

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Caroline Castilhos Rezende

**ESTUDO DE ESTABILIZAÇÃO DE MATERIAL FRESADO COM ADIÇÃO DE
AREIA DE FUNDIÇÃO PARA O USO EM CAMADAS DE PAVIMENTOS**

Santa Cruz do Sul

2019

Caroline Castilhos Rezende

**ESTUDO DE ESTABILIZAÇÃO DE MATERIAL FRESADO COM ADIÇÃO DE
AREIA DE FUNDIÇÃO PARA O USO EM CAMADAS DE PAVIMENTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso I, do curso de Engenharia Civil, do Departamento de Engenharia, Arquitetura e Ciências Agrárias, da Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, Campus Santa Cruz do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de graduação em engenharia civil.

Orientador: Leandro Olivio Nervis
Coorientadora: Anelise Schmitz

Santa Cruz do Sul

2019

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Afonso Júnior e Jeanice, por me incentivarem durante toda a trajetória do curso, acreditando em mim e me dando todo o suporte necessário para seguir em frente.

Aos meus irmãos, Juliana e Afonso Neto, por estarem ao meu lado principalmente nos momentos de angústia, dividindo comigo suas experiências e acreditando no meu potencial.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Leandro Olivio Nervis, por todos os ensinamentos e assessoramentos, por acreditar em mim e me incentivar na busca de conhecimentos. Agradeço pela confiança, paciência e dedicação durante todo o curso. Foi fundamental o seu papel no meu desenvolvimento, despertando em mim o interesse pela pesquisa e pela área que almejo seguir futuramente.

À minha coorientadora, Prof. Ms. Anelise Schmitz, por todo o incentivo durante a elaboração desse trabalho.

A todos os mestres que colaboraram na minha formação, em especial à Prof. Dr. Cláudia Mendes Mählmann, minha primeira orientadora em projeto de pesquisa, responsável por me introduzir ao mundo da iniciação científica e despertar em mim a sede por conhecimentos e inovações.

Aos meus colegas e amigos, por todo o apoio.

À universidade, laboratoristas, bolsistas e funcionários que, de forma direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao laboratório de pavimentação da UFRGS, LAPAV, pela disposição dos equipamentos e contribuições. Agradeço principalmente à Natália Guterres Mensch, que dividiu comigo seus conhecimentos e auxiliou da melhor maneira possível.

À empresa RGS, por ceder o material para a realização deste estudo e deixar o laboratório à minha disposição. Agradeço aos laboratoristas e, principalmente, ao Rogerio Elicker Da Silva.

A todos, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

No Brasil, o principal modal de transporte é o rodoviário, com uma extensa malha pavimentada. No entanto, grande parte das rodovias apresentam degradação. Frente a esse desgaste, uma técnica empregada é a reciclagem de pavimentos, que consiste na fresagem das camadas para posterior reaproveitamento dos materiais. O presente trabalho tem como objetivo o estudo do material fresado, oriundo da RSC-287 (Km 123), vislumbrando o emprego em camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis. Buscou-se a caracterização do material e a estabilização com areia de fundição, comparando com o pó de brita, e dimensionamento pelo método do DNIT e análise mecanística-empírica. Realizou-se a análise granulométrica dos materiais para definição dos traços das misturas, enquadrando-os na Classe C para bases granulométricas do DAER. Os traços adotados são de 80% Fresado + 20% Areia de Fundição + 3% Cimento e 60% Fresado + 40% Pó de Brita + 3% Cimento. A partir disso, os seguintes ensaios foram realizados: equivalente de areia, compactação, Índice de Suporte Califórnia (ISC), resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e triaxial de carga repetida para obtenção de módulo de resiliência (MR). A partir dos resultados, viu-se que ambas as misturas apresentaram valores semelhantes de peso específico e umidade ótima. Quanto ao ISC, obteve-se um valor superior na mistura com areia de fundição e baixa expansão para ambas. A resistência à compressão simples foi similar entre os materiais, mas a resistência a tração por compressão diametral foi maior no traço com areia de fundição. A partir dos resultados, obteve-se a envoltória de Mohr-Coulomb, onde a coesão para o traço com areia de fundição foi maior em relação ao traço com pó de brita e o ângulo de atrito menor. O ensaio triaxial mostrou a influência da tensão confinante e modelos de cálculo para o MR foram gerados pela soma de tensões. Assim, viu-se a possibilidade do uso do fresado e areia de fundição como camada de base. Com o dimensionamento, avaliou-se que métodos mecanísticos-empíricos são mais precisos e que a base com areia de fundição apresenta características mais econômicas, com espessuras menores, além de ser favorável ao meio ambiente.

Palavras-chave: Reciclagem de pavimentos. Pavimentos Flexíveis. Base. Sub-base.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Seção transversal do pavimento	18
Figura 2 –	Gráfico para determinação de espessuras do pavimento	29
Figura 3 –	Dimensionamento do pavimento flexível	30
Figura 4 –	Tensão horizontal de tração: fadiga nas misturas asfálticas	35
Figura 5 –	Deformações no topo da camada de subleito	38
Figura 6 –	Estrutura do pavimento original	43
Figura 7 –	Frações dos materiais: a) Fresado; b) Pó de Brita	51
Figura 8 –	Corpos de prova para ensaio de resistência à compressão simples: a) Mistura com fresado b) Mistura com pó de brita	55
Figura 9 –	Corpos de prova ensaiados à resistência à tração por compressão diametral: a) Mistura com fresado b) Mistura com pó de brita	56
Figura 10 –	Envoltória de Mohr-Coulomb baseada em círculos de Mohr correspondentes aos ensaios de compressão simples e diametral	57
Figura 11 –	Curvas granulométricas dos materiais estudados	63
Figura 12 –	Traço Fresado + Areia de Fundição	65
Figura 13 –	Traço Fresado + Pó de Brita	66
Figura 14 –	Curvas de compactação	68
Figura 15 –	Envoltória de Mohr-Coulomb para as misturas submetidas a ensaios de compressão simples e diametral	71
Figura 16 –	Resultados de MR para CP1 80% Fresado + 20% Areia de Fundição + 3% Cimento	72
Figura 17 –	Resultados de MR para CP2 80% Fresado + 20% Areia de Fundição + 3% Cimento	73
Figura 18 –	Média dos resultados de MR para Traço 80% Fresado + 20% Areia de Fundição + 3% Cimento	73
Figura 19 –	Resultados de MR para CP1 60% Fresado + 40% Pó de Brita + 3% Cimento	74

Figura 20 – Resultados de MR para CP2 60% Fresado + 40% Pó de Brita + 3% Cimento	74
Figura 21 – Média dos resultados de MR para 60% Fresado + 40% Pó de Brita + 3% Cimento	75
Figura 22 – Estrutura do pavimento novo pelo método do DNIT	76
Figura 23 – Estrutura da restauração de pavimento existente pelo método do DNIT	77
Figura 24 – Espessuras dos pavimentos novos	81
Figura 25 – Espessuras dos pavimentos com a restauração de pavimento existente	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixas granulométricas do DAER para bases granulares	22
Tabela 2 – Requisitos mínimos, em porcentagem, para definição de classes	22
Tabela 3 – Condições para camadas inferiores de pavimentos	24
Tabela 4 – Primeiros modelos de comportamento tensão-deformação de solos observados no Brasil	26
Tabela 5 – Coeficiente de equivalência estrutural	28
Tabela 6 – Espessura mínima de revestimento betuminoso	29
Tabela 7 – Constantes para definição de deformações verticais admissíveis no subleito	33
Tabela 8 – Classificação das estradas	34
Tabela 9 – Constantes para critério de vida de fadiga em camada esbelta de revestimento (<50 mm)	36
Tabela 10 – Constantes para critério de vida de fadiga em camada espessa de revestimento (>75mm)	36
Tabela 11 – Constantes para critério de deformação permanente em camadas de base e sub-base granulares	37
Tabela 12 – Constantes para o critério de deformação permanente final	39
Tabela 13 – Sequência de tensões para fase de condicionamento	59
Tabela 14 – Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência de solos	59
Tabela 15 – Tensões verticais para determinação do MR de materiais estabilizados quimicamente	60
Tabela 16 – Parâmetros dos materiais adotados para o dimensionamento	61
Tabela 17 – Quantidade de finos e graúdos dos materiais estudados	63
Tabela 18 – EA do material fresado com areia de fundição	65
Tabela 19 – EA do material fresado com pó de brita	67
Tabela 20 – Resultados dos ensaios de compactação	68
Tabela 21 – Valores de ISC e expansão	69

Tabela 22 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral	70
Tabela 23 – Valores de coesão e ângulo de atrito das misturas	71
Tabela 24 – Modelos para variação de MR	75
Tabela 25 – Valores admissíveis considerando o método mecanístico-empírico	78
Tabela 26 – Espessuras adotadas e resposta estrutural dos pavimentos pelo método mecanístico-empírico	79
Tabela 27 – Valores considerando o método SAPEM	80
Tabela 28 – Respostas estruturais do pavimento com 23 cm de base de 60% Fresado + 40% Pó de Brita + 3% de Cimento e revestimento de 4 cm	81
Tabela 29 – Respostas estruturais dos pavimentos com espessuras dimensionadas pelo método do DNIT	82
Tabela 30 – Respostas estruturais dos pavimentos	84

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos	13
1.1.1	Objetivo geral	13
1.1.2	Objetivos específicos	13
1.2	Justificativa	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1	Aspectos gerais sobre pavimentos	15
2.2	Reciclagem de pavimentos	18
2.3	Caracterização tecnológica das camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis	21
2.3.1	Granulometria.....	21
2.3.2	Compactação das camadas granulares e Índice de Suporte Califórnia.....	23
2.3.3	Resistência à compressão simples	24
2.3.4	Resistência à tração por compressão diametral.....	24
2.3.5	Módulo de Resiliência.....	25
2.4	Dimensionamento de pavimentos flexíveis	26
2.4.1	Método de dimensionamento do DNIT (DNER/1981).....	27
2.4.2	Método mecanístico-empírico.....	31
2.4.3	Método de dimensionamento de pavimentos rodoviários da África do Sul	34
2.4.4	Método de dimensionamento MeDiNa.....	39
2.5	Processos de estabilização de materiais	40
3	METODOLOGIA	42
3.1	Caracterização da pesquisa	42
3.2	Delineamento da pesquisa	42
3.3	Técnicas e instrumentos de coleta de dados	43
3.3.1	Caracterização do trecho e estrada.....	43
3.3.2	Coleta do volume de material	44

3.4	Técnicas e instrumentos de análise de dados/informações	45
3.4.1	Análise granulométrica.....	45
3.4.2	Compactação e Índice de Suporte Califórnia	50
3.4.3	Resistência à compressão simples	54
3.4.4	Resistência à tração por compressão diametral.....	55
3.4.5	Módulo de resiliência.....	58
3.4.6	Dimensionamento	60
3.5	Realização de análise e discussão dos resultados.....	61
3.6	Obtenção de conclusões.....	62
4	APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS..	63
4.1	Análise Granulométrica	63
4.1.1	Traço Fresado + Areia de Fundição	64
4.1.2	Traço Fresado + Pó de Brita.....	66
4.2	Compactação e Índice de Suporte Califórnia	67
4.3	Resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral	69
4.4	Ensaio triaxiais de carga repetida	72
4.5	Dimensionamento	75
4.5.1	Método do DNIT (DNER/1981)	75
4.5.2	Métodos mecanísticos-empíricos (pavimentos novos).....	77
4.5.3	Análise mecanicista do método do DNIT (pavimentos novos)	82
4.5.4	Métodos mecanísticos-empíricos (restauração de pavimento existente)	83
4.5.5	Método MeDiNa	85
5	CONCLUSÃO	87
	REFERÊNCIAS.....	89
	ANEXO A – Relatório de controle tecnológico do subleito.....	93
	ANEXO B – Cálculo do Número N.....	96

ANEXO C – Relatórios de classificação do resíduo areia de fundição.....	98
APÊNDICE A – Relatórios Everstress (dimensionamento de pavimentos novos).....	106
APÊNDICE B – Relatórios Everstress (dimensionamento considerando as espessuras encontradas no método DNIT).....	109
APÊNDICE C – Relatórios Everstress (dimensionamento considerando a camada de rachão).....	111

1 INTRODUÇÃO

Desde as épocas mais remotas, o setor de transportes está diretamente associado à civilização e ao progresso, pois é ele que garante a acessibilidade e a mobilidade de pessoas e de mercadorias. No Brasil, tem-se como principal modalidade de transporte o rodoviário, onde grande parte das cargas são transportadas por meio de rodovias. Sendo assim, é perceptível a elevada demanda, uma vez que há grande movimentação por esse modal. A Confederação Nacional dos Transportes – CNT (2018a) aponta que, em 2001, a extensão da malha rodoviária pavimentada total no Brasil era de 170.902,9 km, considerando pistas simples, em obras de duplicação e pistas duplas. No ano de 2017, chegou-se a extensão de 213.452,8 km, o que demonstra o crescente investimento. No entanto, os dados também revelam, a nível nacional, que cerca de 50% dos pavimentos se encontram em estado regular, ruim ou péssimo.

A rodovia, bem como o pavimento, deve apresentar um desempenho satisfatório durante sua vida de serviço e atender às funções básicas, além de proporcionar segurança, conforto e economia ao usuário. Para isso, deve-se executar um pavimento que atenda níveis de serventia compatíveis e homogêneos, onde todos os componentes se comportem de forma solidária e harmoniosa (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT, 2006a). É sabido que, devido a elevados volumes de tráfego de veículos e também àqueles que trafegam com cargas acima do estabelecido legalmente, há uma degradação do pavimento ao longo da sua vida útil. Sendo assim, em diversas situações são necessárias intervenções para restaurá-lo, tendo o objetivo de retomar as suas características e funções iniciais para que resista durante um novo ciclo de vida útil (PIRES *et al.*, 2016). O Manual de Pavimentação do DNIT (2006a) ainda ressalta que, para o pavimento manter suas características que atendam às funções básicas, é importante que haja a manutenção, elevando as características gerais de desempenho.

