sem a retirada do revestimento anterior gera, como por exemplo, a formação de degraus entre as bordas das pistas e os acostamentos (Figura 4), sobrecarga nas obras de arte e redução nas alturas dos túneis. De acordo com Bonfim (2007), a fresagem tem uma efetiva atuação no alívio do peso sobre pontes e viadutos e no restabelecimento da altura original dentro de túneis e sob pontes e viadutos.

Figura 4 – Sobreposição de revestimentos asfálticos sem a retirada das camadas anteriores



Fonte: BONFIM, 2007.

O processo de fresagem visa, principalmente, a manutenção do greide original do pavimento, de forma a aumentar a vida útil da estrutura e melhorar as condições de conforto

ao rolamento. Além de possibilitar a intervenção apenas nos locais que necessitam de reparo, a fresagem permite executar remendos sem desníveis nas emendas, corrigir ou alterar a inclinação das pistas para uma drenagem superficial mais efetiva, dentre outros (BONFIM, 2007).

A fresagem de pavimentos, em relação à temperatura de ocorrência, pode ser enquadrada como fresagem a frio ou a quente.

O processo de fresagem a frio é realizado sem pré-aquecer o pavimento, ou seja, na temperatura ambiente. Esse processo quebra os agregados que estão dispostos na profundidade de corte, sendo assim, existe uma alteração na curva granulométrica do material que constitui a estrutura do pavimento. A principal vantagem desse tipo de processo é que o material fresado proveniente dele apresenta granulometria apropriada para a reciclagem sem processamento adicional (exceto para remover fragmentos de dimensões maiores) (BARELLA E MIRANDA, 2015; DNIT, 2005).

Já no processo de fresagem a quente, o revestimento do pavimento é pré-aquecido, o que facilita o corte da camada, já que sua resistência diminui pelo fato da sua estrutura estar aquecida. Nesse processo não há uma alteração expressiva da granulometria do material (BARELLA E MIRANDA, 2015).

2.2.2 Destinação do material fresado

A norma ES 159 (DNIT, 2011) estabelece que, durante a operação de fresagem, esse material deve ser transportado para um local de reaproveitamento ou bota-fora. O local de bota-fora deve ser previsto no projeto ou indicado pela construtora, aprovado pela fiscalização e em conformidade com a Resolução CONAMA nº 307/2002.

Silva (2013) afirma que dar um destino razoável ao material proveniente de fresagem, que durante muito tempo foi considerado um rejeito da construção civil, é um desafio. Para Balbo (2007), a grande produção de material fresado exige uma solução alternativa para sua destinação final, e a reciclagem desse material, é uma destinação econômica e ambientalmente sustentável, que traria vantagens quanto ao reaproveitamento do agregado e conservação de energia.

A reciclagem de pavimento surgiu por conta da necessidade de destinar corretamente os materiais provenientes de fresagem, de modo a evitar seu acúmulo em bota-foras. É uma

técnica de reaproveitamento total ou parcial do material fresado, em que podem ser adicionados outros materiais para conferir características ao material que melhor se adequam as esperadas (CANCHANYA, 2017; DELLABIANCA, 2004).

Essa destinação beneficia o meio ambiente, pois implica na economia de recursos naturais, reduz o consumo de energia e a emissão de gases, além de diminuir a necessidade de espaços físicos para o descarte do material (CANCHANYA, 2017).

2.3 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

2.3.1 Tipos de reciclagem de revestimento asfáltico

A reciclagem a frio é um processo no qual o material removido é misturado a frio *in situ* ou em usina. A esse material poderão ser adicionados materiais betuminosos (emulsão asfáltica), agregados, agentes rejuvenescedores ou estabilizantes químicos. O produto final pode ser utilizado em camadas de base (RODRIGUES et al., 2009).

A reciclagem a quente consiste em uma etapa de redução das dimensões do material removido do revestimento, seguida de uma etapa em que esse material é misturado a quente *in situ* ou em usina estacionária. Nesse processo, podem ser incorporados agentes rejuvenescedores ou cimento asfáltico e a granulometria dos agregados pode ser corrigida através da adição de novos materiais. O produto final deve se enquadrar nas especificações de misturas asfálticas a quente destinadas às camadas de base, ligação ou rolamento (DELLABIANCA, 2004; RODRIGUES et al., 2009).

2.3.2 Utilização de material fresado em misturas asfálticas novas

O uso de material fresado em misturas asfálticas novas proporciona diversas vantagens, além do cunho ambiental, as misturas asfálticas que incorporam esse material têm uma necessidade reduzida de agregados novos e de ligante asfáltico, oferecendo uma redução nos custos das obras (FONSECA et al., 2013).

A utilização do material fresado em misturas mornas, por exemplo, ao aliar a inserção do material reciclado com a tecnologia de misturas mornas, obtém um ganho expressivo na quantidade de material fresado a ser inserido na nova mistura asfáltica (BOHN, 2017).

Em estudo de Kristjánsdóttir (2007) acerca do potencial econômico da utilização do material fresado em misturas mornas, foi obtida uma economia de custos de cerca de 24% quando se utilizou 50% de material fresado e 50% de material virgem em relação a uma mistura convencional (que utilizaria apenas agregados virgens).

Estudos realizados por Fengler et al. (2014) obtiveram êxito na incorporação de material fresado no concreto asfáltico, quando substituíram parte do agregado mineral por material fresado e 1% de fíler por cal calcítica, a resistência a tração do material não foi comprometida.

De acordo com Rocha Segundo (2016), misturas asfálticas recicladas a quente com elevado percentual de material fresado podem ser uma alternativa para uso em camadas de base e de ligação, já que proporcionaria vantagens como redução de cerca de 40% da espessura total do pavimento quando comparado a estruturas com camadas granulares, redução do potencial de dano por fadiga e das deformações na base da camada do revestimento.

2.3.3 Utilização de material fresado em camadas granulares

A disponibilidade de materiais granulares de boa qualidade para uso em obras rodoviárias já é escassa em muitos locais do país, o que acarreta na necessidade do transporte desse material por longas distâncias, e gera maiores custos (DESCONSI, 2014).

Segundo Hermes, Echeverria e Specht (2016), a possibilidade do uso do material fresado como camada estrutural vem sendo percebida pelos órgãos e pesquisadores, por essa destinação impactar diretamente na exploração das jazidas de materiais pétreos, reduzindo a aquisição de novos agregados minerais.

Moreira e Pereira (2007) afirmam que a reutilização de material fresado em camadas granulares permite o aproveitamento de grandes quantidades desse material em zonas em que comumente se utilizam solos ou agregados britados. De acordo com Bernucci et al (2008) a reciclagem de revestimentos asfálticos vem se mostrando essencial e já é a fonte principal de agregados em alguns países.

Em estudos de Moreira, Correia e Pereira (2006) a solução se mostrou economicamente promissora, demonstrando potencial de redução dos custos de cerca de 9% a

25%, em relação à uma estrutura tradicional de pavimento em que se utiliza agregado britado de granulometria extensa e misturas betuminosas.

Silva (2013) obteve um aumento significativo de resistência de um solo, classificado como argiloso e de baixa capacidade de suporte, com a adição de material fresado. Este solo inicialmente apresentou uma capacidade de suporte Califórnia (CBR) de 11%, foram realizadas misturas de 40% solo + 60% material fresado + 2% de cimento e 40% solo + 60% material fresado + 4% de cimento, e estas misturas obtiveram um CBR de 145% e 163%, respectivamente.

2.4 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

O solo é um elemento essencial em uma obra de construção civil, entretanto, não é incomum que o solo de um local não atenda as exigências impostas para a realização de um determinado projeto. Segundo Ingles e Metcalf (1972), nesses casos, uma decisão básica deve ser tomada: aceitar o solo como é e projetar em um padrão que atenda as restrições impostas pela sua qualidade; remover o solo do local e substituí-lo por um material superior ou alterar as propriedades do solo existente para criar um novo material que melhor atenda aos requisitos do projeto em questão, opção conhecida como estabilização de solos.

A estabilização de um solo é a alteração de uma ou mais de suas propriedades, de forma a melhorar seu comportamento do ponto de vista da engenharia. As principais propriedades que a engenharia pode ter interesse em manipular são sua estabilidade volumétrica, resistência, permeabilidade e durabilidade (PEREIRA, 2012; SILVA, 2013).

Segundo Ingles e Metcalf (1972), desde os primeiros dias das construções de estradas, era conhecido que a superfície deveria ser mecanicamente estável, ou, seja, resistente aos carregamentos impostos sobre ela. Baptista (1976) afirma que a estabilização dos solos, no que diz respeito a seu emprego em pavimentos rodoviários, consiste no tratamento do solo, com ou sem uso de aditivos, de forma que o subleito, sub-base e base melhor se comportem estruturalmente durante sua vida útil, suportando as cargas do tráfego sem apresentar deslocamentos apreciáveis, desgastes excessivos e desagregação devido às intempéries.

Os principais métodos de estabilização de solos são a estabilização mecânica, granulométrica e química.

2.4.1 Estabilização mecânica

Esse tipo de estabilização se dá pelo entrosamento de partículas de tamanhos diferentes dentro da camada, e é realizado a partir de processos de compactação. É comum na execução de diferentes camadas de um pavimento e complementar a outros métodos de estabilização (OLIVEIRA, 2003; SARTORI, 2015).

Um solo é constituído por uma mistura de partículas minerais (sólidas), ar e água, e a compactação é definida como a expulsão do ar desse sistema. Esse processo, a partir da aplicação de sucessivas cargas, tem a finalidade de diminuir a porosidade do solo, diminuindo seu índice de vazios, e conseqüentemente, aumentando sua resistência mecânica (INGLES E METCALF, 1972; SANTOS; LIMA E BUENO, 1995).