Frente ao desgaste de um pavimento asfáltico, uma técnica que pode ser empregada é a reciclagem de pavimentos, onde misturas asfálticas envelhecidas e deterioradas são reutilizadas para se produzir novas misturas. Assim, há o reaproveitamento dos agregados e ligantes, provenientes da fresagem, acrescidos de agentes para estabilizar a mistura (MOTTA *et al.*, 2008). Ao decorrer dos anos, diversas pesquisas sobre reciclagem de pavimentos têm sido realizadas, trazendo

uma alternativa para redução quanto ao uso de materiais derivados de petróleo. É indispensável a preocupação ambiental frente ao uso excessivo do petróleo e, portanto, deve-se ressaltar a “necessidade de preservação e reciclagem dos asfaltos como bem indispensável para as economias e gerações futuras” (BALBO, 2007, p. 107).

Há uma crescente preocupação ambiental em torno da utilização de recursos naturais. Em tempos remotos, o domínio e a transformação da natureza representavam progresso e, devido a isso, recursos naturais eram utilizados de maneira desenfreada. Esse fato culminou em diversos danos, resultando atualmente na adoção de critérios e diretrizes que delimitem a extração e o uso de matérias primas. Desta forma, tem-se procurado alternativas sustentáveis de crescimento por todos os setores da sociedade, ressaltando-se as obras de engenharia, as quais apresentam importantes impactos ambientais em todas as etapas (HOOD, 2006).

A utilização de materiais alternativos ganha espaço e necessidade frente à grande demanda por infraestrutura urbana, sendo ela rodoviária, de aeroportos e de portos no Brasil. Diversos agregados alternativos podem ser utilizados em diferentes escalas, deixando de ser subutilizados ou até mesmo descartados de maneira ambientalmente incorreta e não sustentável. Sendo assim, há inúmeras maneiras de reaproveitar rejeitos industriais, utilizando-os para fins de pavimentação (BALBO, 2007). Um exemplo é a areia de fundição, gerada no processo de moldagem de peças metálicas. Nos trechos de pavimentos em que já foi empregada, apresenta características satisfatórias à nível técnico (BRANCO *et al.*, 2004). Cerca de três milhões de toneladas por ano desse resíduo são produzidos no Brasil, o que torna o seu descarte de grande custo para siderúrgicas. Portanto, o reaproveitamento representa a redução do custo e a construção de rodovias oportuniza que grande parte seja reaproveitada nas diferentes camadas como, por exemplo, base e sub-base (KLINSKY, 2008).

Com a finalidade de abranger as possibilidades do uso do material fresado, o presente trabalho buscou estudar soluções alternativas para a pavimentação, explorando a incorporação de areia de fundição disponível na região. Sendo assim, abordou-se o estudo de novas misturas com o intuito de tornar o processo viável e dar destinação correta para o resíduo, visando a utilização na reciclagem de pavimentos como uma técnica a ser explorada e a obtenção de resultados que possam ser futuramente empregados na prática.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral realizar um estudo de estabilização de material fresado, oriundo da RSC-287, Km 123 em Vale do Sol - Rio Grande do Sul (RS). Para tanto, irá se utilizar de adição de areia de fundição, vislumbrando o emprego em camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são os seguintes:

- Caracterizar o material fresado oriundo de uma rodovia do estado do Rio Grande do Sul verificando se ele atende às faixas granulométricas dispostas no Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (DAER);
- Avaliar experimentalmente em laboratório as propriedades necessárias do material fresado com e sem adição de resíduos industriais para o emprego em camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis;
- Qualificar as misturas para o uso como base e sub-base de pavimentos flexíveis;
- Propor alternativas para o uso do fresado em camadas de pavimento, definindo as espessuras pelo método do DNIT e pelos métodos mecanístico-empíricos, incluindo o da República da África do Sul;
- Comparar os diferentes métodos de dimensionamento disponíveis na literatura, tanto nacional como internacional, avaliando principalmente as metodologias adotadas no Brasil;
- Buscar por soluções tecnicamente viáveis de modo a atender para questões econômicas e ambientais.

1.2 Justificativa

É sabido que o transporte rodoviário é de extrema importância, principalmente para um país como o Brasil onde há extensa movimentação através desse modal. Segundo dados da CNT (2018a), considerando apenas as rodovias asfaltadas da

Região Sul, tem-se uma extensão de 38.322,4 km no ano de 2017, sendo 11.492,5 km localizados no Rio Grande do Sul, local de estudo do presente trabalho. Apesar da grande extensão da malha rodoviária no país, grande parte encontra-se deteriorada e necessita de manutenção.

Nos últimos anos, a falta de investimento dos órgãos governamentais para a manutenção desse setor levou ao atual estado e, consequentemente, vem gerando um acréscimo de consumo de combustível, tempo de viagem, elevados índices de acidentes e diversos outros impactos negativos para os usuários. Com o objetivo de alavancar o desenvolvimento socioeconômico-ambiental mais adequado, há a necessidade de estudos que visem tecnologia e processos tecnicamente e economicamente viáveis, bem como ecologicamente corretos (COSTA e FILHO, 2010).

O reaproveitamento de materiais asfálticos surge como uma alternativa que atende as necessidades e estimula a conscientização ambiental, uma vez que as construções e manutenções de rodovias geram um intenso consumo de materiais. Assim, torna-se relevante o estudo da reciclagem de pavimentos, apropriando-se de revestimentos já deteriorados para a execução de novas camadas de pavimentação. Para a utilização do material fresado, é necessário que este seja estudado e estabilizado.

Visando o aproveitamento para camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis, o presente trabalho também abordará a adição de areia de fundição a fim de obter misturas que possam ser empregadas e que atinjam o objetivo de redução de custos e passivos ambientais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspectos gerais sobre pavimentos

Segundo Motta *et al.* (2008), o pavimento é definido como sendo uma estrutura composta por diversas camadas que têm a função de resistir aos esforços do tráfego de veículos e também aos oriundos do clima. Senço (2007) aponta que as múltiplas camadas são consideradas finitas, definidas em projeto, e são construídas sobre uma superfície final de terraplenagem. Como objetivos, o autor destaca a capacidade de resistir aos esforços verticais e horizontais oriundos de ações externas, distribuindo-os e tornando mais durável a superfície de rolamento.

Ao se pavimentar uma via de circulação de veículos, obtêm-se melhores condições de rolamento ao usuário. Sendo assim, cria-se uma superfície mais regular, a qual trará conforto no deslocamento do veículo. Além disso, será mais aderente, garantindo segurança quando a pista estiver úmida ou molhada e, também, a diminuição de ruído frente à ação dinâmica dos pneus, assegurando conforto em vias urbanas e rurais. Automaticamente, vias melhoradas proporcionam economia aos usuários, uma vez que os custos de operação e manutenção dos veículos se associam às condições de rolamento (BALBO, 2007).

Geralmente, as camadas inferiores são menos resistentes. Desse modo, a estrutura do pavimento é idealizada para receber e transmitir esforços, aliviando pressões sobre as camadas abaixo. Segundo Balbo (2007), para que funcionem adequadamente, as diversas camadas devem trabalhar com deformações compatíveis com sua natureza e capacidade portante, a fim de evitar possíveis rupturas e danos. Cada camada possui determinadas funções, proporcionando as condições necessárias para o tráfego de veículos. Conforme o autor, as condições mínimas para que a estrutura seja chamada de pavimento incluem a existência de revestimento, sendo ele até mesmo primário, e subleito, excluindo pavimentos que não possuem solo de fundação, como o caso de pontes e outras obras de arte.

Conforme a espessura de cada uma das camadas e suas interações, além da rigidez e as características do subleito, irá se delinear o comportamento estrutural do conjunto denominado pavimento. A engenharia rodoviária classifica os pavimentos conforme a sua rigidez, sendo rígido ou flexível. Os pavimentos rígidos possuem uma camada superficial de concreto de cimento Portland, comumente apoiada sobre

material granular ou estabilizado com cimento, assente sobre o subleito ou reforço do subleito. Quanto ao pavimento flexível, esses possuem um revestimento composto por uma camada superficial asfáltica apoiada sobre as demais camadas que serão constituídas por materiais granulares, solos ou misturas de solos, sem adição de agentes cimentantes (MOTTA *et al.*, 2008).

Segundo Senço (2007, p. 23),

Pavimentos flexíveis são aqueles em que as deformações, até um certo limite, não levam ao rompimento. São dimensionados normalmente a compressão e a tração na flexão, provocada pelo aparecimento das bacias de deformação sob as rodas dos veículos, que levam a estrutura a deformações permanentes, e ao rompimento por fadiga.

Além das classificações de pavimento rígido e flexível, alguns autores também sugerem os pavimentos semirrígidos. O DNIT (2006a) aponta como características dos pavimentos desse grupo aqueles que, apesar de possuírem revestimento asfáltico, possuem uma base cimentada. Há certa liberdade em se utilizar de camadas flexíveis e rígidas em uma mesma estrutura, como uma camada de revestimento de concreto asfáltico sobre uma base de solo cimento (SENÇO, 2007).

Muitos autores trazem terminologias e definições para o que consideram as principais camadas do pavimento, como Senço (2007) e Balbo (2007). A seguir, apresentam-se algumas nomenclaturas e principais características de camadas de pavimentos asfálticos descritas por ambos os autores:

- Subleito: representa a camada final de terraplenagem ou de um leito antigo de estrada de terra, possuindo uma espessura considerada infinita. Os esforços expostos em sua superfície serão dissipados conforme a profundidade, devendo-se ter maior cuidado com os primeiros extratos onde haverá maior magnitude de cargas. Em consequência, apenas essa camada mais próxima da superfície é considerada como sendo subleito, já que as pressões exercidas se tornam desprezíveis a medida que se aprofunda no maciço;

- Reforço de subleito: quando o subleito apresenta baixa resistência aos esforços verticais, pode-se fazer uso de uma camada de reforço com material de qualidade superior. Sendo assim, sua função é de resistir e distribuir os esforços verticais, mas não é destinado para absorver definitivamente, pois essa função é atribuída ao subleito. O reforço do subleito é uma camada de espessura constante sobre o subleito regularizado. No entanto, o seu emprego não é obrigatório, uma vez que espessuras

maiores em camadas superiores (base e sub-base) poderiam suprir essa necessidade. Contudo, acaba por se tornar economicamente mais viável realizar o reforço do subleito;

- Base: localiza-se imediatamente abaixo do revestimento, fornecendo suporte estrutural e, devido a sua rigidez, alivia as tensões do revestimento e as distribui para as camadas inferiores. Além disso, pode também exercer a função de drenagem subsuperficial dos pavimentos. A base pode ou não ser complementada pela sub-base e pelo reforço do subleito, o que dependerá das características do local e do projeto de dimensionamento. Há uma diversa gama de materiais que podem ser empregados, como por exemplo: solo estabilizado naturalmente, misturas de solos e agregados, brita graduada, brita graduada tratada com cimento, solo estabilizado quimicamente com ligante hidráulico ou asfáltico, concretos, etc;

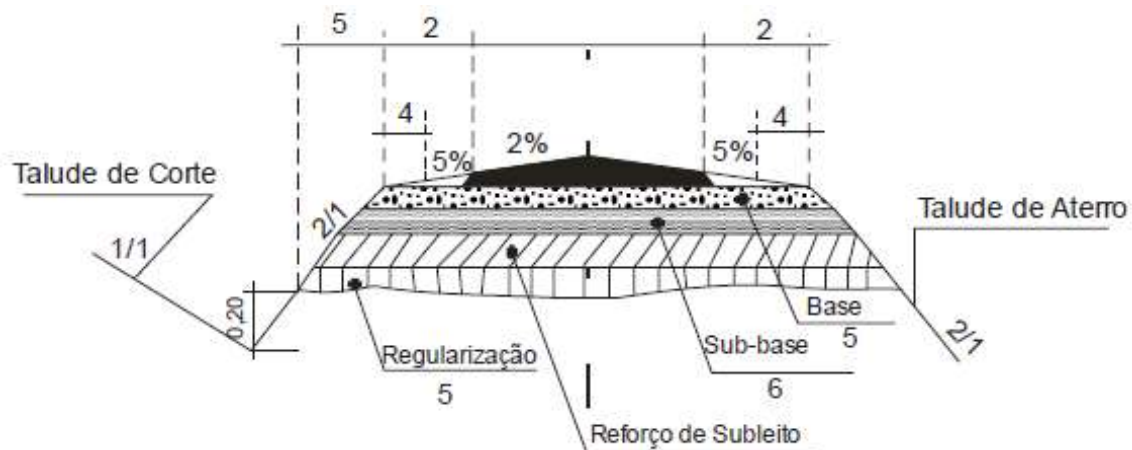
- Sub-base: adota-se quando a base exigida se torna muito espessa e, por isso, divide-se em outra camada por questões construtivas e econômicas. Quanto aos materiais empregados para a execução de sub-bases, eles devem possuir características superiores ao material de reforço;

- Revestimento: camada que deve ser composta por materiais bem aglutinados ou de maneira a travar a movimentação horizontal, visto que uma de suas funções é receber cargas sem sofrer grandes deformações elásticas ou plásticas, desagregação de componentes ou perda de compactação. Sua constituição é basicamente de agregados e ligantes asfálticos e, muitas vezes, a camada é dividida em outras, com diferentes materiais, devido a razões técnicas, construtivas e de custos;

- Imprimações entre camadas: entre muitas das camadas citadas anteriormente, é necessária a aplicação de um filme plástico. Dentre as funções, destacam-se: selagem, aderência ou impermeabilização.

O Manual de Pavimentação do DNIT (2006a) traz uma seção transversal típica do pavimento com os principais elementos constituintes, a qual é representada na Figura 1.

Figura 1 – Seção transversal do pavimento



Fonte: DNIT, 2006a.

2.2 Reciclagem de pavimentos

De acordo com Motta *et al.* (2008), a reciclagem de pavimentos consiste em um processo onde as misturas asfálticas envelhecidas e deterioradas são reutilizadas para a produção de novas misturas. Bonfim (2007) ressalta que existem diversas maneiras de executar a reciclagem e vários modos de utilizar o material, incluindo, como sendo um dos tipos mais comuns, o uso como base reciclada.

Segundo o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT (2006b), a reciclagem dos pavimentos existentes é uma solução que oferece muitas vantagens em relação a utilização convencional de materiais virgens. Dentre esses benefícios, citam-se:

- Conservação de agregados, de ligantes e de energia. A reutilização de agregados proporciona uma diminuição da demanda de novos materiais e das respectivas distâncias de transporte, o que prolonga o tempo de exploração das ocorrências existentes;
- Preservação do meio ambiente, uma vez que se evita a exploração excessiva de jazidas minerais;
- Restauração das condições geométricas existentes, pois as técnicas de reciclagem possibilitam que essas condições sejam facilmente mantidas ou modificadas, evitando problemas como alturas de túneis e acréscimo de carga permanente em pontes e viadutos.