2.4.2 Estabilização granulométrica

A forma mais simples de se corrigir a granulometria de um solo é misturá-lo com outro, que também não satisfaz as exigências de projeto, produzindo um novo material que melhor atende as especificações construtivas, assim, podemos definir o processo de estabilização granulométrica como uma adição ou retirada de partículas do solo com a intenção de alterar suas propriedades (ALMEIDA, 2010; QUEIROZ, 2011).

A estabilização granulométrica do material fresado, aliada a compactação, aumenta a resistência a cisalhamento do material e eleva sua rigidez, propriedades que melhorarão o desempenho estrutural do solo a qual será incorporado (SPECHT, 2013).

2.4.3 Estabilização química

A estabilização química consiste na adição de uma ou mais substâncias químicas ao solo, de modo a gerar uma mudança nas suas propriedades, processo que dependerá de reações químicas entre os minerais do solo. e o estabilizador (materiais como cimento, cal, cinza volante, dentre outros) (MAKUSA, 2013; PEREIRA, 2012).

Esse tipo de estabilização confere ao solo propriedades de maior resistência, menor permeabilidade e menor compressibilidade do que o solo nativo (MAKUSA, 2013).

Em solos granulares, a principal propriedade que se tem interesse manipular é a resistência ao cisalhamento, para isso se adicionam pequenas quantidades de aglomerantes

nos pontos de contato dos grãos, alguns exemplos dos materiais que podem ser utilizados são cimento Portland, cal, pozolanas, materiais betuminosos e resinas (MARQUES, 2007).

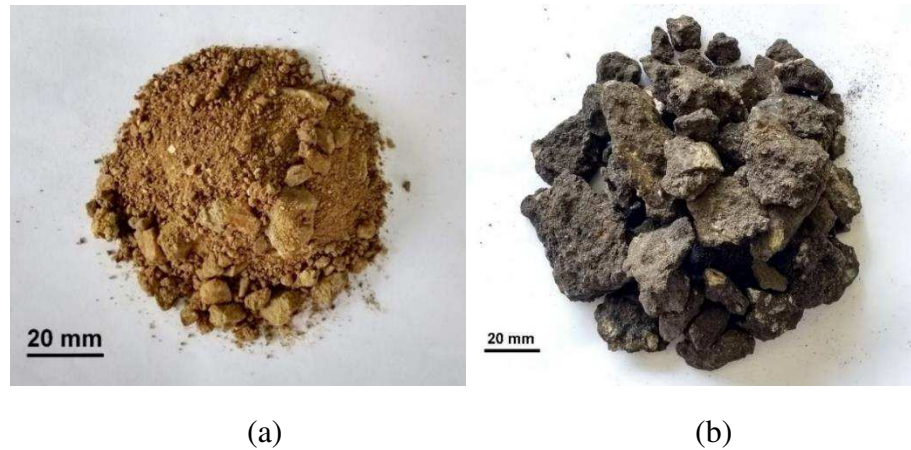
Já nos solos argilosos, devido a sua estrutura apresentar maior sensibilidade à presença de água, o que influencia na resistência ao cisalhamento, é comum a adição de produtos químicos que provoquem a dispersão ou floculação das partículas (MARQUES, 2007).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Para realização desta pesquisa se utilizou solo e material fresado (Figura 5), cujas origens e características físicas serão descritas a seguir.

Figura 5 – Materiais utilizados na pesquisa: (a) Solo; (b) Material fresado



3.1.1 Solo

Nesta pesquisa foi utilizado um solo oriundo das localidades próximas à rua Leniel Sucupira M. Deajmeira, no bairro do Monte Santo, em Campina Grande – PB, as coordenadas geográficas correspondentes ao ponto de coleta do material são $7^{\circ}12'43.6''S$ $35^{\circ}54'17.4''W$ (Figura 6).

Figura 6 – Local de coleta do material visto por satélite



Fonte: Google Maps, 2019.

Após a coleta, o solo foi transportado para o Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), onde foi destorroado, homogeneizado e armazenado.

3.1.2 Material fresado

O material fresado utilizado nesta pesquisa foi obtido a partir da etapa de fresagem dos serviços de restauração da BR-230/PB, no trecho Cabedelo – João Pessoa. Este processo foi realizado por uma fresadora a frio, modelo W 100 da marca Wirtgen (Figura 7).

Figura 7 – Fresadora na rodovia BR-230/PB



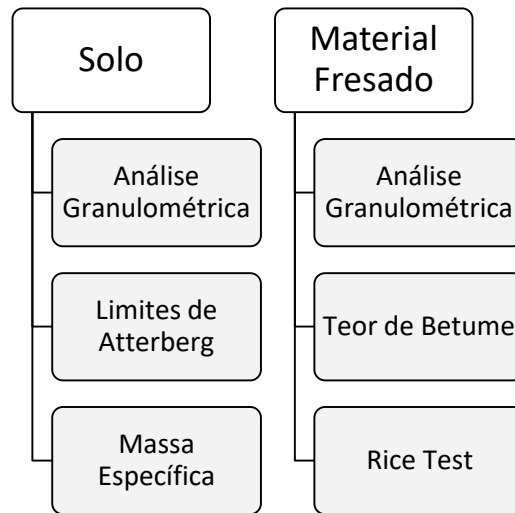
3.2 MÉTODOS

A seguir, serão descritos os procedimentos empregados para caracterização dos materiais utilizados e obtenção de resultados, de acordo com as normas correspondentes aos respectivos ensaios.

3.2.1 Avaliação das propriedades físicas

Na Figura 8, estão representados os ensaios realizados para caracterização de cada material utilizado na pesquisa.

Figura 8 – Ensaio para avaliação das características físicas dos materiais utilizados na pesquisa



Primeiramente, o solo coletado foi seco ao ar e destorroado, e em seguida, acondicionado em sacos plásticos até sua utilização. A preparação das amostras para os ensaios de caracterização física seguiu a padronização da NBR 6457 (ABNT, 2016a), e os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

No quadro 1 estão apresentados os ensaios realizados para caracterização física dos materiais e suas respectivas normas.

Quadro 1 – Normas utilizadas para caracterização física dos materiais

Ensaio de Caracterização do Solo	Normas
Análise Granulométrica por Peneiramento	DNIT-ME 080/1994
Determinação do Limite de Liquidez	DNIT-ME 122/1994
Determinação do Limite de Plasticidade	DNIT-ME 082/1994
Determinação da Massa Específica dos Sólidos do Solo	ABNT-NBR 6458/2017
Ensaio de Caracterização Do Material Fresado	Normas
Análise Granulométrica por Peneiramento	DNIT-ME 083/1998
Misturas Betuminosas – Porcentagem de Betume	DNIT-ME 053/1994
Rice Test	ASTM D 2041

3.2.1.1 Análise granulométrica por peneiramento

Os ensaios para obtenção da distribuição das dimensões dos grãos do solo e do material fresado foram realizados de acordo com a norma ME 080 (DNIT, 1994b) e ME 083 (DNIT, 1998), respectivamente. Para isso, após ter sido selecionada uma amostra

representativa de cada material, estas foram submetidas ao peneiramento em uma série-padrão de peneiras, definida pela norma EM 035 (DNIT, 1995).

A partir dos valores de percentagem do material retido em cada peneira em relação a massa total, é possível a construção da curva de distribuição granulométrica, que possibilita uma interpretação facilitada da distribuição dos diferentes tamanhos de grãos do material ensaiado.

A interpretação da curva granulométrica possibilita a determinação de parâmetros que exprimem características do material em questão, como o coeficiente de não uniformidade (CNU) e o coeficiente de curvatura (Cc).

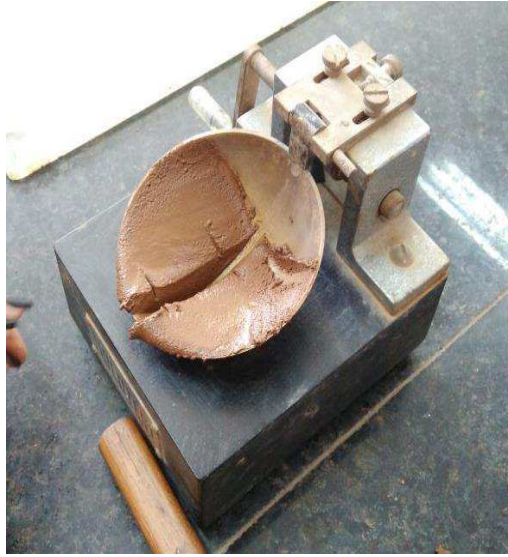
Quando um solo apresenta diversos diâmetros de partículas, as partículas menores ocupam os vazios deixados pelas partículas maiores, e o solo tende a apresentar uma menor compressibilidade e maior resistência. O coeficiente de não uniformidade (CNU) representa essa característica, de forma que quanto maior o CNU, mais bem graduado é o solo. Assim, este índice representa um pedregulho bem graduado quando maior que 4, e uma areia bem graduada quando maior que 6. (PINTO, 2006).

Já o coeficiente de curvatura (Cc) é um índice que representa a curva granulométrica, permitindo, por exemplo, a identificação de discontinuidades. Quando menor que 1, este índice indica que a curva é descontínua; quando maior que 3, a curva apresenta uma tendência a ser uniforme na parte central; e quando estiver entre 1 e 3, se considera o solo como bem graduado. (PINTO, 2006).

3.2.1.2 Limites de Atterberg

Os ensaios de limite de plasticidade e de liquidez foram realizados de acordo com a norma ME 082 e ME 122 (DNIT, 1994), respectivamente. A Figura 9 apresenta parte do procedimento para determinação do limite de liquidez do solo.

Figura 9 – Aparelho Casagrande durante ensaio de Limite de Liquidez



3.2.1.3 Determinação da massa específica dos sólidos do solo

A massa específica do solo foi determinada a partir da metodologia definida pela norma NBR 6458 (ABNT, 2017), que consiste em submeter uma amostra saturada de solo a dispersão mecânica, a transferir para um picnômetro e o preencher com água destilada, e aplicar vácuo de forma que todo o ar aderente as partículas seja removido (Figura 10). Relacionando a massa desse conjunto com a massa do picnômetro preenchido apenas com água destilada, obtêm-se o valor da massa específica dos sólidos do solo.