Para se realizar a reciclagem de pavimentos é necessário que haja o corte do mesmo. Atualmente, a técnica amplamente empregada é a fresagem de pavimentos asfálticos, que consiste no “corte ou desbaste de uma ou mais camadas do pavimento, com espessura pré-determinada, por meio de processo mecânico realizado a quente ou a frio, empregado como intervenção visando a restauração de pavimentos” (BONFIM, 2007, p. 20).

Há uma vasta gama de técnicas empregadas para a reciclagem com material asfáltico fresado. O desenvolvimento da reciclagem varia em cada país e região, surgindo a partir da necessidade de proteger o meio ambiente, considerando fatores como a economia de recursos naturais (agregados), espaços físicos (descargas), energia e a redução dos gases de efeito estufa (BROSSEAUD, 2011).

Os Estados Unidos foram responsáveis por implantar as primeiras formas de reciclagem de pavimentos, datadas em 1915. Apesar de terem começado a utilizar técnicas de reciclagem há mais de 100 anos, as atuais formas de reciclagem foram desenvolvidas a partir de 1970. Segundo Bonfim (2007), na década de 1970 houve a crise do petróleo, resultando na escassez de materiais asfálticos e ainda na crise econômica internacional. Dentro deste contexto, técnicos rodoviários internacionais, em conjunto com os organismos de fomento, passaram a considerar a ideia de reprocessar os materiais de pavimentação das pistas deterioradas, utilizando-se da reciclagem para restaurar as condições de trafegabilidade no ponto de vista técnico e financeiro.

Atualmente, pesquisas no país afirmam que a reciclagem é uma técnica viável e que, quando feita adequadamente, pode trazer resultados técnicos semelhantes ou até mesmo superiores em relação às camadas convencionais (*Federal Highway Administration - FHWA*, 1997). No Brasil, empregou-se pela primeira vez a reciclagem no ano de 1960, no Rio de Janeiro. Na época, removia-se o revestimento com marteletes e o transportava para a usina, onde era remisturado (PINTO, 1989 *apud* COSTA e FILHO, 2010). Conforme Bonfim (2007), o equipamento de fresagem foi concebido na metade da década 1970, sendo uma ferramenta adequada que garante o desbaste do pavimento em profundidades pré-determinadas. Assim, a técnica de fresagem foi adotada no ano de 1980 no Brasil, nas obras de restauração da Via Anchieta.

Ao mesmo tempo, o Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) do DNIT desenvolvia um estudo para que as tecnologias de reciclagem desenvolvidas na Itália

e na Suíça pudessem ser adequadas às condições no Brasil. Tendo estas obras como base, foi possível que o DNIT elaborasse a especificação de serviço de concreto betuminoso reciclado a quente no local (COSTA e FILHO, 2010).

Atualmente, para escolher o melhor processo para a reciclagem de pavimentos, o DNIT (2006b) sugere uma série de considerações que orientam quanto à seleção. Abaixo, listam-se os itens conforme dispostos no documento:

- Condições e superfície (trincamentos, desgastes, afundamentos nas trilhas de roda, etc.);
- Capacidade estrutural;
- Qualidade do material;
- Disponibilidade de material virgem;
- Irregularidade longitudinal;
- Resistência à derrapagem (se o material for usado para camada de revestimento);
- Localização e extensão do trecho;
- Classe da rodovia;
- Seção transversal do pavimento;
- Condições geométricas;
- Tráfego (atual e futuro);
- Condições de remanejamento do tráfego;
- Disponibilidade de equipamento;
- Características do subleito e da base;
- Objetivo da restauração.

Dessa forma, ensaios, tanto de campo como de laboratório, devem ser realizados para se determinar a quantidade de materiais disponíveis no pavimento e quais os tipos de estabilizadores devem ser utilizados. A partir disso, desenvolve-se um projeto preliminar, considerando as opções de modalidade e buscando-se a alternativa mais viável economicamente. Quando selecionada, dimensiona-se a nova seção do pavimento e novos ensaios de laboratório são realizados para se determinar o teor de estabilizante ou agente reciclador, buscando também determinar os custos de operação e as especificações para a execução. Após a realização do serviço, o desempenho dos materiais reciclados deve ser avaliado ao longo do período de tempo de vida útil (DNIT, 2006b).

2.3 Caracterização tecnológica das camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis

Os materiais empregados para base e sub-base, bem como de reforço do subleito de pavimentos flexíveis, são escolhidos através de métodos de seleção e de caracterização de propriedades. Quando compactados para o uso na pavimentação, devem apresentar resistência, serem pouco deformáveis e possuir permeabilidade compatível com sua função. De maneira geral, a seleção e a caracterização dos agregados que serão utilizados são feitas através da distribuição granulométrica, resistência, forma e durabilidade dos grãos (MOTTA *et al.*, 2008).

2.3.1 Granulometria

A granulometria define as porcentagens de partículas, em função das dimensões constituintes do material. A análise, dependendo das características do material, distingue-se em dois tipos: peneiramento, onde o material passa pelas peneiras especificadas; e sedimentação, referente a queda das partículas após a dispersão em água e depósito, fazendo-se o uso ou não de defloculante (SENÇO, 2007).

A partir dos resultados da análise granulométrica, obtém-se a curva granulométrica, onde o eixo das ordenadas corresponde às porcentagens passante nas peneiras, adotando-se uma escala linear, e o eixo das abscissas corresponde às aberturas das peneiras, em escala logarítmica, podendo apresentar diversas formas. A partir da composição granulométrica, é verificado se o material está ou não em determinada faixa requerida, a depender do uso a qual se destinará (SENÇO, 2007).

Há também o ensaio de Equivalente de Areia (EA), utilizado para o controle de finos dos materiais granulares empregados para a pavimentação. Esse ensaio consiste em determinar “a relação entre a altura de areia depositada após 20 minutos de sedimentação e a altura total de areia depositada mais a de finos (silte e argila) em suspensão, após aquele mesmo tempo de sedimentação, numa solução aquosa de cloreto de cálcio” (DNIT, 2006a, p.37).

Assim, torna-se importante a granulometria para a escolha do material que irá se utilizar nas camadas dos pavimentos. Em se tratando de reciclagem, faz-se necessário determinar a granulometria dos agregados para que seja possível dosar os componentes da mistura final reciclada, uma vez que determinará a necessidade

de adição de novos agregados para enquadrar a mistura na faixa requerida conforme a função que irá desempenhar na estrutura. Dessa forma, irá se garantir a qualidade do produto final (DNIT, 2006b). O DAER (1998), por sua vez, traz faixas granulométricas para serem adotadas em bases granulares. Essas faixas estão expostas na Tabela 1 e, para a definição das classes, atenta-se aos requisitos expostos na Tabela 2.

Tabela 1 – Faixas granulométricas do DAER para bases granulares

Tamanho da peneira	Porcentagem que passa					
	Classe A		Classe B		Classe C	
	Tamanho máximo 1 1/2"	Tamanho máximo 3/4"	Tamanho máximo 1 1/2"	Tamanho máximo 3/4"	Tamanho máximo 1 1/2"	Tamanho máximo 3/4"
2"	100	-	100	-	-	-
1 1/2"	90-100	-	90-100	-	-	-
1"	-	100	-	100	100	100
3/4"	50-85	90-100	50-85	90-100	-	-
3/8"	-	-	-	-	50-85	60-100
nº 4	30-45	35-55	25-45	35-55	35-65	50-85
nº 30	10-25	10-30	10-25	10-30	17-34	28-50
nº 200	2-9	2-9	2-9	2-9	5-15	5-20

Fonte: DAER, 1998.

Tabela 2 – Requisitos mínimos, em porcentagem, para definição de classes

Ensaio	Classe		
	A	B	C
ISC	100	90	80
EA	50	40	30
Partículas em peso	90	70	25

Fonte: DAER, 1998.

Além dos requisitos supracitados na Tabela 2, há outras exigências para enquadrar o material em determinada faixa. Em relação à classe A e B, é exigida que a diferença entre as porcentagens que passam na peneira de nº 4 e na nº 30 variem entre 15% e 25%. Para a classe C, o mesmo não é levado em conta.

2.3.2 Compactação das camadas granulares e Índice de Suporte Califórnia

Para que a compactação ocorra, é necessária a aplicação de pressão, impacto ou vibração, fazendo com que as partículas do material tenham um contato mais íntimo causado pela expulsão de ar. Com isso, é possível “reduzir a tendência de variação dos teores de umidade dos materiais integrantes do pavimento durante a vida de serviço” (DNIT, 2006a, p. 41).

O ensaio de compactação consiste em compactar uma amostra do material em um cilindro, em camadas sucessivas, com o uso de um soquete. Repete-se o procedimento para teores de umidade distintos e, para cada um, determina-se a massa específica aparente seca. A partir dos resultados, gera-se uma curva em função do teor de umidade e da massa específica aparente seca, visando a determinação da umidade ótima, ponto esse que corresponderá à massa específica aparente seca máxima (DAER, 2001a).

Dependendo do tipo de material a ser ensaiado e de sua aplicação, adotam-se diferentes energias de compactação. Para os ensaios em laboratório realizados em bases estabilizadas granulometricamente, o DNIT (2010a) orienta a adoção de uma energia de Proctor modificada, utilizando-a tanto para ensaios de compactação como para a determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC).

Idealizado nos anos 30, o ISC, também conhecido pela nomenclatura inglesa *California Bearing Ratio* (CBR), relaciona a resistência à penetração do material com um valor padrão estabelecido para uma brita graduada de alto desempenho (MOTTA *et al.*, 2008). Em laboratório, o ensaio é realizado em corpos de prova que permanecem submersos em água por um período de quatro dias, sendo medida, complementarmente, a expansão sofrida pelo material no mencionado período.

Para utilização em camadas de pavimento, algumas condições são exigidas pelo DNIT, seguindo normas distintas. A Tabela 3 tem a finalidade de expor os requisitos exigidos para as diversas camadas, atentando-se para os limites de ISC e expansão.

Tabela 3 – Condições para camadas inferiores de pavimentos

Parâmetros	Regularização do subleito	Reforço do subleito	Sub-base	Base
ISC	$\geq 2\%$	ISC reforço > ISC subleito	$\geq 20\%$	$\geq 80\%$ para $N \geq 5 \times 10^6$ $\geq 60\%$ para $N < 5 \times 10^6$
Expansão	$< 2\%$	$\leq 1\%$	$< 1\%$	$< 0,5\%$

Fonte: DNIT, 2010a; DNIT, 2010b; DNIT, 2010c; DNIT, 2010d.

2.3.3 Resistência à compressão simples

A resistência à compressão simples é determinada através da aplicação de um carregamento crescente de compressão axial em corpos de prova cilíndricos. Nesse ensaio, não há tensão de confinamento atuante no corpo de prova (MOTTA *et al.*, 2008).

O DNIT, através da Norma ME 180/94 (DNIT, 1994), normatiza a determinação da resistência à compressão simples em solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada para serem utilizados em camadas de base e sub-base de pavimentos. O procedimento, porém, pode ser estendido para corpos de prova moldados com materiais granulares.

Em se tratando de base com adição de cimento, o DNIT (2010e) fixa o valor mínimo de resistência à compressão como sendo 2,1 Mpa após a cura de 7 dias. Assim, tem-se como referência esse valor de resistência para o emprego do material em camadas de base de pavimentos.

2.3.4 Resistência à tração por compressão diametral

O DAER, através da Norma EL 218/01 (DAER, 2001a), indica como deve se dar a determinação da resistência à tração por compressão diametral em misturas betuminosas. Para corpos de prova moldados com materiais granulares, a mesma metodologia pode ser também adotada.

Em suma, o ensaio consiste em submeter o corpo de prova cilíndrico, disposto na posição horizontal, a uma compressão na vertical aplicada diametralmente, sendo que, na direção horizontal, uma força de tração será gerada. Quando ocorre a ruptura da amostra, o plano de ruptura se iguala ao plano de aplicação de cargas e o ensaio será válido somente se isso ocorrer (BALBO, 2007).

2.3.5 Módulo de Resiliência

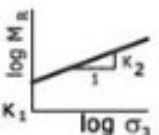
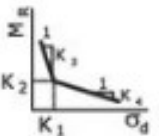
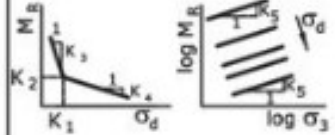
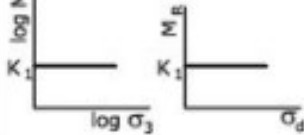
Os revestimentos asfálticos estão sujeitos ao fenômeno da fadiga, ruptura do material quando solicitado inúmeras vezes por cargas menores que a tensão de ruptura elástica do material, em regime elástico. O termo deformação resiliente busca diferenciar as deformações elásticas que ocorrem em pavimentos flexíveis, sob a ação de cargas repetidas, das deformações de outras estruturas que não possuem um carregamento aleatório como os resultantes do tráfego (DNIT, 2006b). Assim, o MR é definido como uma constante elástica empregada para se analisar os sistemas das camadas de pavimentos. Desta forma, indica-se a capacidade dos materiais de não conservar deformações depois de encerrada a ação de uma carga (BALBO, 2007).

Um meio para determinação do MR em solos e materiais granulares é através do ensaio triaxial de cargas repetidas, utilizando-se de equipamentos em laboratório. Neste ensaio, o material é compactado nas condições representativas do projeto e obra e a aplicação de carga é semi-senoidal, que se aproxima do carregamento da passagem de roda no pavimento, tendo aplicação total de carga em 0,1 segundos e repouso de 0,9 segundos. Utiliza-se de diferentes tensões de confinamento e solicitantes em uma combinação variada, gerando deslocamentos durante os ciclos de repetição de carga, onde uma parcela é recuperável e outra é acumulada ou permanente, devendo essa última ter pequena magnitude (MOTTA *et al.*, 2008).

Além da determinação do módulo por meio de ensaios laboratoriais, outra maneira de defini-lo é através de considerações em campo. Assim, essa verificação é feita mediante a interpretação das deformações ocorridas durante provas de carga, utilizando-se da retroanálise de MR (BALBO, 2007). Motta *et al.* (2008) indicam que o MR pode ser estimado por técnicas em campo, com testes rápidos e não-destrutivos, facilitando assim a uniformização entre os procedimentos de dimensionamento de pavimentos novos e de reforço de pavimentos antigos.