Figura 10 – Amostras de solo em picnômetro submetidas a vácuo



3.2.1.4 Percentagem de betume

O ensaio para determinação do teor de betume seguiu os procedimentos descritos pela norma ME 053 (DNIT, 1994a), cujo método consiste em utilizar um aparelho extrator de betume (Figura 11), no qual é colocada uma amostra de material betuminoso juntamente com um solvente. A partir dos valores da massa do material antes e após a extração é obtida a percentagem de betume.

Figura 11 – Aparelho extrator de betume



3.2.1.5 Rice test

Para obtenção da densidade máxima teórica e massa específica máxima teórica do material fresado, foi utilizado o Rice test, seguindo a norma ASTM D 2041, como podemos observar na Figura 12. As principais vantagens deste método são que ele não depende da medição repetitiva das densidades dos agregados das frações e considera a absorção do ligante pelo agregado (BERNUCCI, 2008).

Figura 12 – Rice Test em execução



A densidade máxima teórica é calculada pela razão entre a massa da mistura asfáltica não compactada e a massa de água por ela ocupada. Já a massa específica máxima teórica é a razão entre a massa da mistura asfáltica não compactada e seu volume à temperatura do ensaio.

3.2.2 Avaliação das propriedades mecânicas

Para caracterização quanto ao comportamento mecânico do solo e da combinação de solo com material fresado foram realizados os ensaios de compactação e módulo de resiliência. Estes ensaios foram executados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos da UFCG, e os procedimentos para execução do ensaio seguiram conforme as normas expostas no quadro abaixo (Quadro 2).

Quadro 2 – Normas utilizadas para caracterização mecânica dos materiais

Ensaio	Normas
Compactação	NBR 7182/2016
Módulo de Resiliência	DNIT – ME 134/2018

3.2.2.1 Ensaio de compactação

O ensaio de compactação foi realizado conforme o padrão estabelecido pela norma NBR 7182 (ABNT, 2016b), para as amostras de solo e de solo com material fresado no teor estabelecido.

Os corpos de prova foram compactados utilizando-se energia intermediária, escolhida de acordo com os parâmetros de projeto, segundo as normas ES 301 e ES 303 (DNIT, 1997). O procedimento do ensaio pode ser observado na Figura 13.

Figura 13 – Procedimentos de compactação do solo



3.2.2.2 Módulo de resiliência

O conhecimento do módulo de resiliência dos materiais que compõem as camadas de pavimentos rodoviários é obrigatório para uma análise eficiente de seu comportamento estrutural como um todo. Isso se dá pelo fato de que este ensaio apresenta uma maior representatividade na previsão do comportamento mecânico real das estruturas dos pavimentos, em comparação a estudos que se baseiam nos ensaios de índice de suporte Califórnia e resistência a compressão simples (PATRÍCIO, 2015; SANT'ANNA et al., 2003).

A execução do ensaio seguiu a metodologia exposta pela norma ME 134 (DNIT, 2018), assim, foram moldados corpos de prova com amostras do solo puro e da mistura de solo e material fresado no teor estabelecido, obedecendo os parâmetros de umidade ótima e energia definidas pelo ensaio de compactação. Para a moldagem foi utilizado um cilindro tripartido de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura, as amostras foram compactadas na energia intermediária, em dez camadas. O cilindro utilizado e os corpos de prova estão expostos na Figura 14.

Figura 14 – Cilindro tripartido e corpos de prova moldados



O ensaio foi realizado utilizando-se um aparelho triaxial de carga repetida (Figura 15). A primeira etapa do ensaio consistiu em uma fase de condicionamento, na qual foi aplicada uma sequência de carregamentos cíclicos, com a finalidade de eliminar as deformações permanentes que possam ocorrer nas primeiras aplicações de tensão desvio.

Figura 15 – Corpo de prova no equipamento triaxial de carga repetida



Após o condicionamento, é aplicada uma sequência de dezoito pares de tensões, para obtenção das leituras das deformações específicas. A partir da relação entre as deformações específicas e as tensões aplicadas foi possível obter os valores de módulo de resiliência para cada par de tensões. Para determinação do valor de MR é possível utilizar o último par de tensões do ensaio, que é o mais severo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

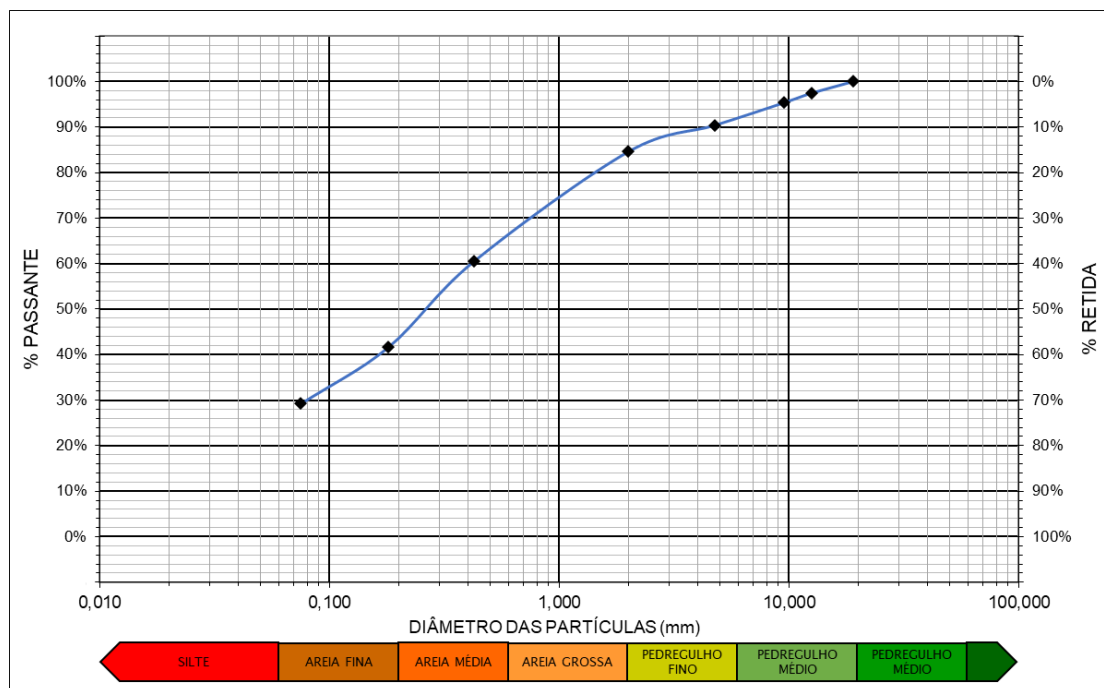
4.1.1 Massa específica do solo

Seguindo a norma NBR 6458 (ABNT, 2017), foi obtida a massa específica dos grãos do solo como sendo de 2,570 g/cm³.

4.1.2 Composição granulométrica do solo

A partir do ensaio de análise granulométrica por peneiramento, seguindo a norma ME 080 (DNIT, 1994b), foi obtida a curva de composição granulométrica (Figura 16), que descreve a distribuição das diferentes dimensões das partículas que compõem o solo estudado, relacionando as porcentagens, em peso, de material retido em cada peneira às dimensões da abertura de suas malhas.

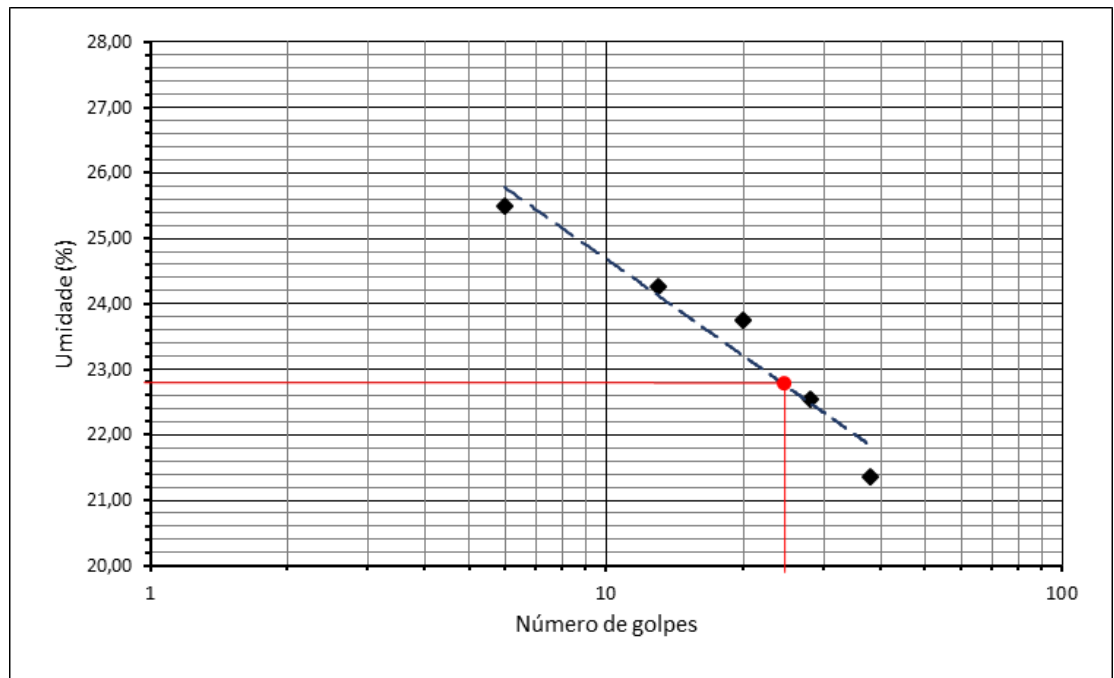
Figura 16 – Curva granulométrica do solo



4.1.3 Limites de Atterberg

O ensaio de limite de liquidez se deu conforme a norma ME 122 (DNIT, 1994d), e os resultados estão expostos na Figura 17, a partir do gráfico, é possível obter o valor de limite de liquidez como sendo de 22,8%.