Os autores Medina e Motta (2015) apresentam os primeiros modelos de MR de solos brasileiros definidos em função do estado de tensões, conforme Tabela 4. Nas equações, utilizam-se os seguintes dados do ensaio: tensões normais principais (σ_3 e σ_1), tensão desvio (σ_d) e coeficientes K. Para solos predominantemente granulares, conforme exposto nas equações referentes aos solos arenoso e areno-argiloso, observa-se que o MR dependerá principalmente da tensão confinante (σ_3) ou da soma das tensões principais ($\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3 = \sigma_d + 3\sigma_3$).

Tabela 4 – Primeiros modelos de comportamento tensão-deformação de solos observados no Brasil

MODELO	EQUAÇÃO	MODELO	EQUAÇÃO
arenoso 	$M_R = K_1 \sigma_3^{K_2}$	areno-argiloso 	$M_R = K_1 \theta^{K_2}$ $K_2 > 0$
argiloso 	$M_R = K_2 + K_3 (K_1 - \sigma_d)$ $\sigma_d < K_1$ $M_R = K_2 + K_4 (\sigma_d - K_1)$ $\sigma_d > K_1$	areno-argiloso 	$M_R = K_1 \sigma_d^{K_2}$ $K_2 < 0$
combinado 	$M_1 = K_2 + K_3 (K_1 - \sigma_d)$ $\sigma_d < K_1$ $M_1 = K_2 + K_4 (\sigma_d - K_1)$ $\sigma_d > K_1$ $M_R = M_1 \sigma_3^{K_5}$	constante 	$M_R = K_1 = \text{constante}$

Fonte: Medina e Motta, 2015.

2.4 Dimensionamento de pavimentos flexíveis

Para que sejam definidas espessuras de camadas e tipos de materiais a serem utilizados, de forma a atender as funções à qual o pavimento é condicionado, é necessário dimensioná-lo. A potencialidade de certa seção de um pavimento projetado atender satisfatoriamente, durante o período de projeto, às solicitações de tráfego e às condições ambientais dizem respeito a confiabilidade de um projeto de pavimentação (*American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO, 1993*).

Para tanto, inúmeros métodos foram desenvolvidos ao longo do tempo em virtude dos diversos fatores presentes em condições locais, sendo a principal diferença a utilização de critérios distintos de ruptura da estrutura do pavimento, podendo essa ser: plástica, quando o pavimento não suporta mais as cargas aplicadas e apresenta intensa deformação plástica; por fadiga, de natureza estrutural; e funcional ou operacional, quando o pavimento não apresenta mais condições para o usuário no que se refere à conforto e segurança ao rolamento (Balbo, 2007).

Motta (1991) introduziu conceitos que abordam, de modo racional, os diferentes fatores de dimensionamento e a questão de confiabilidade. Segundo Medina e Motta (2015), o conhecimento atual adquirido da mecânica dos pavimentos já permite avançar para técnicas mais modernas, uma vez que há muitas críticas aos métodos empíricos adotados.

A tendência mundial é a adoção de métodos mecanísticos para dimensionamento de pavimentos, fundados em sólidas bases analíticas e experimentais, os quais utilizam programas computacionais para análise estrutural e que, por sua vez, tornaram-se mais acessíveis, resultando na difusão da técnica de análise. Além disso, diversos laboratórios de pavimentação estão introduzindo equipamentos e ensaios que possibilitam o dimensionamento de forma a adotar métodos mais racionais com bases mecanísticas (MEDINA e MOTTA, 2015).

2.4.1 Método de dimensionamento do DNIT (DNER/1981)

Embasado no trabalho *Design of Flexible Pavements Considering Mixed Loads and Traffic Volume*, o engenheiro Murilo Lopes de Souza propôs um método para o dimensionamento de pavimento flexível, desenvolvido dada a experiência do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América do Norte e em conclusões a partir da Pista Experimental da *American Association of State Highway Officials* (AASHTO) (BALBO, 2007; DNIT, 2006a).

Esta pista experimental, localizada na cidade de Ottawa nos Estados Unidos, foi planejada em 1951, concluída em 1958 e monitorada até 1960. O método da AASHTO (1993) fundamentava-se na análise estatística de dados verificados na pista, avaliando os efeitos das cargas do tráfego através de fatores de equivalência estrutural, estabelecendo relações entre a repetição de cargas e as espessuras das camadas e perda de qualidade de trafegabilidade do pavimento em termos da variação da serventia (BALBO, 2007; AASHTO, 1993).

A partir disso, desenvolveu-se no Brasil o método de dimensionamento proposto pelo DNIT, o qual tem como objetivo a proteção do subleito contra as deformações plásticas que possam vir a surgir no decorrer do tempo (DNIT, 2006a). Trata-se de um método semi-empírico, uma vez que a fadiga de misturas asfálticas e também de bases cimentadas não são consideradas nos cálculos. Ele é baseado principalmente no critério do ISC e, dessa forma, o modo de ruptura apresentado remete ao “acúmulo

de deformações plásticas causado pelos esforços de cisalhamento que ocorrem no subleito e nas demais camadas granulares do pavimento ao longo do período de projeto” (BALBO, 2007, p. 384).

O pavimento é dimensionado também de acordo com o número equivalente (número N) de operações de um eixo tomado como padrão, durante o período estipulado de projeto, e há exigências de espessura mínima para revestimento betuminoso (DNIT, 2006a). O número N, por sua vez, pode ser determinado “pelo número de repetições de um eixo-padrão de 8,2 t (18.000 lb ou 80 kN), durante o período de vida útil do projeto, que teria o mesmo efeito que o tráfego previsto sobre a estrutura do pavimento” (DNIT, 2006c, p. 245).

Dando continuidade, determinam-se as espessuras em função de ábaco ou equações, a depender dos parâmetros já obtidos. Para obtenção desses valores, o Manual de Pavimentação do DNIT (2006a) traz a seguinte sequência de cálculo:

- Determinação do coeficiente de equivalência estrutural: conforme o material, adotam-se os coeficientes presente na Tabela 5.

Tabela 5 – Coeficiente de equivalência estrutural

Componentes do pavimento	Coeficiente K
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento betuminoso por penetração	1,20
Camadas granulares	1,00
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, superior a 45 kg/cm ²	1,70
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 45 kg/cm ² e 28 kg/cm ²	1,40
Idem, com resistência à compressão a 7 dias, entre 28 kg/cm ² e 21 kg/cm ²	1,20

Fonte: DNIT, 2006a.

Genericamente, os coeficientes estruturais são designados, conforme a camada, da seguinte forma: KR para revestimento, KB para base, KS para sub-base e KRef para reforço.

- Determinação da espessura mínima para o revestimento betuminosos: através do disposto na Tabela 6, visa-se determinar as espessuras mínimas especialmente para bases de comportamento puramente granular, levando em consideração o N.

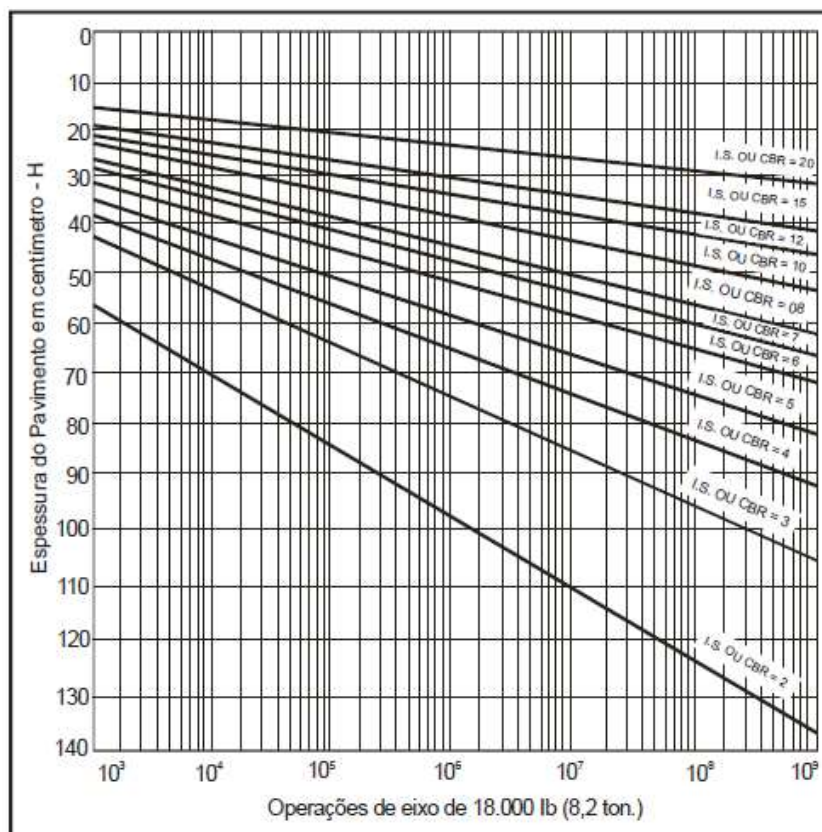
Tabela 6 – Espessura mínima de revestimento betuminoso

N	Espessura mínima do revestimento betuminoso
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,00 cm de espessura
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,50 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10,00 cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,50 cm de espessura

Fonte: DNIT, 2006a.

• Dimensionamento do pavimento: através do gráfico da Figura 2, o qual é em função de N e do ISC, considerando base granular K=1,00, são obtidas as espessuras das camadas. Para isso, entra-se com o valor de N em abcissa e avança-se verticalmente até a reta que representa o valor obtido do ISC e, procedendo-se horizontalmente até a ordenada, obtém-se a espessura do pavimento.

Figura 2 – Gráfico para determinação de espessuras do pavimento



Fonte: DNIT, 2006a.

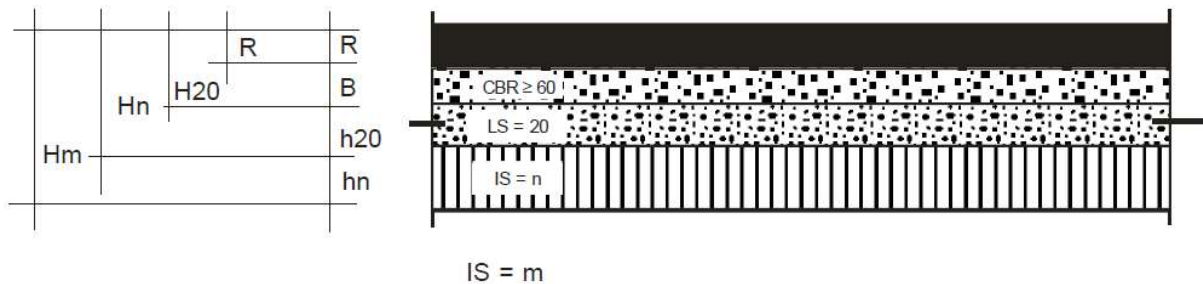
Caso o N seja maior que 10^6 , a espessura total será determinada pela Equação 1.

$$H_t = 77,67 \times N^{0,0482} \times ISC^{-0,598} \quad (1)$$

Para camadas granulares, a espessura máxima de compactação é de 20cm e a mínima de 10cm. Quanto a espessura construtiva, o mínimo admitido é de 15cm.

O gráfico presente na Figura 2 e a Equação 1 irão determinar H_m (espessura total), H_n (soma da espessura da sub-base, da base e do revestimento) e H_{20} (soma da espessura da base e do revestimento). A estrutura genérica aqui considerada é a disposta na Figura 3.

Figura 3 – Dimensionamento do pavimento flexível



Fonte: DNIT, 2006a.

A partir disso, prossegue-se com cálculos para obtenção das espessuras reduzidas, isto é, da espessura de cada camada que compõem o pavimento. Para a determinação de R (espessura do revestimento), B (espessura da base), h_{20} (espessura da sub-base) e h_n (espessura do reforço), utilizam-se as Equações 2, 3 e 4, apresentadas a seguir.

$$R \times K_R + B \times K_B \geq H_{20} \quad (2)$$

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_S \geq H_n \quad (3)$$

$$R \times K_R + B \times K_B + h_{20} \times K_S + h_n \times K_{Ref} \geq H_m \quad (4)$$

Ademais, no mesmo manual (DNIT, 2006a), há considerações sobre o acostamento, sugerindo-se adotar a mesma estrutura da pista de rolamento, além de outras alternativas, uma vez que a solicitação de cargas no acostamento é diferente da pista de rolamento. Outra sugestão existente no documento diz respeito à pavimentação por etapas, utilizada quando não se é possível obter dados seguros sobre a composição do tráfego.

2.4.2 Método mecanístico-empírico

Segundo Balbo (2007), a metodologia mecanística-empírica surge a partir da calibração de modelos teóricos, contendo dados experimentais de campo e laboratório. Os critérios utilizados procuram avaliar o comportamento estrutural de sistemas de camadas como pavimentos, de forma mais coerente e analítica, onde a definição dos materiais é associada ao conhecimento empírico, laboratorial ou de pista. Atualmente, considera-se essa metodologia mais promissora em relação às demais, pois é a única a permitir que questões relacionadas à progressão de fratura dos materiais sejam absorvidas ao longo do tempo.