Figura 17 – Gráfico do Limite de Liquidez



O ensaio de limite de plasticidade seguiu a norma ME 082 (DNIT, 1994c), porém este valor não pôde ser determinado, e o solo foi definido como não plástico. De acordo com o DNIT (2006b), para emprego de um material na camada de base de pavimentos flexíveis, é necessário que o limite de liquidez deste material seja menor que 25% e índice de plasticidade menor ou igual a 6. Logo, o resultado está de acordo com o preconizado.

Com o conhecimento da granulometria e dos limites de consistência do solo estudado, foi possível classificá-lo. Segundo o sistema de classificação Highway Research Board (HRB) o solo se classifica como A-2-4, areia fina com silte não plástico, e segundo o SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solo) como SM, solo arenoso com certa quantidade de silte (finos não plásticos).

4.1.4 Rice test

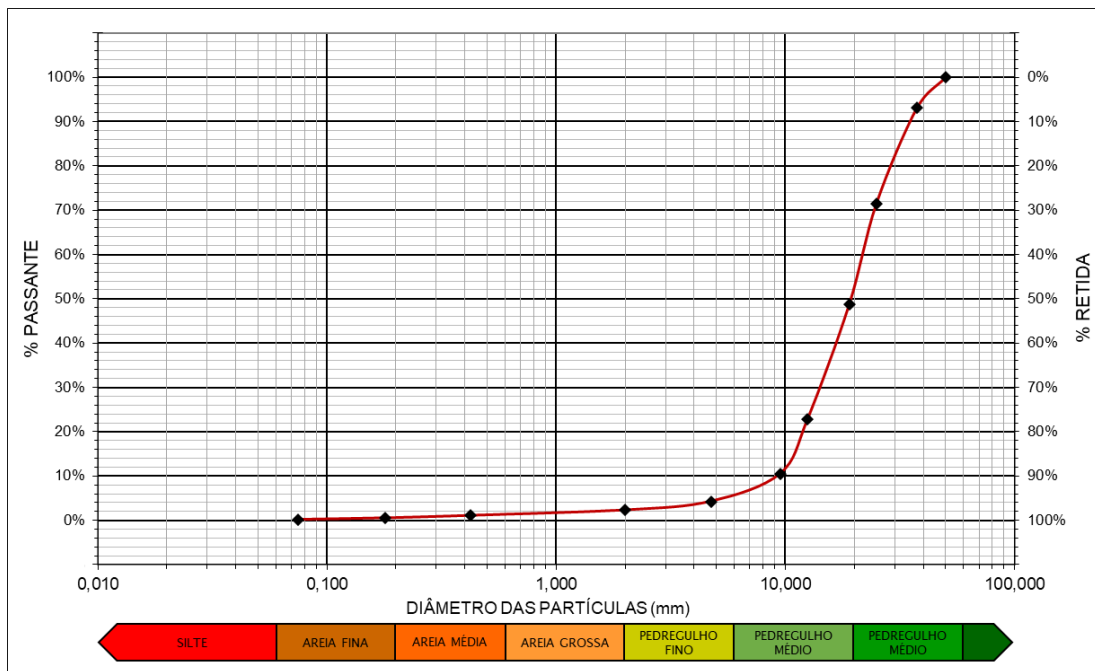
O Rice Test para determinação da densidade e massa específica máxima teóricas do material fresado foi realizado segundo a ASTM D 2041. A densidade máxima teórica obtida

foi de 2,524, e a massa específica máxima teórica de 2,517 g/cm³. Dartora (2015) encontrou um valor de massa específica máxima teórica de 2,397 g/cm³ para um material fresado com teor de ligante de 4%. Enquanto Pires et al. (2016) encontraram um valor de massa específica máxima teórica de 2,505 g/cm³ para um material fresado com teor de ligante de 5%.

4.1.5 Composição granulométrica do material fresado

Para obter a curva de composição granulométrica do material fresado em seu estado natural (Figura 18), foi realizado o ensaio de análise granulométrica por peneiramento, utilizando uma amostra representativa do material, de acordo com a norma ME 083 (DNIT,1998).

Figura 18 – Curva granulométrica do material fresado



A partir da curva granulométrica, obteve-se os valores de coeficiente de uniformidade (CNU) de 2,32, e de coeficiente de curvatura (Cc) de 1,08. Esses valores demonstram que o material em questão é mal graduado e uniforme.

4.1.6 Percentagem de betume e composição granulométrica do material fresado após extração

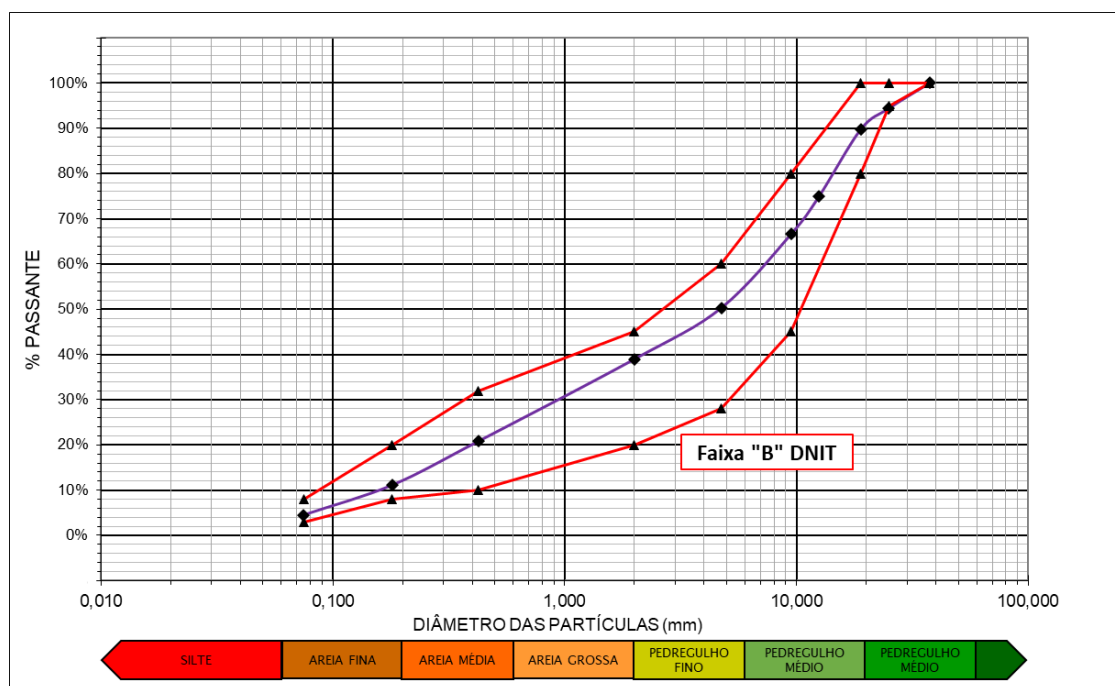
O ensaio de percentagem de betume foi realizado conforme o descrito pela norma ME 053 (DNIT, 1994a), e seu valor é obtido pela razão entre a massa do betume extraído e a massa total da amostra, que resultou em um teor de 4,48%.

Após a extração, foi realizado um novo ensaio de granulometria do material fresado sem o ligante, conforme a norma ME 083 (DNIT, 1998), de forma a ter uma melhor caracterização da composição do concreto asfáltico.

A granulometria do agregado contido no material fresado e o teor de betume são compatíveis com os correspondentes a faixa “B” do Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), utilizado em camadas de ligação e rolamento de pavimentos flexíveis.

Na Figura 19 estão representadas a curva granulométrica obtida a partir deste ensaio e as curvas granulométricas dos valores máximos e mínimos pertencentes a faixa “B”, que dentre as faixas recomendadas pela norma ES 031 (DNIT, 2006), é a que o material se enquadra mais satisfatoriamente.

Figura 19 – Curva granulométrica do material fresado após a extração



4.2 DOSAGEM DO MATERIAL FRESADO NA ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DO SOLO

Para definição da dosagem mais apropriada de material fresado na mistura, foi realizado um ajuste granulométrico por tentativas, com base na granulometria dos dois materiais a serem utilizados na mistura: o solo e o material fresado.

Destá forma, foram efetuados cálculos para obtenção das granulometrias resultantes das diferentes dosagens possíveis. Este ajuste teve como referência as faixas granulométricas estabelecidas pela norma ES 141 (DNIT, 2010) para bases estabilizadas granulometricamente (Tabela 1).

Tabela 1 – Granulometria do material de bases estabilizadas granulometricamente

Tipos	Para N > 5 x 10 ⁶				Para N < 5 x 10 ⁶		Tolerâncias da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	±7
1"	-	75-90	100	100	100	100	±7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	±7
Nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	±5
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	±5
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	±2
Nº 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	±2

Fonte: DNIT, 2010.

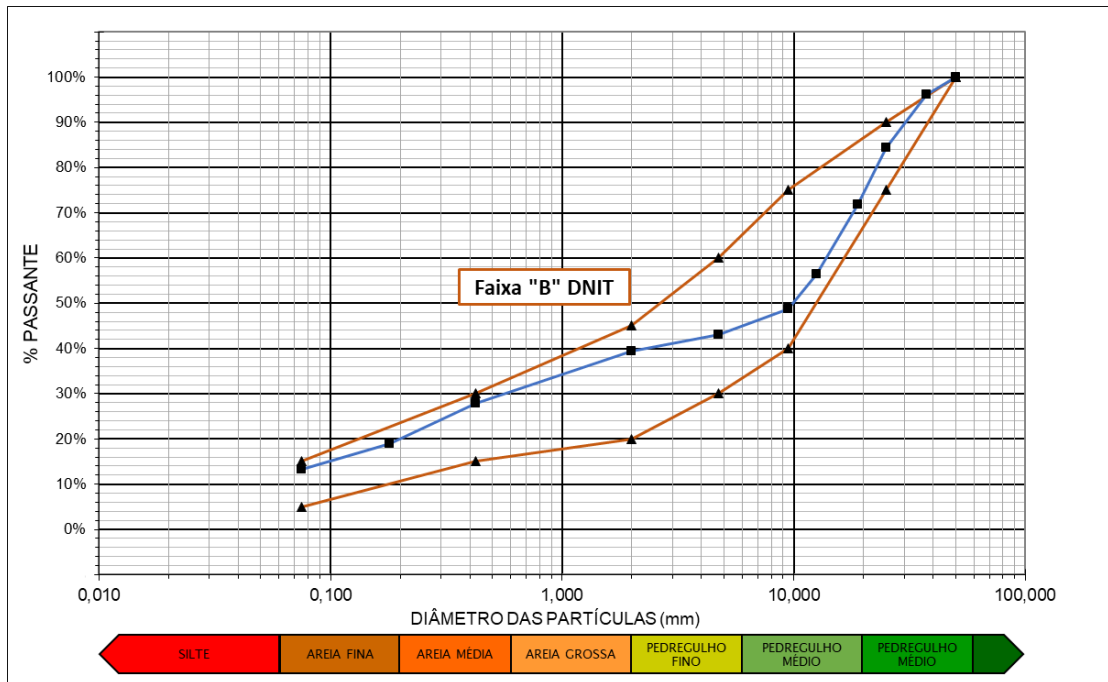
Foi percebido que para a dosagem de 55% de material fresado para 45% de solo, a granulometria da mistura satisfaz a faixa "B" recomendada pelo DNIT, como podemos observar na Tabela 2.

Tabela 2 – Granulometria resultante da mistura de 55% de material fresado e 45% de solo em comparação com a faixa "B" do DNIT

PENEIRAS	GRANULOMETRIA 55% MF E 45% SOLO	FAIXA "B"	
		DNIT	TOLERÂNCIAS
2"	100,00%	100,00	±7
1.1/2"	96,17%	-	-
1"	84,33%	75 - 90	±7
3/4"	71,76%	-	-
1/2"	56,36%	-	-
3/8"	48,70%	40 - 75	±7
Nº 4	43,03%	30 - 60	±5
Nº 10	39,34%	20 - 45	±5
Nº 40	27,81%	15 - 30	±2
Nº 80	18,99%	-	-
Nº 200	13,22%	5 - 15	±2

Na Figura 20 estão expostas a curva granulométrica resultante da mistura de 55% de material fresado e 45% de solo, e as curvas granulométricas das percentagens passantes máximas e mínimas para faixa “B” da ES 141 (DNIT, 2010). Portanto, essa foi a composição da mistura escolhida para realização dos ensaios de compactação e módulo de resiliência que serão apresentados os resultados a seguir.

Figura 20 – Granulometria do material obtido e da faixa “B” para bases estabilizadas granulometricamente



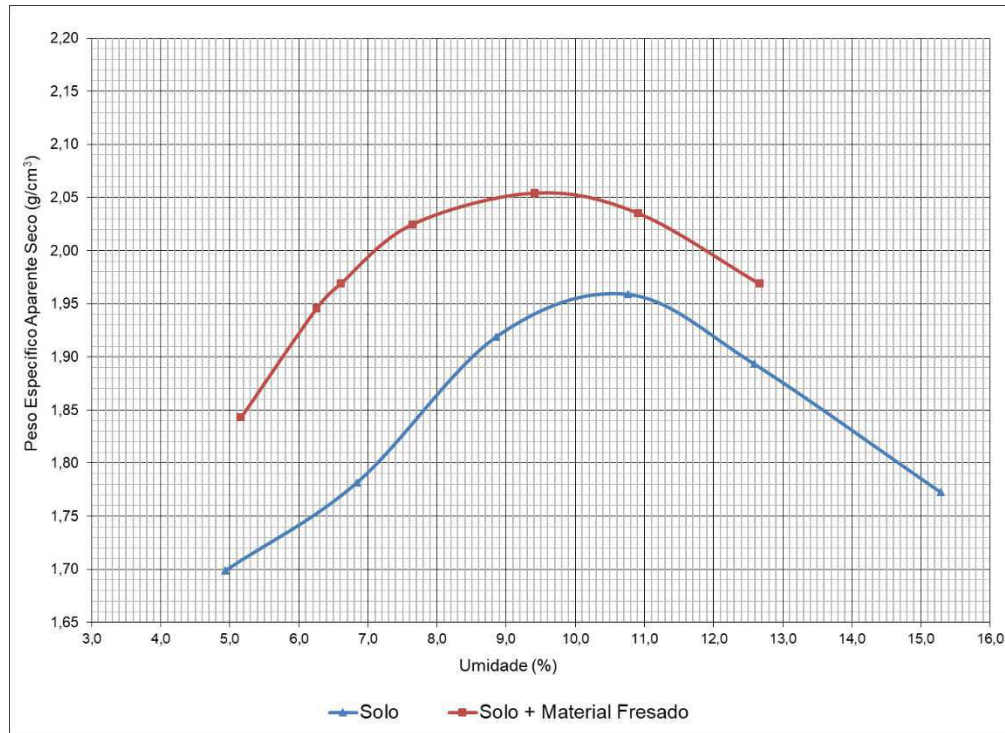
4.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

4.3.1 Compactação

Foram realizados ensaios de compactação para avaliação da mudança de comportamento da curva obtida, em relação aos parâmetros de umidade ótima e massa específica aparente seca do solo, quando modificado pela adição de material fresado.

Na Figura 21, estão apresentadas as curvas de compactação do solo puro e da mistura de solo e material fresado.

Figura 21 – Curvas de compactação do solo e da mistura de solo e material fresado



As curvas de compactação obtidas indicam que a adição de material fresado ao solo gerou uma diminuição na umidade ótima e um aumento no peso específico aparente seco máximo. Os resultados obtidos para umidade ótima e peso específico aparente seco máximo podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3 – Umidades ótimas e pesos específicos aparentes secos máximos do solo e da mistura de solo e material fresado

Solo Puro	
Umidade Ótima	10,55%
Massa Específica Aparente Seca	1,961 g/cm ³
Solo + Material Fresado	
Umidade Ótima	9,6%
Massa Específica Aparente Seca	2,056 g/cm ³

4.3.2 Módulo de resiliência

A execução deste ensaio teve como objetivo avaliar o comportamento do solo puro e do solo com adição de material fresado, em termos de resiliência. O ensaio foi realizado em duplicata, assim, os dados expostos na Tabela 4, correspondem à média dos resultados obtidos para as duas amostras ensaiadas para o solo e para a mistura de solo e material fresado.

Tabela 4 – Dados obtidos no ensaio de módulo de resiliência

SOLO PURO			SOLO + MATERIAL FRESADO		
σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)	MR (MPa)	σ_3 (MPa)	σ_d (MPa)	MR (MPa)
0,021	0,021	396,839	0,021	0,021	537,325
	0,042	304,912		0,042	448,016
	0,063	263,206		0,063	403,121
0,035	0,035	374,743	0,035	0,035	541,312
	0,070	290,737		0,070	455,531
	0,105	248,723		0,105	422,919
0,053	0,053	367,622	0,053	0,053	560,920
	0,105	301,752		0,105	492,935
	0,158	262,197		0,158	472,163
0,070	0,070	387,056	0,070	0,070	594,243
	0,140	316,798		0,140	541,643
	0,210	286,358		0,210	520,375
0,105	0,105	435,004	0,105	0,105	692,472
	0,210	365,565		0,210	622,093
	0,315	325,193		0,315	578,137
0,140	0,140	479,196	0,140	0,140	747,737
	0,280	399,791		0,280	675,147
	0,420	338,731		0,420	612,230

Os dados obtidos foram analisados por meio de três modelos de previsão do MR presentes na literatura. Os modelos matemáticos clássicos são os que relacionam o módulo de resiliência com a tensão de confinamento (σ_3) e a tensão desvio (σ_d), representados pelas Equações (1) e (2), respectivamente.

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \quad (1)$$

$$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \quad (2)$$

Além dos modelos clássicos, se utilizou para análise dos dados um modelo composto, apresentado na Equação (3). Este modelo relaciona o módulo de resiliência com as tensões de confinamento e de desvio, simultaneamente.

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (3)$$

Sendo,

MR : Módulo de resiliência;

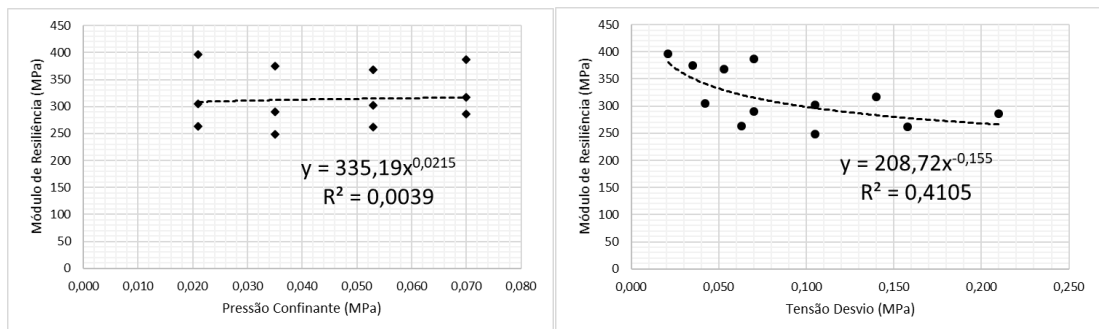
σ_3 : tensão de confinamento;

σ_d : tensão desvio;

k : parâmetros de modelagem que definem numericamente cada modelo.