Em suma, Medina e Motta (2015) definem que, para o dimensionamento de um pavimento novo, é preciso primeiro inserir dados de entrada, sendo esses relativos aos fatores ambientais, tráfego, materiais disponíveis e técnicas construtivas, utilizando-se do processamento por via mecanística. A partir disso, adotam-se critérios de decisão como os parâmetros de projeto e a confiabilidade de cada item e, na sequência, definem-se as espessuras admitidas e calcula-se, fazendo uso de programas computacionais, o estado de tensões e deformações considerando comportamento elástico-linear e elástico não-linear. A seguir, apresenta-se o roteiro para dimensionamento e principais definições:

- Definição do número N;
- Ensaio de materiais, tanto os disponíveis na região quanto do subleito, para determinação do MR e das leis de deformação permanente, considerando possíveis variações de umidade;
- Definição do MR para a mistura do revestimento em função da temperatura do local e dosagem;
- Tentativas de espessuras de cada camada e posterior definição da estrutura inicial;

- Cálculo do estado de tensões e deformações atuantes na estrutura, utilizando-se do eixo padrão, adotando um programa para cálculo de tensões considerando o resultado dos ensaios dinâmicos do material, que definirá se o comportamento é elástico linear ou não linear. Os parâmetros críticos para verificação englobam a deflexão prevista na superfície, a deformação de tração no revestimento (ou a tensão de tração ou a diferença de tensões) e a tensão ou deformação de compressão vertical no subleito;

- Para consideração da fadiga, recomenda-se adotar o critério que engloba a diferença de tensões no revestimento, uma vez que as curvas de fadiga são geradas a partir do ensaio de tração por compressão diametral e tensão controlada. As curvas são ajustadas com um fator laboratório-campo $FLC=10^4$ proposta por Pinto (1991 *apud* MEDINA e MOTTA, 2015);

- Para a deflexão admissível, fator que representa um controle de resistência à fadiga, é comum usá-lo como critério de degradação estrutural. Para tanto, utiliza-se a Equação 5 (PREUSSLER, 1983 *apud* MEDINA e MOTTA, 2015);

$$\log D_{adm} = 3,148 - 0,188 \times \log N \quad (5)$$

Onde:

D_{adm} = deflexão admissível, em mm x 10^{-2} ;

N = número N calculado com os fatores de equivalência da USACE.

- Para o controle da tensão vertical de ruptura do subleito e da deformação permanente acumulada, adota-se a Equação 6 (HEUKELOM e KLOMP, 1962 *apud* MEDINA e MOTTA, 2015), referente à condição limite de suporte quanto à ruptura plástica;

$$\sigma_v(adm) = c \frac{MR}{1 + 0,7 \log_{10} N} \quad (6)$$

Onde:

$\sigma_v(adm)$ = tensão normal vertical admissível no topo do subleito, em Pa;

c = 0,006 ou 0,008;

MR = módulo de resiliência do subleito, em MPa;

N= número N calculado com os fatores de equivalência da AASHTO, não se adotando FLC.

- Os valores obtidos nos cálculos devem ser comparados com os critérios de ruptura determinados em função do número N, que definem a vida útil do pavimento;
- Verificação do afundamento de trilha de roda, considerando todas as camadas, e comparação com valores admissíveis. Para alguns países, adota-se 10 mm para autoestradas e 16 mm para estradas com menor volume de tráfego;
- Determinação das espessuras que serão realmente utilizadas. Caso a estimativa inicial tenha contemplado todos os critérios, considera-se dimensionado o pavimento. Em caso negativo, alteram-se as espessuras das camadas e procede-se novamente os cálculos.

Medina e Motta (2015), através da Equação 7, definem limites para deformações verticais admissíveis no subleito, também dependentes do número N. Para definir os valores de coeficientes presentes na equação, consultaram a bibliografia de diversos autores e definiram valores que podem ser adotados como referência, conforme exposto na Tabela 7.

$$N=a(\varepsilon_v)^{-b} \quad (7)$$

Onde:

N= número N calculado com os fatores de equivalência da AASHTO;

ε_v = deformação vertical admissível no topo do subleito;

a e b= constantes conforme Tabela 7.

Tabela 7 – Constantes para definição de deformações verticais admissíveis no subleito

Autores	a	b
Método do <i>Asphalt Institute</i> (EUA)	$1,365 \times 10^{-9}$	4,477
LCPC (França)	$2,227 \times 10^{-9}$	4,505

Fonte: Medina e Motta, 2015.

Em se tratando de concreto asfáltico, o limite de ruptura ocorre quando a mistura começa a apresentar microtrincas. Foi observado que, quando a deformação de tração é inferior a 70×10^{-6} , a vida de fadiga do revestimento não é afetada, resistindo durante o período de projeto (CARPENTER *et al.*, 2003 *apud* MOTTA *et al.*, 2008).

2.4.3 Método de dimensionamento de pavimentos rodoviários da África do Sul

O manual de dimensionamento de pavimentos rodoviários da África do Sul (SANRAL, 2013) adota uma metodologia para o dimensionamento de pavimentos flexíveis também considerada mecanística-empírica, servindo para estimar a capacidade estrutural de pavimentos flexíveis. Este método abrange modelos de cálculo relacionados à fadiga asfáltica da mistura à quente em camadas superficiais finas e em camadas espessas de base; base e sub-base granulares; base e sub-base cimentadas; e a deformação permanente do subleito.

Para análise, o eixo padrão adotado no método é equivalente a um eixo de 80 kN de eixo simples rodagem dupla. Outro aspecto importante que o método considera diz respeito à categoria das diferentes estradas, conforme a Tabela 8. Na África do Sul, para tal classificação, leva-se em consideração a importância e o nível de serviço exigido para a estrada em questão. A confiabilidade aproximada da capacidade estrutural de cada projeto estará associada à categoria e, além disso, para projetos de reabilitação, também fornecerá orientação sobre quais níveis percentuais devem ser utilizados para a avaliação da condição da estrada já existente.

Tabela 8 – Classificação das estradas

Categoria	A	B	C	D
Descrição	Auto-estradas e itinerários principais	Vias coletoras e estradas rurais	Estradas rurais de tráfego baixo e caminhos estratégicos	Estradas de acesso rural
Número N (x 10⁶)	3 a 100 em 20 anos	0,30 a 10 dependendo da estratégia de dimensionamento	< 3 dependendo da estratégia de dimensionamento	< 1 dependendo da estratégia de dimensionamento

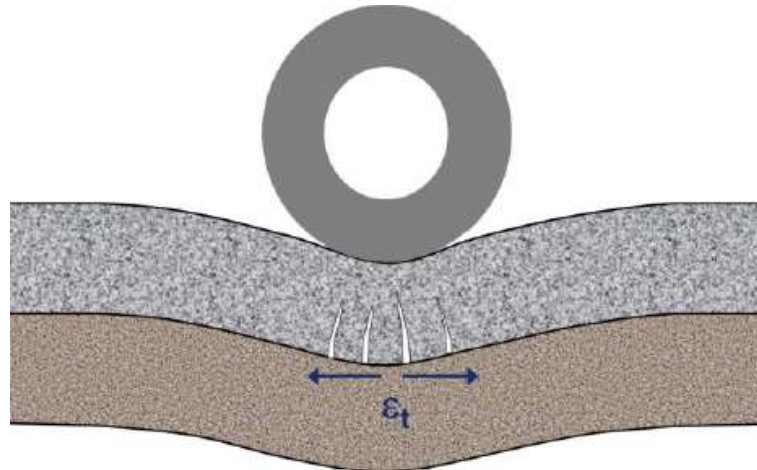
Fonte: SANRAL, 2013.

Por se tratar de um método mecanístico-empírico, segue-se a análise já descrita no item 2.4.2. Assim, para se obter as respostas estruturais do pavimento, empregam-se programas computacionais, como um *software*, que considerem a Teoria da Elasticidade.

Quanto ao revestimento asfáltico, o método o analisa apenas levando em consideração a fadiga, assumindo que as fissuras têm origem na parte inferior à

camada, a partir de uma tensão de tração (ϵ_t), e se propagam em direção à superfície, conforme ilustrado na Figura 4. A deformação permanente é considerada em função das propriedades da mistura e não quanto à função estrutural.

Figura 4 – Tensão horizontal de tração: fadiga nas misturas asfálticas



Fonte: SANRAL, 2013.

Para avaliar a transferência das fissuras entre camadas finas de revestimento, com menos de 50 mm de espessura, e mais espessas, com mais de 75 mm, utiliza-se a Equação 8, referente a vida de fadiga da estrutura.

$$N_f = 10^{\alpha(1 - \frac{\log \epsilon_t}{\beta})} \quad (8)$$

Onde:

N_f = vida de fadiga, número N calculado com os fatores de equivalência da AASHTO;

α e β = constantes em função do nível de confiabilidade exigido ou da categoria (Tabela 9 e 10);

ϵ_t = deformação horizontal admissível na base da camada de revestimento, em μ .

Tabela 9 – Constantes para critério de vida de fadiga em camada esbelta de revestimento (<50 mm)

Nível de confiança (categoria)	Granulometria contínua		Granulometria descontínua	
	α	β	α	β
95% (A)	17,400	3,400	15,790	3,705
90% (B)	17,460	3,410	15,850	3,719
80% (C)	17,540	3,420	16,930	3,736
50% (D)	17,710	3,460	16,090	3,774

Fonte: SANRAL, 2013.

Tabela 10 – Constantes para critério de vida de fadiga em camada espessa de revestimento (>75mm)

Nível de confiança (categoria)	Módulo de Deformabilidade (MPa)									
	1000		2000		3000		5000		8000	
	α	β	α	β	α	β	α	β	α	β
95% (A)	16,440	3,378	16,090	3,357	15,780	3,334	15,520	3,317	15,086	3,227
90% (B)	16,810	3,453	16,430	3,428	16,110	3,403	15,730	3,362	15,296	3,272
80% (C)	17,250	3,543	16,710	3,487	16,260	3,435	15,830	3,383	15,390	3,291
50% (D)	17,870	3,671	17,170	3,583	16,680	3,524	16,100	3,441	15,650	3,346

Fonte: SANRAL, 2013.

Utiliza-se também um fator de amplificação (SF) considerando a espessura da camada de revestimento, o qual é multiplicado ao N_f . Caso a espessura seja menor que 25 mm, o SF será 1. Porém, se for igual ou superior a 25 mm, $SF=0,0489 \times (t-0,2225)$, onde t refere-se a espessura da camada em mm.

Quanto às camadas de base e sub-base granulares, considera-se que deformações permanentes são acumuladas pelas camadas e, portanto, o critério de dimensionamento tem a intenção de limitar deformações permanentes excessivas nesses materiais. Com base no modelo de Mohr-Coulomb, compara-se o estado de tensão atuante no meio da camada e os parâmetros de resistência ao cisalhamento, coesão e ângulo de atrito. Para fins de cálculo, utilizam-se as Equações 9 e 10.

$$N=10^{(\alpha F+\beta)} \quad (9)$$

Onde:

N = número limite de aplicações de carga do eixo padrão necessárias para ocorrência da ruptura por cisalhamento, sendo o número N calculado com os fatores de

equivalência da AASHTO;

α e β = constantes em função da categoria da estrada e da umidade da camada granular (Tabela 11);

F = fator de segurança, definido através da Equação 10.

$$F = \frac{\sigma_3 \left[K \left(\tan^2 \left(45 + \frac{\Phi}{2} \right) - 1 \right) \right] + 2Kc \tan \left(45 + \frac{\Phi}{2} \right)}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (10)$$

Onde:

$(\sigma_1 - \sigma_3)$ = tensões principais atuantes no meio da camada granular, considerando-se compressão positiva;

c = coesão;

Φ = ângulo de atrito interno;

K = constante em função da umidade da camada granular (0,65 se saturado, 0,80 se moderado e 0,95 se normal).

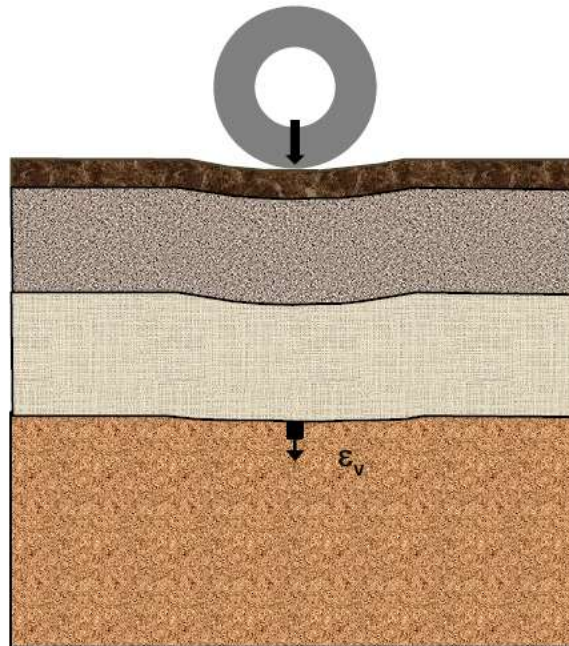
Tabela 11 – Constantes para critério de deformação permanente em camadas de base e sub-base granulares

Nível de confiança (categoria)	α	β
95% (A)	2,605122	3,480098
90% (B)	2,605122	3,707667
80% (C)	2,605122	3,983324
50% (D)	2,605122	4,510819

Fonte: SANRAL, 2013.

Quanto ao subleito, esse é analisado conforme a deformação permanente, a qual se manifesta na superfície do pavimento através do aparecimento de deformações verticais de compressão (ϵ_v), no topo da camada (Figura 5).

Figura 5 – Deformações no topo da camada de subleito



Fonte: SANRAL, 2013.

Essa extensão vertical no topo da camada do solo de fundação é definida a partir da Equação 11. Dois critérios distintos são adotados para análise da deformação permanente no topo da camada, a depender do tipo de estrada considerada, admitindo-se 10 mm (categorias A e B) ou 20 mm (categorias C e D) como limite da deformação permanente ao final do período determinado para vida útil da estrutura.

$$N_{PD} = 10^{(A - 10 \log \epsilon_v)} \quad (11)$$

Onde:

N_{PD} = número limite de aplicações de carga do eixo padrão para atingir o nível de deformação permanente previsto, sendo o número N calculado com os fatores de equivalência da AASHTO;

A = constante em função da categoria da estrada e do valor limite de deformação permanente (Tabela 12);

ϵ_v = deformação vertical admissível no topo do subleito, em μ .

Tabela 12 – Constantes para o critério de deformação permanente final

Nível de confiança (categoria)	Deformação permanente limite (A)	
	10 mm	20 mm
95% (A)	33,70	36,70
90% (B)	33,47	36,47
80% (C)	33,38	36,38
50% (D)	33,30	36,30

Fonte: SANRAL, 2013.

2.4.4 Método de dimensionamento MeDiNa

A partir do atual cenário das rodovias brasileiras, percebeu-se que os investimentos feitos são insuficientes e os métodos de manutenção, conservação e restauração utilizados acabam não sendo completamente eficientes. Com isso, viu-se a necessidade de desenvolver um novo método de dimensionamento de pavimentos de caráter mecanicista diante dos métodos vigentes no Brasil, que são predominantemente empíricos (FLORES E SPECHT, 2019).