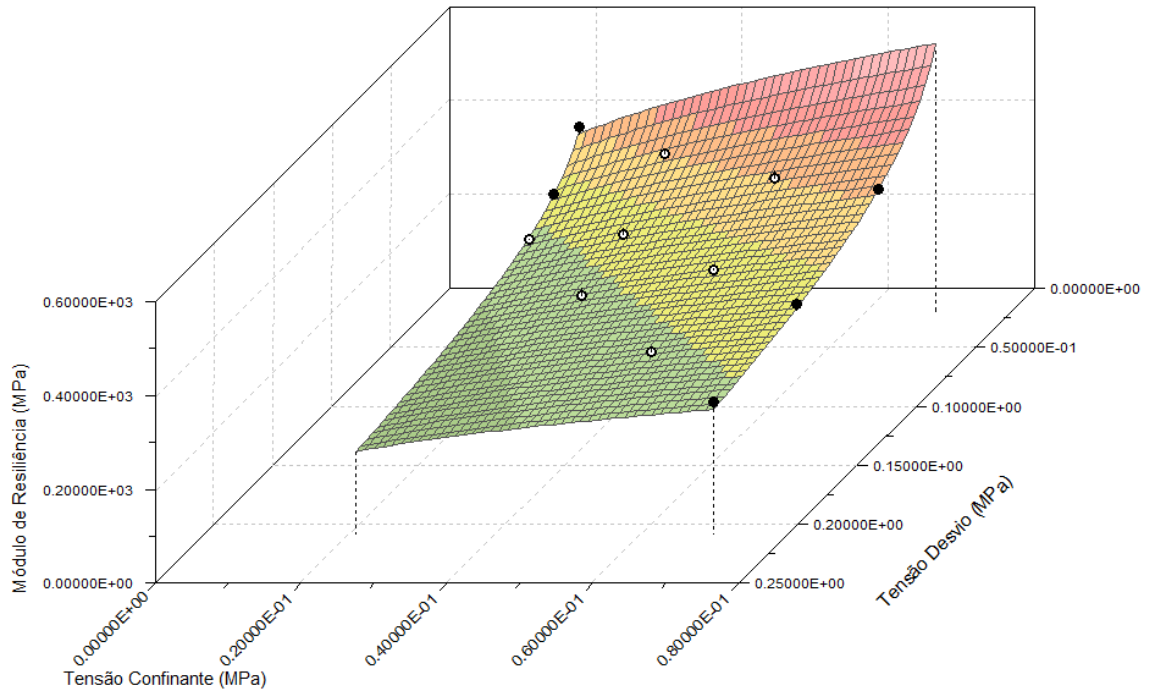
Os gráficos correspondentes aos modelos clássicos e compostos do solo e da mistura de solo (Figura 22) e material fresado (Figura 23) se encontram abaixo.

Figura 22 - Módulo de Resiliência do Solo Puro em função dos modelos clássicos (a) MR x Tensão de confinamento (b) MR x Tensão desvio e em função do modelo composto (c) MR x Tensão de Confinamento x Tensão Desvio



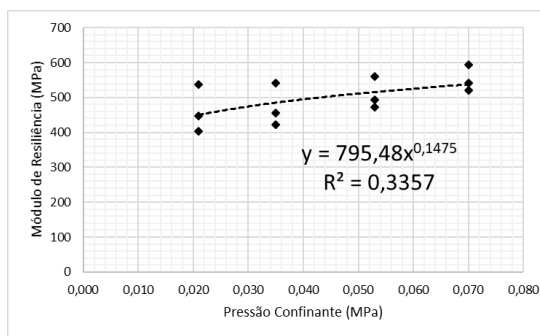
(a)

(b)

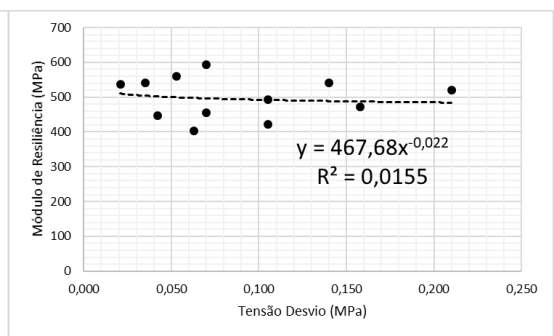


(c)

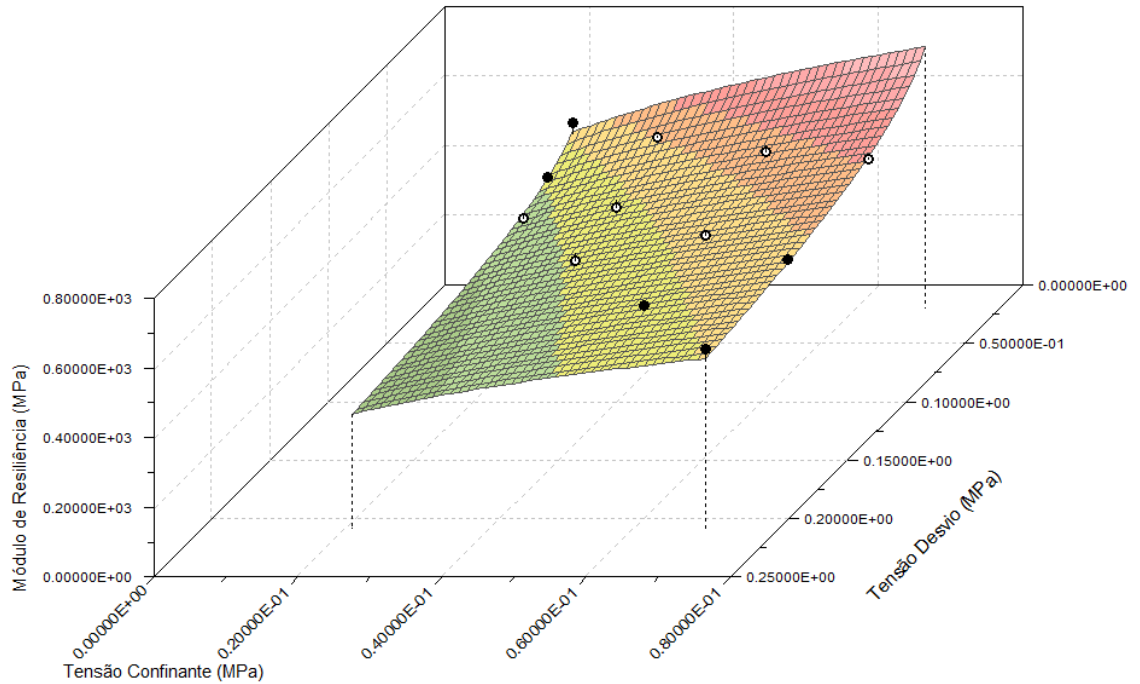
Figura 23 – Módulo de Resiliência da Mistura de Solo e Material Fresado em função dos modelos clássicos (a) MR x Tensão de confinamento (b) MR x Tensão desvio e em função do modelo composto (c) MR x Tensão de Confinamento x Tensão Desvio



(a)



(b)



(c)

A Tabela 5 apresenta os parâmetros de modelagem (k) e os coeficientes de determinação (R^2) obtidos para cada um dos modelos matemáticos utilizados.

Tabela 5 – Parâmetros de modelagem e coeficientes de determinação

	$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$			$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$			$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$			
	R^2	k_1	k_2	R^2	k_1	k_2	R^2	k_1	k_2	k_3
SOLO	0,0039	335,19	0,0215	0,41	208,72	-0,155	0,95	393,23	0,341	-0,332
SOLO + FRESADO	0,34	795,48	0,1475	0,0155	467,68	-0,022	0,91	877,3	0,33	-0,187

Os resultados obtidos indicam um acréscimo no módulo de resiliência com a adição do material fresado ao solo. Foi observado um aumento no coeficiente k_1 na amostra de solo com adição de material fresado em todos os modelos matemáticos aplicados, devido ao acréscimo do módulo de resiliência.

Dentre os modelos, foi escolhido o que melhor se adequou ao comportamento dos materiais estudados, para isso foram utilizados como critério os coeficientes de determinação (R^2). Valores de coeficiente de determinação maiores que 0,90 demonstram que o modelo matemático utilizado é adequado para representação do módulo de resiliência.

Ao observar os resultados, percebemos que o modelo composto apresentou o melhor desempenho, pois os valores de coeficientes de determinação correspondentes a este modelo apresentaram valores muito superiores aos modelos clássicos, por este modelo matemático levar em consideração tanto a tensão de confinamento quanto a tensão de desvio. Este comportamento confirma a afirmação de Ferreira (2002) de que este modelo é capaz de avaliar o valor do módulo de resiliência com precisão muito superior aos demais, tornando-os obsoletos, além da vantagem da possibilidade de sua utilização para qualquer tipo de material.

As equações correspondentes ao modelo composto indicam um acréscimo no módulo de resiliência conforme a tensão confinante cresce, indicado pelos valores positivos do parâmetro k_2 . Ao mesmo tempo que o efeito oposto ocorre com relação a tensão desvio, devido aos valores negativos de k_3 .

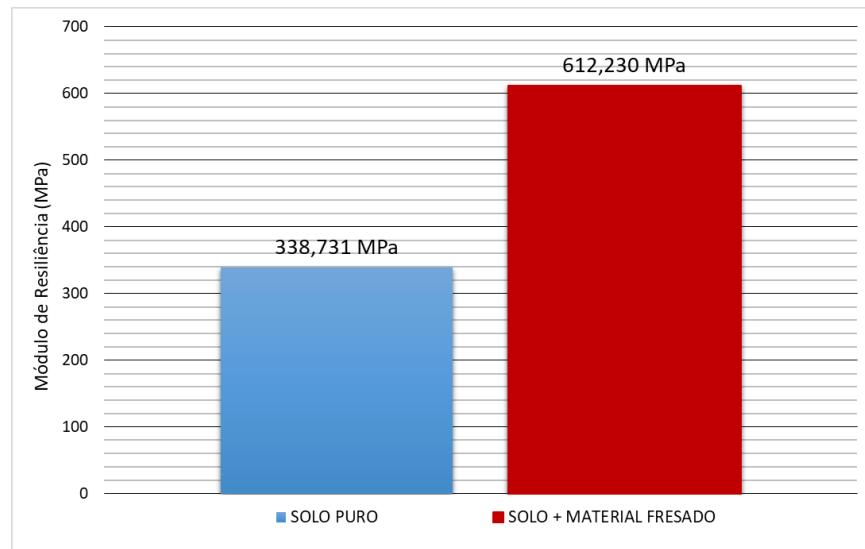
Na Tabela 6 estão expostas as equações de modelo composto obtidas para os materiais desta pesquisa e de pesquisas de outros autores. Observa-se que os valores de k_2 são positivos, o que demonstra uma tendência dos valores de MR destes materiais aumentarem conforme a tensão confinante aumenta.