Segundo a CNT (2018b, <<https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/novo-metodo-pavimentacao-asfaltica-dnit-breve>>), no ano de 2009, financiada pela Petrobras, a Rede Temática de Asfaltos, que engloba universidades e o IPR, iniciou um projeto para desenvolver um novo método de dimensionamento de pavimentos no Brasil. Assim, trechos de rodovias do país foram pavimentados, considerando locais de condições climáticas distintas e utilizando-se de diferentes tipos de soluções de monitoramento de desempenho.

A partir do estudo, o DNIT propõe um novo método de dimensionamento, chamado de MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos). O nome se deu em homenagem ao engenheiro Jacques de Medina, considerado liderança na área de geotecnia e pavimentação no Brasil. Assim, desenvolveu-se o programa computacional MeDiNa, que realiza a verificação e o dimensionamento de estruturas de pavimentos com uma abordagem mecanística-empírica por meio da rotina de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC) (FRANCO E MOTTA, 2018).

A análise ou dimensionamento dos pavimentos consiste na realização de cálculos e verificação dos critérios de área trincada e/ou deformação permanente, sem que seja alterada a espessura da camada selecionada. Após a inserção de todos os dados da estrutura e do tráfego, o programa emite três tipos de relatório: evolução

mensal de danos; resumo da deformação permanente e bacias de deflexão; e relatório completo de análise (SOUZA JÚNIOR, 2018).

O programa permite agilidade no processamento dos cálculos matemáticos e apresenta uma interface de fácil entendimento para o usuário. Porém, para a efetividade dos cálculos e confiabilidade dos mesmos, é necessário um amplo conjunto de informações, que devem ser inseridos. As informações necessárias para a análise da estrutura de um pavimento ou seu dimensionamento dizem respeito ao conhecimento do subleito, como MR e curva de deformação permanente. Além disso, para o correto funcionamento, é imprescindível a definição do Número N, pois modelos do programa se mostram sensíveis a pequenas variações do número, tornando de grande importância uma estimativa mais apurada. Esse número pode ser calculado no próprio *software* ou inserido manualmente pelo projetista (FRANCO e MOTTA, 2018).

2.5 Processos de estabilização de materiais

Os métodos que envolvem a estabilização de materiais estão relacionados com as técnicas de reciclagem, sendo amplamente empregados nas diferentes camadas do pavimento, uma vez que a estabilidade da rodovia depende diretamente da resistência, compactação e capacidade drenante desses materiais. Para que se obtenham materiais de boa qualidade, pode-se alterar as propriedades de diversas maneiras, as quais incluem os tratamentos químicos, térmicos, mecânicos e diversas outras possibilidades (INGLES, 1972 apud PIRES *et al.*, 2016).

Pesquisadores buscam métodos eficazes para se reutilizar o fresado asfáltico, o qual se encontra disponível com a execução de obras de restauração e que já perdeu muitas de suas propriedades. Por esse fato, o material se torna alvo de estudo para utilização na pavimentação como um material granular. Diante disso, diversos outros componentes ganham destaque como possíveis agentes de estabilização (PIRES *et al.*, 2016).

A mistura final oriunda da reciclagem dos pavimentos deve atender todos os quesitos de uma mistura convencional. Por esse motivo, deve-se atentar para a qualidade do material removido, dando-se ênfase para a granulometria dos agregados. Por vezes, torna-se necessária a estabilização granulométrica através da adição de novos agregados em quantidades adequadas (DNIT, 2006b).

No processo de estabilização granulométrica, a capacidade resistente do material *in natura* ou mistura de materiais é melhorada. Fazendo-se uso da energia de compactação adequada, obtêm-se propriedades superiores às encontradas anteriormente, melhorando a estabilidade e durabilidade do produto final (DNIT, 2010a; DNIT, 2010d).

Utilizando-se de bases e sub-bases granulares, a estabilização ocorre “pela compactação de um material ou de mistura de materiais que apresentem uma granulometria apropriada e índices geotécnicos específicos, fixados em especificações” (DNIT, 2006a, p. 96).

Estudos mostram que o uso de areia de fundição para estabilização granulométrica apresenta resultados promissores. Sabe-se que um dos maiores desafios atuais, em termos ambientais, está relacionado com a disposição adequada de resíduos sólidos. Sendo assim, visa-se uma reciclagem secundária como alternativa para o seu reuso e, neste contexto, ressalta-se o emprego do resíduo em camadas de base e sub-base de rodovias (KLINSKY, 2008).

Pesquisas para estabilização de material fresado também vêm sendo realizadas, como a desenvolvida por Pires *et al.* (2016). Nesse estudo, extraiu-se material fresado de rodovias e o compactou na forma na qual foram extraídos, sem adicionar outros materiais. Com ensaios de compactação e ISC, obtiveram parâmetros de resistência para dar seguimento ao estudo de novas dosagens utilizando-se de estabilizantes granulométricos e químicos. Quando adicionados materiais para alterar a granulometria, de forma a tornar a mistura adequada para o emprego como base e sub-base, a diminuição de vazios proporcionou um aumento da resistência ao cisalhamento e à rigidez.

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização da pesquisa

A presente pesquisa visou estudar a estabilização de material fresado com a adição de resíduo industrial para emprego em camadas de pavimentos flexíveis. Para tanto, buscou-se analisar o material a partir de ensaios de caracterização e empregar técnicas de dimensionamento de pavimentos flexíveis, utilizando-se de ferramentas como Excel, *Everstress* e MeDiNa. Portanto, a pesquisa é classificada como descritiva, de caráter quantitativo, englobando coleta de dados, análise e interpretação, utilizando-se de cálculos e comparando os resultados a uma base de referência.

3.2 Delineamento da pesquisa

Esta pesquisa se deu, inicialmente, pela coleta de certo volume de material fresado na RSC-287, Km 123 em Vale do Sol - RS, e de areia de fundição, proveniente da empresa FAIRES, localizada em Venâncio Aires - RS. A partir disso, ensaios de caracterização foram realizados em amostras de ambos os materiais para, posteriormente, realizar a estabilização granulométrica adequada a fim de utilizá-los para o emprego em camadas de base e/ou sub-base de pavimentos flexíveis.

Para fins de comparação, foi utilizado o pó de brita, fornecido pela Eco Mineradora, localizada em Vera Cruz – RS, juntamente ao material fresado. Outro componente empregado foi o Cimento Portland IV (CP IV), frente a necessidade ao decorrer da pesquisa.

Novos ensaios de caracterização, esses referentes às misturas obtidas, foram realizados. Por fim, em posse dos resultados, pavimentos foram dimensionados utilizando as misturas obtidas em camada de base, fazendo-se o uso de diversas metodologias. O programa Excel foi utilizado para auxiliar na tabulação dos dados e obtenção de gráficos. Para as metodologias mecánísticas-empíricas, incluindo a empregada no dimensionamento de pavimentos conforme critérios utilizados na África do Sul, o programa *Everstress 5.0* foi utilizado.

3.3 Técnicas e instrumentos de coleta de dados

3.3.1 Caracterização do trecho e estrada

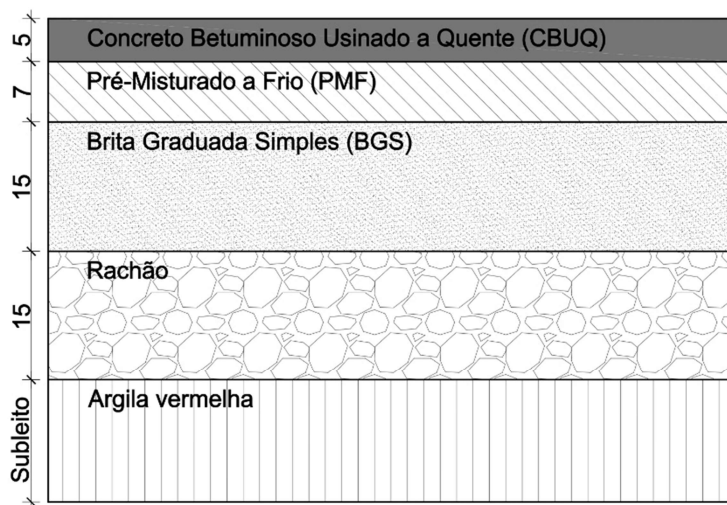
O local de estudo, onde a fresagem do pavimento foi executada, refere-se a rodovia estadual RSC-287, que possui o seu traçado no sentido Leste-Oeste no estado do Rio Grande do Sul, tendo início no município de Montenegro e avançando até Santa Maria. A rodovia possui extensão total de 241 Km (EGR – Empresa Gaúcha de Rodovias, 2018).

O trecho onde o material foi removido está situado no município de Vale do Sol, no Km 123, sendo a extensão total de 1 Km, iniciando-se no Km 123+520 m e avançando até o Km 124+520 m. A largura da faixa de rolamento é de 7,20 m.

A empresa RGS Engenharia disponibilizou informações referentes à ocorrência de defeitos encontrados na pista, sendo as seguintes patologias constatadas: Trinca em Bloco (TBE), Afundamento Local Plástico (ALP), Afundamento De Trilha De Roda Plástico (ATP), Jacaré (J) e Jacaré (JE). A presença desses defeitos foi fundamental na escolha da intervenção com a fresagem do pavimento.

As camadas originais do pavimento em análise são constituídas, considerando da camada superior a inferior, de: 5 cm de CBUQ, 7 cm de Pré-Misturado à Frio (PMF), 15 cm de base de Brita Graduada (BGS) e 15 cm de rachão. A Figura 6 representa, esquematicamente, a estrutura supracitada.

Figura 6 – Estrutura do pavimento original



Fonte: Autor, 2019.

Dados do ensaio de compactação, ISC e granulometria do subleito foram fornecidos pela empresa. O solo é composto principalmente de silte e argila, correspondente a 82,47% da granulometria, sendo considerado como argila vermelha. Apresenta umidade ótima de 20,85%, densidade seca máxima de 1,703 g/cm³, ISC de 9,40% e expansão de 1,30%. O relatório completo se encontra no ANEXO A.

Também foi fornecido o memorial de cálculo do número N, sendo empregada a metodologia da AASHTO e da *United States Army Corps of Engineers* (USACE). O ano de estudo é 2015 para a praça de pedágio Candelária. Encontrou-se valores de N para um período de projeto de 5 anos, sendo $N=4,59 \times 10^6$ para a metodologia de cálculo da AASHTO e $N=1,15 \times 10^7$ para a USACE. O memorial completo, contendo também o cálculo dos fatores de veículo, encontra-se no ANEXO B.

3.3.2 Coleta do volume de material

Para a coleta do material fresado, utilizou-se a máquina fresadora *Wirtgen* W1000L, com largura de corte de 1,00 m e espessura de corte de até 25 cm. A fresagem em questão atingiu uma profundidade de 5 cm, sendo removida, portanto, a camada de CBUQ.

O processo de coleta foi realizado pela RGS Engenharia. Posteriormente, um volume considerado do material foi estocado na empresa, situada em Vera Cruz – RS, na RSC-287, Km 111. A realização dos ensaios, os quais serão descritos no item 3.5, se deu em grande parte na UNISC e, portanto, 300 kg do material fresado foi transportado para o Laboratório de Solos e Pavimentação da universidade, sendo armazenado em sacos.

Outro material utilizado foi a areia de fundição, resíduo da indústria de fundição FAIRES, localizada em Venâncio Aires - RS, na RSC-453, Km 5. Conforme relatórios técnicos, os quais se encontram no ANEXO C, a areia de fundição fornecida pertence à Classe IIA, sendo classificado como um resíduo não inerte. Em média, segundo informações da empresa, são geradas 200 toneladas por mês do rejeito. A indústria forneceu a quantidade necessária para os ensaios, sendo transportado 100 Kg de amostra para a UNISC, que também foi armazenada em sacos no Laboratório de Solos e Pavimentação e colocada em bandejas para secagem ao ar antes da realização dos ensaios.

Quanto ao pó de brita, esse também foi cedido pela RGS engenharia, sendo o material proveniente da Eco Mineradora, e foi armazenado cerca de 200 Kg, juntamente com os demais na UNISC. O cimento do tipo CP IV foi cedido pela própria universidade.

3.4 Técnicas e instrumentos de análise de dados/informações

3.4.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada para o material fresado, a areia de fundição e também para o pó de brita.

Para os ensaios de granulometria dos agregados, como é o caso do material fresado e do pó de brita, utilizou-se o método presente na Norma DAER/RS-EL 102/01 (DAER, 2001a). Para tal, seguiu-se as recomendações da Norma DAER/RS EL 101/01 (DAER, 2001a) para as operações preliminares para preparação de amostras de agregados.

Primeiramente, cada amostra a ser ensaiada, do material fresado e do pó de brita, com quantidade definida conforme o diâmetro máximo de cada material, foi seca em estufa à temperatura entre 105°C e 110°C, de modo a se obter constância de peso. Após, retirou-se a amostra e constatou-se o seu peso, utilizando uma balança, e anotou-se como sendo a amostra total seca. O material então foi lavado com água potável nas peneiras de nº 8 e nº 200 acopladas até que a água estivesse livre de qualquer resíduo. Esse material retornou para a estufa até constância de peso novamente, o qual foi denominado como amostra lavada seca.

Cada amostra foi peneirada utilizando a série de peneiras correspondentes às faixas granulométricas definidas pelo DAER para bases granulares, conforme exposto no item 2.3.1, na Tabela 1. Para cada peneira, o material retido foi pesado e denominado como peso acumulado do material retido. O material contido no fundo da peneira de menor abertura também foi registrado.

Para cada uma das peneiras, calculou-se a porcentagem que passa da amostra total através da Equação 12, onde o peso acumulado do material que passa corresponde à diferença entre o peso da amostra seca total e o peso acumulado do material retido de cada peneira.

$$\% \text{ que passa da amostra total} = \frac{\text{Peso acumulado do material que passa}}{\text{amostra total seca}} \times 100 \quad (12)$$

Para verificação da granulometria da areia de fundição, a norma seguida diz respeito a análise granulométrica de solos, Norma DAER/RS-EL 003/01 (DAER, 2001b), a qual se baseia na Norma Brasileira (NBR) 7181/2016 (ABNT, 2016a). Nesse ensaio, utilizou-se a Norma DAER/RS EL 001/01 (DAER, 2001b) referente à preparação de amostras de solos, onde foi necessária a secagem prévia do material à 60° C e, posteriormente, o destorroamento do mesmo se utilizando a mão de gral com almofariz. A quantidade de material utilizado foi definida de acordo com o tamanho máximo das partículas. Assim, além da determinação da granulometria por peneiramento, utilizando a mesma série de peneiras já descritas, também foi realizado o ensaio de sedimentação, objetivando obter o diâmetro de partículas menores.

Neste ensaio, utilizou-se uma porção da porcentagem de material passante na peneira de número 10. A porção da areia adotada para o ensaio foi posta em uma tigela com água potável, onde se adicionou defloculante nas quantidades e concentrações descritas na norma e, após isso, deixou-se o material imerso, em repouso, por aproximadamente 24 horas. Após esse período, o solo com água foi despejado no copo de dispersão munido das chicanas. O copo de dispersão utilizado foi completado com água até que o nível ficasse 5 cm abaixo da borda. Em seguida, o conteúdo foi dispersado por 15 minutos.

Transferiu-se a dispersão para uma proveta de 1000 cm³, utilizando-se de água destilada. Completou-se a proveta até atingir o traço correspondente a 1000 cm³ e esperou-se a amostra atingir temperatura aproximadamente constante. Após, a solução foi movimentada, de cima para baixo e vice e versa, com o auxílio do agitador de amostras, durante 1 minuto, de forma a manter as partículas em suspensão.

Feita a agitação, a proveta foi colocada sobre uma mesa e a hora exata do início da sedimentação foi anotada. Com um densímetro, leituras correspondentes ao tempo de sedimentação (t) foram realizadas, de 0,5; 1 e 2 minutos. Repetiu-se o processo três vezes, agitando novamente a cada novo procedimento. As leituras subsequentes foram realizadas no tempo de 4, 8, 15 e 30 minutos e 1, 2, 4, 8 e 24 horas. Também se constatou a temperatura nestes instantes de leitura. A porcentagem de material em suspensão foi definida conforme Equação 13 e o diâmetro das partículas conforme Equação 14.

$$Q_S = N \times \frac{\delta}{(\delta - \delta_d)} \times \frac{V \delta_c (L - L_d)}{\frac{M_h}{(100+h)} \times 100} \quad (13)$$

Onde:

Q_S = porcentagem de solo em suspensão no instante da leitura do densímetro;

N = porcentagem de material que passa na peneira de 2,0 mm;

δ = massa específica dos grãos do solo, em g/cm³;

δ_d = massa específica do meio dispersor, à temperatura de ensaio, em g/cm³;

V = volume de suspensão, em cm³ ($V=1000$ cm³);

δ_c = massa específica da água, à temperatura de calibração do densímetro (20°C), em g/cm³;

L = leitura do densímetro na suspensão;

L_d = leitura do densímetro no meio dispersor, na mesma temperatura da suspensão;

M_h = massa do material úmido submetido à sedimentação, em g;

h = umidade higroscópica do material passado na peneira de 2,0 mm.

$$d = \sqrt{\frac{1800 \mu}{\delta - \delta_d} \times \frac{a}{t}} \quad (14)$$

Onde:

d = diâmetro máximo das partículas, em mm;

μ = coeficiente de viscosidade do meio dispersor, à temperatura de ensaio, em g x s/cm²;

a = altura de queda das partículas, com resolução de 0,1 cm, correspondente À leitura do densímetro, em cm;

t = tempo de sedimentação, em s;

δ = massa específica dos grãos do solo, em g/cm³;

δ_d = massa específica do meio dispersor, à temperatura de ensaio, em g/cm³.

Para efeito de cálculo, considerar $\delta_d=1,000$ g/cm³.

Dando seguimento, despejou-se o conteúdo na peneira nº 200 (0,074 mm), lavando com água potável a baixa pressão até o momento em que a água da lavagem se apresentou limpa. Na sequência, o material foi levado à estufa e mantido até

constância de massa. Após seco, passou-se nas peneiras de 1,2; 0,6; 0,42; 0,25; 0,15 e 0,075 mm², configurando a parte referente ao peneiramento fino.

Para a realização dos cálculos referentes a granulometria da areia de fundição, fez-se necessária a determinação da massa específica dos grãos, através da Norma NBR 6458 (ABNT, 2016b). Os mesmos procedimentos de preparação da amostra já descrito foram realizados, tomando-se 500g do material. O ensaio se dá a partir dos grãos que passam na peneira com malha de 4,8 mm e, por isso, passou-se a amostra nessa peneira. Após, cerca de 120g de massa seca passante foi separada para o ensaio e, com outra porção do passante do material, verificou-se a umidade.

Essa amostra foi colocada em uma cápsula de alumínio com água destilada e deixada em repouso por cerca de 24 horas. Feito isso, colocou-se no copo de dispersão, agitando durante 15 minutos. Dando seguimento ao ensaio, transferiu-se a amostra dispersada para um picnômetro, com o auxílio de um funil. Foi acrescentada água destilada até a metade do volume do picnômetro e, após isso, aplicou-se vácuo de 88 kPa (66 cm de Hg a 0° C), durante 15 minutos, agitando em intervalos regulares. Transcorrido o período, acrescentou-se água destilada até 1 cm abaixo da base do gargalo e repetiu-se a aplicação de vácuo, também agitando em intervalos regulares.

Em seguida, deixou-se o conteúdo em repouso até que a temperatura fosse equilibrada com o ambiente. Quando isso ocorreu, completou-se com água destilada até que a base do menisco coincidisse com a marca de referência. O conjunto picnômetro + solo + água foi pesado, assim como a temperatura foi determinada. Em posse dos dados, verificou-se a massa específica através da Equação 15:

$$\delta = \frac{M1 \times 100(100+h)}{\left[\frac{M1 \times 100}{100+h} \right] + M3 - M2} \times \delta_t \quad (15)$$

Onde:

δ = massa específica dos grãos do solo, em g/cm³;

M1 = massa do solo úmido, em g;

M2 = massa do picnômetro + solo + água, em g, na temperatura do ensaio;

M3 = massa do picnômetro cheio de água até a marca de referência na temperatura do ensaio;

h = umidade inicial da amostra;

δ_t = massa específica da água, na temperatura T do ensaio, definida conforme norma, em g/cm³.

A curva granulométrica, para os três materiais em questão, foi obtida como descrita no item 2.3.1. Tendo feito isso, a curva referente ao material fresado foi analisada de forma a se enquadrar nas faixas granulométricas do DAER, para bases, já descritas também no item 2.3.1, utilizando-se da areia de fundição para estabilizá-la. Para fins de comparação, uma mistura de material fresado e pó de brita foi feita, visando também o ajuste granulométrico conforme as faixas especificadas pelo DAER para base granular.

Além da determinação da granulometria através de ensaios de peneiramento e sedimentação, também foi procedido, para cada mistura, o ensaio de determinação do equivalente de areia, conforme a Norma DAER/RS-EL 006/01 (DAER, 2001b), já em posse das porcentagens adequadas de cada material nas misturas.

Para a realização do ensaio, utilizou-se três amostras de cada mistura estudada. Foram necessárias também duas soluções: solução concentrada, contendo cloreto de cálcio anidro, glicerina e formol; e solução de trabalho, que consiste na diluição da solução concentrada. Para dar início ao ensaio, foi necessário sifonar 10 cm de solução de trabalho em uma proveta com tampa, especificada para o ensaio. A amostra teve de ser transferida para a proveta com o auxílio de um funil e, então, tampou-se a proveta e bateu-se no fundo com a palma da mão para remover bolhas de ar e favorecer o umedecimento total da amostra. Após, retirou-se a tampa e a proveta ficou em repouso por 10 minutos. Após o período de saturação, a proveta foi novamente tampada, inclinada parcialmente e, simultaneamente, procedeu-se com um agitação a fim de deslocar o material do fundo.

Feito isso, manteve-se a proveta em posição horizontal e agitou-se de um lado para o outro vigorosamente, executando aproximadamente 90 ciclos (movimento de ida e volta) em 30 segundos, usando um curso de 23 cm. Após a agitação, colocou-se novamente na posição vertical e removeu-se a tampa. Um tubo lavador foi inserido até o fundo da proveta, aplicando uma ação suave de percussão e torção. Com isso, os finos fluem para cima e devem encher a proveta na marca de 38 cm. Feito isso, o tubo foi levantado lentamente de modo a manter o nível do líquido.

Manteve-se a proveta e o conteúdo em repouso por 20 minutos, sendo a contagem iniciada após a retirada do tubo lavador. Ao final do período, fez-se a leitura

do nível da parte superior da suspensão de argila. Na sequência, o conjunto de peso especificado foi introduzido na proveta suavemente, até que se repousasse na areia. Após repousar, o nível do parafuso de centragem foi lido e registrado, indicando a leitura da areia. O EA se deu através da Equação 16.

$$EA = \frac{\text{leitura da areia}}{\text{leitura da argila}} \times 100 \quad (16)$$

O EA é definido como a média dos resultados obtidos em duas amostras ensaiadas, desconsiderando aquela com maior variância, e deve ser registrado como o número inteiro mais próximo do resultado. Como os valores não apresentaram uma diferença superior a 2%, não foi preciso repetir os ensaios.

3.4.2 Compactação e Índice de Suporte Califórnia

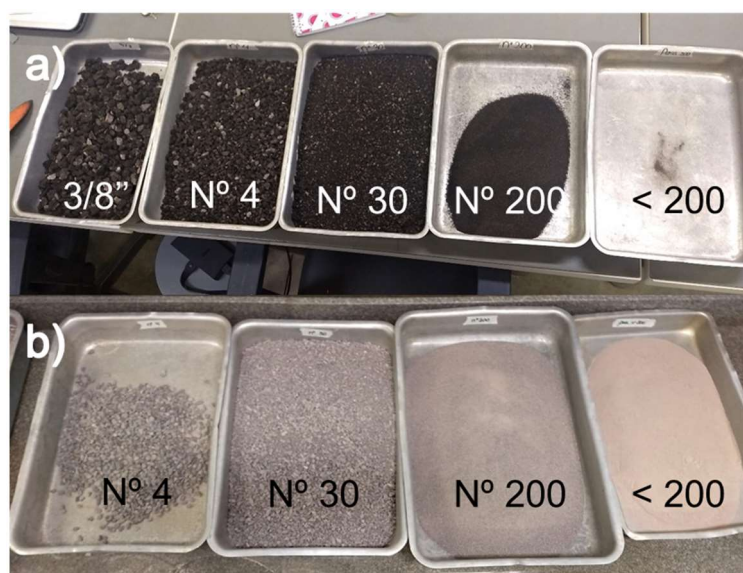
Após a definição dos traços adequados para as misturas de fresado com areia de fundição e de fresado com pó de brita, foram realizados os ensaios de compactação e de ISC. Para a mistura composta de areia de fundição, realizaram-se ensaios de compactação sem adição de cimento e, para o ISC, sem e com a adição de 3% de cimento. Ao adicionar cimento, adotou-se uma umidade ótima 0,5% abaixo da encontrada para o material sem a adição, pois considerou-se que a presença de finos alteraria a umidade ótima. Já para a mistura com pó de brita, utilizou-se apenas de ensaios com cimento, sendo adicionada a mesma quantidade.

Utilizou-se da adição de cimento pela inviabilidade na confecção de corpos de prova para os ensaios que avaliam resistência e deformabilidade. O teor adotado corresponde a 3%, considerado uma quantidade adequada, uma vez que menos não garantiria a distribuição uniforme dentro da massa da mistura e mais tenderia para uma camada semirrígida e se tornaria mais caro, não sendo o foco do estudo. Maiores detalhes serão explicados posteriormente, no item 3.4.4.

Os ensaios de compactação seguiram a metodologia da Norma DAER/RS-EL 110/01 (DAER, 2001a), que objetiva especificar o procedimento para a determinação da relação entre o teor de umidade e massa específica aparente seca através do ensaio de compactação de agregados, utilizando-se da energia modificada sem reuso do material para a compactação.

Quanto à preparação das amostras, fez-se necessário o peneiramento dos materiais granulares, os quais incluem o fresado e o pó de brita, para que eles fossem adicionados nas proporções corretas na mistura, de forma a corrigir a granulometria dos materiais com fração retida na peneira $\frac{3}{4}$ ". Para isso, fez-se os cálculos conforme a norma e, na prática, secou-se o material em estufa para depois realizar o peneiramento, com o uso de agitador mecânico, utilizando-se da série $\frac{3}{4}$ ", $\frac{3}{8}$ ", nº 4, nº 30 e nº 200, obtendo-se as frações necessárias. Assim, garantiu-se que os corpos de provas possuísem a mesma granulometria, possibilitando a melhor comparação entre eles. Na Figura 7 está representado o fracionamento dos materiais.

Figura 7 – Frações dos materiais: a) Fresado; b) Pó de Brita



Fonte: Autor, 2019.

O material de cada mistura foi compactado em moldes, com o uso de um colar, variando-se o teor de umidade de maneira crescente em cada corpo de prova para caracterizar a curva de compactação. Para o ensaio de ambas as misturas, adotou-se 6 umidades diferentes.

As amostras tiveram seu peso anotado, além do número de cada amostra com o respectivo peso e volume do molde que, por sua vez, possui forma cilíndrica e metálico, com diâmetro interno de 152,4 mm e altura de 114,3 mm, podendo variar 0,5 mm.

O esforço de compactação utilizado foi o correspondente ao Proctor modificado, compactando em 5 camadas de 56 golpes com soquete de 4536g e altura de queda

de 457,2 mm. Entre cada camada, uma ligeira escarificação foi realizada. O procedimento foi seguido para cada uma das amostras, aplicando os golpes perpendicularmente e em queda livre, buscando a distribuição uniforme na superfície da camada. Uma vez finalizada a compactação, o colar foi removido e a superfície nivelada com o auxílio de uma régua biselada. Após remover também o prato-base, obteve-se o peso da amostra compactada e o peso do cilindro. Além disso, determinou-se a umidade de moldagem de cada amostra.

Para fins de cálculo, é necessário subtrair o peso do molde do peso da amostra compactada e peso do cilindro para se obter o peso da amostra compactada. Esse resultado é dividido pelo volume do molde para se obter a massa específica do agregado úmido. Na sequência, utilizou-se a Equação 17 para o cálculo do teor de umidade e, para cada teor de umidade ensaiado, calculou-se a massa específica do agregado seco através da Equação 18.

$$h = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100 \quad (17)$$

Onde:

h = teor de umidade;

P_h = peso do material úmido;

P_s = peso do material seco.

$$\gamma_s = \text{massa específica do agregado úmido} \times \frac{100}{100+h} \quad (18)$$

Onde:

γ_s = massa específica aparente seca, em Kg/dm³;

h = teor de umidade.