Tabela 6 – Parâmetros do modelo composto para os materiais desta pesquisa e de outros autores

MATERIAIS	k_1	k_2	k_3	R^2	REFERÊNCIA
Solo	393,23	0,341	- 0,332	0,95	Esta pesquisa
Solo + 55% material fresado	877,3	0,33	- 0,187	0,91	
M4 (Solo NG' + 70% brita)	325,7	0,35	- 0,55	0,83	Norback (2018)
Solo LG' + 50% brita	356,3	0,39	- 0,463	0,61	
M5 (Solo NG' + 70% brita)	531,3	0,35	-0,55	0,83	
Argila Ribeirão Preto	446,5	0,26	- 0,08	0,85	Guimarães (2009)
BGS TransCarioca 3	786	0,45	- 0,09	0,52	Lima (2016)
BGS Pedreira Petra 1	1149	0,53	- 0,18	0,44	
BGS Pedreira Petra 2	695	0,47	- 0,19	0,62	
BGS Pedreira Petra 3	1033	0,44	- 0,05	0,83	
Solo areno-argiloso	548	0,14	-0,24	0,94	Bezerra Neto (2004)
Argila laterítica - Areia	463	0,27	- 0,39	0,75	
Areia	763	0,35	- 0,13	0,81	
50% Solo arenoso 50% brita	1884	0,43	- 0,06	0,78	
30% Solo argiloso 70% brita	603	0,25	- 0,32	0,73	

Na Figura 24 estão apresentados os valores de módulo de resiliência obtidos para amostra de solo e da mistura de solo e material fresado, para os corpos de prova moldados na umidade ótima e na energia intermediária. Os módulos de resiliência foram os resultantes da aplicação do último par de tensões do ensaio, por se tratar do nível de tensões mais severo do ensaio ($\sigma_3 = 0,140$ MPa; $\sigma_d = 0,420$ MPa).

Figura 24 – Valores de MR para amostra de solo e de solo com adição de material fresado



É possível observar que o valor do módulo de resiliência do solo com adição de material fresado apresentou um valor muito superior ao do solo puro, apresentando um aumento de cerca de 80,7%.

A Tabela 7 apresenta valores recomendados pelo Departamento de Estradas de Rodagem/SP para propriedades de material de pavimentação. É possível observar que o valor de módulo de resiliência encontrado nesta pesquisa foi superior aos usuais, assim, podemos afirmar que o material é adequado para uso em camadas estruturais de pavimentos flexíveis.

Tabela 7 – Valores usuais de módulo de resiliência

Material	Intervalos de Valores de Módulo de Resiliência (MPa)
Materiais granulares – brita graduada – macadame hidráulico	150 – 300 250 – 450

Tabela 8 – Valores usuais de módulo de resiliência (continuação)

Materiais estabilizados quimicamente – solo-cimento – brita graduada tratada com cimento – concreto compactado com rolo	5000 – 10000 7000 – 18000 7000 – 22000
Solos finos em base e sub-base	150 – 300
Solos finos em subleito e reforço do subleito – solos de comportamento laterítico LA, LA', LG' – solos de comportamento não laterítico	100 – 200 25 – 75
Solos finos melhorados com cimento para reforço de subleito	200 – 400

Fonte: DER/SP (2006).

Na Tabela 8 estão apresentados os valores de MR médios obtidos por Franzoi (1990) para diversos solos encontrados no estado de São Paulo. É possível observar que o primeiro solo, proveniente do km 222 da SP-310, uma areia siltosa de mesma classificação e umidade próxima a encontrada para o solo utilizado nesta pesquisa, apresentou um valor de MR de 150 MPa, valor abaixo do obtido nesta pesquisa.

Tabela 9 – Valores médios de módulo de resiliência para diversos tipos de solo

PROCEDÊNCIA	TEXTURA	HRB	Hót (%)	MR (Mpa)
SP-310 Km 222	Areia siltosa	A-2-4	10	150
SP-425 Km E280	Areia	A-6	11	250
SP-255 Km 63	Areia argilosa	A-6	12	340
Jazida Petroquímica – Sto. André	Argila	A-7-5	27	200
SP-333 Km 320	Argila siltosa	A-7-5	23	500
SP-310 Km 257	Argila siltosa	A-7-5	24	300
SP-55 Km 94,9	Areia	A-1-B	14	45
SP-280 Km 40	Silte arenoso	A-6	21	32
SP-280	Silte	A-7-5	22	80
SP-310 Km 168,8	Argila	A-7-5	30	125

Fonte: Franzoi, 1990.

Na Tabela 9 estão apresentados, para fins de comparação, módulos de resiliência obtidos em diferentes pesquisas para determinados tipos de materiais. É possível observar que

o valor de módulo de resiliência da mistura de solo e material fresado, obtida nesta pesquisa, é maior do que os valores de módulos encontrados para mistura de diversos tipos de solo com brita.

Tabela 10 – Módulos de Resiliência médios obtidos em diferentes pesquisas

MATERIAIS	MR (MPa)	REFERÊNCIA
Solo	339	Esta pesquisa
Solo + 55% material fresado	612	
M4 (Solo NG' + 70% brita)	433	Norback (2018)
Solo LG' + 50% brita	298	
M5 (Solo NG' + 70% brita)	385	
Solo areno-argiloso	348	Bezerra Neto (2004)
Argila laterítica - Areia	177	
Areia	139	
50% Solo arenoso 50% brita	207	
30% Solo argiloso 70% brita	236	

5. CONCLUSÕES

A pesquisa desenvolvida avaliou a utilização de material fresado, proveniente de restaurações de pavimentos asfálticos, na composição de camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis. Ao final do estudo pôde-se constatar que:

- O solo utilizado nesta pesquisa foi classificado como areia fina com silte não plástico (A-2-4) pela classificação HRB, e como solo arenoso com certa quantidade de silte (SM) pela classificação SUCS. O material fresado apresentou características granulométricas de um material mal graduado e uniforme.

- Com base na granulometria do solo e do material fresado foi realizada uma estabilização granulométrica visando encaixar a mistura resultante dos dois materiais em uma das faixas granulométricas da norma de bases estabilizadas granulometricamente. Foi obtido que para uma porcentagem de 55% de material fresado para 45% de solo, a mistura se adequaria a faixa B.

- Com relação aos efeitos nas propriedades mecânicas, a adição do material fresado ao solo, no teor estabelecido, causou um aumento do peso específico aparente seco máximo e uma diminuição na umidade ótima da mistura. A análise dos resultados permite constatar que a adição do material fresado elevou os parâmetros de resistência mecânica do solo, em termos de módulo de resiliência.

- Assim, foi possível se constatar a viabilidade da utilização de material fresado para estabilização de camadas de base e sub-base de pavimentos, solução que, além de reduzir a exploração de jazidas minerais, gera uma maior economia na execução dos pavimentos.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2041**: Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures, EUA, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. 2 ed. Rio de Janeiro, 2016a. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458**: Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2017. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação. 2 ed. Rio de Janeiro, 2016b. 9 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15619**: Misturas asfálticas - Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas. 3 ed. Rio de Janeiro, 2016c. 7 p.
- ALMEIDA, Mario Sérgio de Souza et al. correção granulométrica de solos para aplicações em estradas florestais: estudo de caso com solos da Cenibra. **Revista Árvore**, v. 34, n. 6, p. 1085-1090, 2010.
- BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BAPTISTA, C. N. **Pavimentação: Compactação dos Solos no Campo, Camadas de Base e Estabilização dos solos**, 4ªed. Rio de Janeiro: Globo, 1976.
- BARELLA, Andressa Moka; MIRANDA, Luiz Miguel de. Uma Contribuição à Recuperação Emergencial de Pavimentos Flexíveis.: Estudo de Caso: BR-163 na Travessia Urbana de Jaciara/MT. **E&S - Engineering And Science**, v. 2, n. 4, p.23-37, out. 2015.
- BARROS, Rafael Falcão. **Utilização do revestimento fresado da BR-104, como material de reforço da camada de base e/ou sub-base**. 2013. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2013.
- BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação asfáltica**: Formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobrás, 2008.
- BEZERRA NETO, Rogério Silveira. **Análise comparativa de pavimentos dimensionados através dos métodos empírico do DNER e mecanístico e proposta de um catálogo simplificado de pavimentos para a região de Campo Grande (MS)**. 2004. 189 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.
- BOHN, Kátia Aline. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas mornas com uso de ligantes convencional e modificado por polímero**. 2017. 254 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

BONFIM, Valmir. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. 3. ed. São Paulo: Exceção Editorial, 2007. 127 p.

BRANCO, Fernando; PEREIRA, Paulo; SANTOS, Luís Picado. **Pavimentos Rodoviários**. Coimbra: Almedina, 2008.

CANCHANYA, Job Pérez. **Avaliação do comportamento mecânico e reológico de mistura asfáltica com adição de 20% de material fresado - RAP**. 2017. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE - CNT. **Pesquisa CNT de Rodovias**. 2017. Disponível em: <
http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Downloads/Edicoes//2017/Informa%C3%A7%C3%B5es%20para%20Imprensa/Resumo_Principais_Dados_Pesquisa_CNT_2017_FINAL.pdf>. Acesso em: 19 dez. 2018.

DARTORA, Natália Catto. **Caracterização mecânica de uma mistura asfáltica composta por material fresado e cal**. 2015. 88 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Univates, Lajeado, 2015.

DELLABIANCA, Luciana Michèlle Araújo. **Estudo do comportamento de material fresado de revestimento asfáltico visando sua aplicação em reciclagem de pavimentos**. 2004. 110 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

DESCONSI, Felipe Fernandes. **Reutilização do resíduo oriundo de serviços de restauração asfáltica em sua forma natural e com adições como alternativa de base e sub-base de pavimentos**. 2014. 87 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2014.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE SÃO PAULO. **DER/SP IP-DE-P00/001: INSTRUÇÃO DE PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO**. São Paulo, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **EM 035: Peneiras de malhas quadradas para análise granulométrica de solos**. Rio de Janeiro, 1995. 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ES 031: Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico**. Rio de Janeiro, 2006a. 14 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ES 141: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente**. Rio de Janeiro, 2010. 9 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ES 159: Pavimentos asfálticos – Fresagem a frio**. Rio de Janeiro, 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Restauração de pavimentos asfálticos - 2. ed.** - Rio de Janeiro, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação - 3. ed.** - Rio de Janeiro, 2006b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ME 053: Misturas betuminosas - percentagem de betume**. Rio de Janeiro, 1994a. 5 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ME 080:** Solos - análise granulométrica por peneiramento. Rio de Janeiro, 1994b. 4 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ME 082:** Solos - determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1994c. 3 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ME 083:** Agregados - análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998. 5 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ME 122:** Solos - determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1994d. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ME 134:** Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, 2018. 18 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ES 301:** Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro, 1997a. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ES 303:** Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro, 1997b. 7 p.

FENGLER, Ricardo Zardin et al. **ANÁLISE DO DESEMPENHO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM A INCORPORAÇÃO DE MATERIAL FRESADO E CAL. Salão do Conhecimento**, [S.l.], ago. 2014. ISSN 2318-2385. Disponível em: <<https://www.publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/salaconhecimento/article/view/3434>>. Acesso em: 17 jul. 2019.

FERNANDES, Jozélia Assunção et al. Avaliação das condições do pavimento rígido do corredor de ônibus na cidade de Santa Maria. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DO RIO GRANDE DO SUL, 5., 2009, Pelotas. **Anais...** . Pelotas: ABMS, 2009. p. 1 - 7.

FERREIRA, José Gustavo Hermida de Mello. **Elaboração e Análise de Base de Dados de Ensaio. Triaxiais Dinâmicos da COPPE/UFRJ**. 2002. 263 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

FONSECA, Paulo et al. **Estudo de Material fresado para incorporação em misturas betuminosas a quente com altas taxas de reciclagem**. 2013. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/26296/1/CRP7-Artigo_MA-UM_vfinal%205%2018_01_2013.pdf>. Acesso em: 19 dez. 2018.

FONTES, Liseane Padilha Thives da Luz. **Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos**. 2009. 541 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, 2009.

FRANCISCO, Ana Paula Santos. **Comportamento Estrutural de Pavimentos Rodoviários Flexíveis**. 2012. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia da Construção, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2012.

FRANZOI, S. **Algumas peculiaridades resilientes de solos lateríticos e saprolíticos**. 1990. ni f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

GARCÊS, Alexandre et al. Utilização de Material Proveniente de Fresagem na Composição de Base e Sub-base de Pavimentos Flexíveis. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 17., 2014, Goiânia. **Anais...** . Goiânia: ABMS, 2014. p. 1-7.

GONÇALVES, Fernando Pugliero. **O Diagnóstico e a Manutenção dos Pavimentos (Notas de aula)**. 1999. Disponível em: <<http://usuarios.upf.br/~pugliero/arquivos/10.pdf>>. Acesso em: 11 dez. 2018.

GUIMARÃES, Antonio Carlos Rodrigues. **Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos**. 2009. 367 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

HERMES, Thiago Breunig; ECHEVERRIA, José Antônio Santana; SPECHT, Luciano Pivoto. Utilização de material fresado como camada de pavimento em construção de faixa adicional. **Revista Pavimentação**, Rio de Janeiro, n. 41, p.49-62, jul./set. 2016.

INGLES, Owen Graeme; METCALF, John B. **Soil Stabilization: principles and practice**. Melbourne: Butterworths, 1972. 374 p.

KRISTJÁNSDÓTTIR, Ólöf et al. Assessing Potential for Warm-Mix Asphalt Technology Adoption. **Transportation Research Record**, Washington, v. 2040, n. 1, p.91-99, jan. 2007.

LIMA, Caroline Dias Amâncio de. **Estudo da deformação permanente de brita graduada. Tese de Mestrado**, Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. 2016. Rio de Janeiro, 2016.

MAKUSA, Gregory Paul. **Soil stabilization methods and materials in engineering practice: State of the art review**. Luleå tekniska universitet, 2013.

MALLICK, Rajib Basu; EL-KORCHI, Tahar. **Pavement Engineering: Principles and Practice**. 2. ed. [S.l.]: CRC Press, 2013.

MARDER, Fernanda; MALYSZ, Rodrigo. Reaproveitamento de Material Fresado em Acostamentos de Rodovias. **Revista Fundações e Obras Geotécnicas**, v. 7, p. 54-58, 2016.

MARQUES, Geraldo Luciano De Oliveira. **Pavimentação**. Versão 06.2, Universidade de Juíz de Fora, (UFJF), Faculdade de Engenharia, p. 169 – 185, 2007.

MEDINA, Jacques de; MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Mecânica dos Pavimentos**. 2. ed. Rio de Janeiro: SIBI/UFRJ, 2005.

MOREIRA, João Pedro Vieira; CORREIA, António Gomes; PEREIRA, Paulo. **Contribuição para a reutilização de material fresado em camadas estruturais de pavimento**. 2006.

Disponível em:

<https://geomuseu.ist.utl.pt/OG2009/Documentos%20Complementares/Congresso%20Geotecnia%20%28resumos%29/Congresso_Actas%20%28D%29/Volume%202/V2-15.pdf>. Acesso em: 19 dez. 2018.

MOREIRA, João Pedro Vieira; PEREIRA, Paulo. **Reutilização de material fresado em camadas estruturais de pavimento: novas perspectivas**. 2007. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/277213745_Reutilizacao_de_material_fresado_em_camadas_estruturais_de_pavimento_novas_perspectivas>. Acesso em: 19 dez. 2018.

NORBACK, Carine. **Caracterização do Módulo de Resiliência e da Deformação Permanente de Três Solos e Misturas Solo Brita**. 2018. 161 f. Dissertação (mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

OLIVEIRA, Paulo César Arrieiro de. **Contribuição ao estudo da técnica de reciclagem profunda na recuperação de pavimentos flexíveis**. 2003. 157 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

PATRICIO, Jonny Dantas. **ESTUDO DE SOLOS MODIFICADOS POR ADIÇÃO DE POLÍMEROS PARA USO EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**. 2015. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

PAVEMENT INTERACTIVE. **Pavement Types**. 2018. Disponível em: <<https://www.pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-types-and-history/pavement-types/>>. Acesso em: 19 dez. 2018.

PEREIRA, Kiev Luiz de Araújo. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos**. 2012. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 354 p.

PIRES, Gustavo Menegusso et al. Comportamento mecânico de material fresado após processo de estabilização granulométrica e química por meio da incorporação de cimento e cinza de casca de arroz moída. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [s.l.], v. 21, n. 2, p.365-384, jun. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620160002.0035>.

QUEIROZ, Flávio de Almeida. **Utilização de material fresado para aplicação em camadas estabilizadas de bases e sub-bases de pavimentos rodoviários**. 2011. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

ROCHA SEGUNDO, Iran Gomes da et al. Misturas asfálticas recicladas a quente com incorporação de elevado percentual de fresado como alternativa para camada de módulo elevado. **Transportes**, v. 24, n. 4, p. 85-94, 2016.

RODRIGUES, John Kennedy Guedes et al. **Manual: avaliação, manutenção e restauração de pavimentos de vias públicas**. Campina Grande: Edufcg, 2009. 64 p.

RODRIGUES, Lezzir Ferreira. **Comportamento estrutural de placas de concreto apoiadas sobre base granular**. 2003. 192 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

SANT'ANNA, Giovanni Levi et al. Módulo de resiliência de um solo arenoso e de suas misturas com alcatrão fracionado e cal. **Revista Árvore**, [s.l.], v. 27, n. 4, p.527-534, ago. 2003. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-67622003000400013>.

SANTOS, André Gonçalo Bernardes. **Bases Granulares de Agregados Reciclados**. 2009. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009.

SANTOS, M., LIMA, D., BUENO, B., “Estabilização dos solos com cal e betume”. In: 6º Reunião de pavimentação urbana, pp.74 – 97, Santos – São Paulo, Abril, 1995.

SANTOS, Mário Jorge Ledo dos. **Dimensionamento de camadas de reforço de pavimentos rodoviários flexíveis**. 2009. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009.

SARTORI, Guilherme. **Estudo de Estabilização de Solos para Fins de Pavimentação na Região de Campo Mourão**. 2015. 54 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2015.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de técnicas de pavimentação: volume 1**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2007. 761 p.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de técnicas de pavimentação: volume 2**. São Paulo: Pini, 2001. 671 p.

SILVA, Eduardo Souza da. **Utilização de resíduo de fresagem de pavimentos asfálticos em bases estabilizadas granulometricamente e em revestimentos asfálticos na cidade de Manaus**. 2013. 219 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2013.

SPECHT, Luciano Pivoto et al. Utilização de material fresado como camada de pavimento: estudo laboratorial e aplicação em campo. **42ª Reunião Anual de Pavimentação**. Rio de Janeiro: ABPv, 2013.