De posse dos resultados, gerou-se as curvas de compactação para análise dos dados, adotando-se a massa específica do agregado seco na ordenada e os teores de umidades correspondentes na abscissa. Nessa curva, admite-se que a ordenada máxima fornece a massa específica aparente seca máxima e a abscissa correspondente determina a umidade ótima do material.

Em seguida, se deu a determinação do ISC e a expansão dos materiais, utilizando-se da metodologia presente na Norma DAER/RS–EL 009/01 (DAER, 2001b), fazendo-se uso dos corpos de prova moldados no ensaio de compactação e, além destes, moldou-se um com 3% de cimento na mistura de material fresado com areia de fundição, conforme descrito anteriormente.

Para a execução do ensaio de determinação do ISC, o molde foi fixado no prato-base e acrescido do colar. Durante a compactação, um disco espaçador foi colocado sobre o prato-base e um disco de papel filtro foi ser posicionado sobre o topo. Um outro papel filtro foi colocado sobre o prato-base perfurado e o molde com o material compactado foi invertido e fixado às hastes de um prato-base perfurado, juntamente com o colar utilizado na compactação. Colocou-se dois discos de 2270 g cada sobre a amostra, com o objetivo de simular a sobrecarga do peso do pavimento.

O sistema foi colocado em imersão na água, de modo a permitir o livre acesso da água pelo fundo e topo. Um tripé foi apoiado no colar, contendo um extensômetro que foi lido imediatamente após a sua instalação, anotando-se data, hora e leitura. Passados 4 dias, realizando-se também a leitura a cada 24 horas, foi feita a leitura final. Em seguida, o conjunto foi retirado e pesado após o escoamento da água da amostra durante 15 minutos.

Novamente o conjunto foi montado com o papel filtro e a sobrecarga para o ensaio de penetração, onde foi colocado na prensa em que um pistão de penetração foi assentado. Com uma velocidade de 1,27 mm por minuto, a carga sobre o pistão foi aplicada as leituras do extensômetro para as penetrações de 0,63; 1,27; 1,90; 2,54; 3,81; 5,08; 7,62; 10,16 e 12,70 mm foram anotadas como sendo a leitura defletômetro, além da identificação. Feita a penetração, o conjunto foi retirado da prensa e a amostra extraída.

Fazendo-se uso da Equação 19, obteve-se o valor da expansão em percentagem ao final do ensaio.

$$\text{Expansão (\%)} = \frac{\text{leitura final} - \text{leitura inicial no extensômetro}}{\text{altura inicial do corpo de prova}} \times 100 \quad (19)$$

O ISC usualmente é calculado tomando-se os valores equivalentes à penetração de 0,1" e 0,2", adotando-se o maior valor. Assim, para cada corpo de prova, obteve-se o ISC através da Equação 20.

$$ISC = \frac{\text{pressão calculada ou pressão corrigida}}{\text{pressão padrão}} \times 100 \quad (20)$$

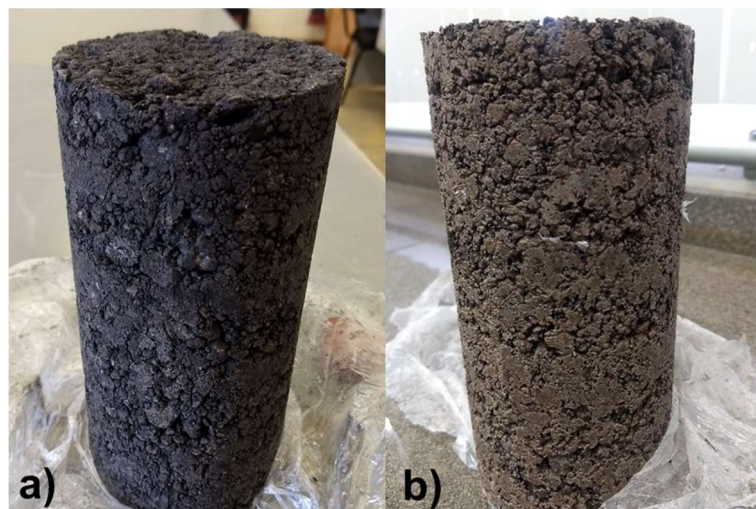
Os valores obtidos foram registrados sobre o eixo das ordenadas, sendo eles conforme os valores de umidades que foram utilizados para traçar a curva de compactação já descrita. Nesta curva, o valor da ordenada referente à umidade ótima já determinada fornece o ISC (DNIT, 2016).

3.4.3 Resistência à compressão simples

Para o ensaio de compressão simples, por falta de norma específica para o estudo em questão, adotou-se o procedimento da Norma DNER-ME 180/94 (DNIT, 1994). Realizou-se o procedimento para misturas de material fresado e areia de fundição, bem como para material fresado com adição de pó de brita, ambas as misturas contendo a adição de 3% de cimento. Fez-se a preparação da mistura, com a devida correção da granulometria, conforme o procedimento já descrito no item 3.4.2. Para realizar o ensaio, recomenda-se uma amostra representativa de 4500 g, onde o diâmetro máximo do agregado seja de 2,54 cm. Por se tratar de uma adaptação para o estudo em questão, o tamanho máximo do agregado adotado foi de 19 mm.

Foi feita apenas uma amostra, devido às demais demandas de ensaios para esse estudo, moldada na úmida ótima determinada conforme ensaio de compactação. O material foi compactado em molde cilíndrico metálico, contendo diâmetro interno de 10 cm e altura de 20 cm e se utilizando de um anel metálico. Foram executadas 5 camadas de compactação, de modo a se obter uma altura total de aproximadamente 21 cm, prevendo-se um arrasamento de 1 cm. Utilizou-se de um soquete de 4,536 kg, com altura de queda de 45,72 cm, igualmente ao utilizado para a compactação e determinação do ISC. Quanto ao número de golpes por camada, houve o controle da altura de cada camada e, portanto, o número adotado foi correspondente ao necessário para atingir o peso específico aparente seco máximo obtido no ensaio de compactação. A Figura 8 representa os corpos de prova após a moldagem e cura.

Figura 8 – Corpos de prova para ensaio de resistência à compressão simples: a) Mistura com fresado b) Mistura com pó de brita



Fonte: Autor, 2019.

Dando continuidade ao ensaio, retirou-se o anel e rasou-se o corpo de prova até a altura do molde cilíndrico. A massa específica aparente do material úmido compactado foi determinada de acordo com a massa do cilindro. Adotou-se a cura do corpo de prova durante 7 dias, embalando-os com uma película plástica e deixando-os dentro de uma caixa de isopor durante todo o período. Após, o material foi desmoldado e submetido ao ensaio de compressão simples.

Os corpos de prova foram rompidos com velocidade de 1 mm/s, até a ruptura, em prensa localizada no Laboratório de Solos e Pavimentação. A resistência à compressão simples, correspondente a tensão de ruptura, foi obtida com a divisão da carga de ruptura pela área transversal do corpo de prova ensaiado.

3.4.4 Resistência à tração por compressão diametral

Foi adotada a Norma NBR 7222:2011 (ABNT, 2011), a qual é destinada para concreto e argamassa, para os ensaios de determinação da resistência à tração por compressão diametral. Para fins de comparação, foi aplicada a mesma metodologia para misturas de material fresado e areia de fundição, bem como para material fresado com adição de pó de brita, ambas as misturadas contendo a adição de 3% de cimento.

Como justificativa para a adição do cimento, realizou-se a moldagem primeiramente com a mistura de fresado e areia de fundição e, visto que o corpo de prova rompeu apenas com o peso próprio do equipamento de ensaio, optou-se pela

adição de 3% de cimento, quantidade considerada pequena e que classifica o material como melhorado com cimento. Assim, padronizou-se o procedimento de adição de cimento para os ensaios do material composto por fresado e pó de brita a fim de comparação.

Para o ensaio, foi utilizada uma prensa mecânica do tipo Marshall, com sensibilidade não mais que 19,60 N (equivalente a 2,0 kgf), com o êmbolo à uma velocidade de 0,8 mm/s, admitindo-se 0,1 mm/s para mais ou para menos. O corpo de prova possui formato cilíndrico, com altura 7,8 cm e diâmetro de 10 cm. Foram executadas 3 camadas de compactação, havendo o controle do número de golpes objetivando a altura igual de cada camada.

Adotou-se 7 dias como tempo de cura e, feito isso, o corpo de prova foi posicionado na prensa, onde uma carga progressiva foi aplicada até que se atingisse a carga que caracteriza a ruptura no plano diametral vertical. A Figura 9 representa os corpos de prova após o ensaio, ainda posicionados no equipamento.

Figura 9 – Corpos de prova ensaiados à resistência à tração por compressão diametral: a) Mistura com fresado b) Mistura com pó de brita



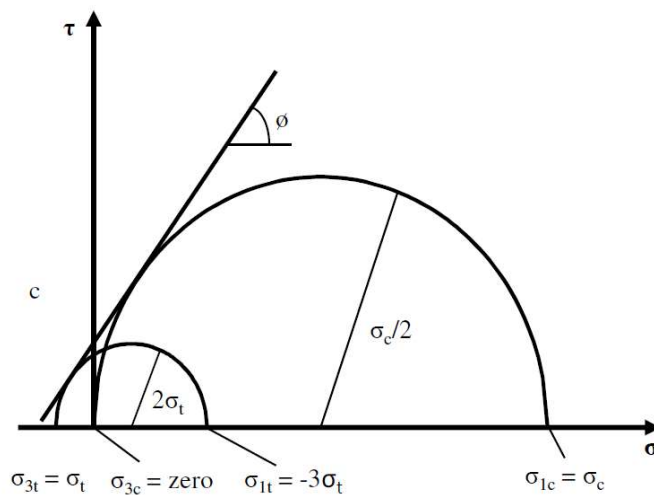
Fonte: Autor, 2019.

Por fim, a resistência à tração, em Mpa, foi determinada através da Equação 21. A carga de ruptura foi informada em kgf, enquanto o diâmetro e a altura média do corpo de prova (CP) em cm.

$$\text{Resistência à tração} = \frac{2 \times \text{carga de ruptura}}{10 \times \pi \times \text{diâmetro médio do CP} \times \text{altura média do CP}} \quad (21)$$

Em posse dos resultados de compressão simples e tração por compressão diametral, foi possível obter a envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb para a determinação dos parâmetros de resistência dos materiais (coesão e ângulo de atrito). Os autores Jaeger, Cook e Zimmerman (2007) admitem que, para os corpos de prova submetidos à compressão simples, as tensões principais de ruptura (σ_3 e σ_1) são, nesta ordem, iguais à zero e à resistência à compressão simples (σ_c). Além disso, também ressaltam que, para os corpos de prova submetidos à tração por compressão diametral, as tensões são, respectivamente, iguais à resistência à tração (σ_t) e à $-3\sigma_t$. Com base nisso, é possível obter a envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb (Figura 10), de onde são deduzidas as Equações 22 e 23.

Figura 10 – Envoltória de Mohr-Coulomb baseada em círculos de Mohr correspondentes aos ensaios de compressão simples e diametral



Fonte: Consoli *et al.*, 2014.

$$\phi = \arcsen \left(\frac{\sigma_c - 4\sigma_t}{\sigma_c - 2\sigma_t} \right) \quad (22)$$

$$c = \frac{\sigma_c \left[1 - \left(\frac{\sigma_c - 4\sigma_t}{\sigma_c - 2\sigma_t} \right) \right]}{2 \cos \phi} \quad (23)$$

Onde:

ϕ = ângulo de atrito;

σ_c = resistência à compressão simples;

σ_t = resistência à tração;

c = coesão.

3.4.5 Módulo de resiliência

Realizou-se os ensaios para determinação do MR no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAPAV/UFRGS), localizado em Porto Alegre – RS, utilizando-se de câmara triaxial para a execução dos mesmos. As pressões aplicadas nos ensaios foram controladas pelo programa SEEPAV 8200 (Sistema de Ensaio Especiais de Pavimentação), sendo a aquisição de dados realizada também por ele. Adotou-se duas normas distintas, realizando ambos os procedimentos no mesmo corpo de prova e na respectiva ordem: ME 134/2018 (DNIT, 2018a), destinado para solos, e ME 181/2018 (DNIT, 2018b), considerando material estabilizado quimicamente.

Utilizou-se o cilindro de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, onde foram moldados dois corpos de prova para cada mistura da mesma forma feita no ensaio de compressão simples. Os corpos de prova foram desmoldados aos 5 dias de cura para a realização do recapeamento dos mesmos, em ambos os lados, utilizando-se de gesso, a fim de garantir superfícies planas. Por motivos de disponibilidade do laboratório, o material contendo fresado, pó de brita e cimento teve que ser ensaiado no 8º dia, enquanto o material composto de areia de fundição foi ensaiado no 7º.

Dando início ao procedimento de ensaio, colocou-se o corpo de prova sobre uma pedra porosa com um papel filtro, na parte superior e inferior, e o envolveu com uma membrana de borracha. O conjunto foi colocado na base inferior da câmara triaxial, instalada conforme previsto em norma e adotando a condição drenada.

No primeiro momento, seguindo a norma ME 134/2018 (DNIT, 2018a), iniciou-se o condicionamento, onde uma sequência de carregamentos cíclicos foi aplicada, utilizando-se 1 Hz (60 ciclos por minuto) de frequência na tensão vertical (tensão desvio) e tensão confinante mantida constante. Assim, 500 repetições de cada tensão desvio foram aplicadas seguindo a sequência disposta na Tabela 13.

Tabela 13 – Sequência de tensões para fase de condicionamento

Tensão Confinante σ_3 (Mpa)	Tensão Desvio σ_d (Mpa)	Razão de Tensões σ_1/σ_3
0,070	0,070	2
0,070	0,210	4
0,105	0,315	4

Fonte: DNIT, 2018a.

Após a fase de confinamento, o procedimento para determinação do MR foi iniciado. Para tal, uma sequência de 18 pares de tensões, conforme Tabela 14, foi aplicada para se obter a leitura das deformações específicas.

Tabela 14 – Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência de solos

σ_3 (Mpa)	σ_d (Mpa)	σ_1/σ_3
0,020	0,020	2
	0,040	3
	0,060	4
0,035	0,035	2
	0,070	3
	0,105	4
0,050	0,050	2
	0,100	3
	0,150	4
0,070	0,070	2
	0,140	3
	0,210	4
0,105	0,105	2
	0,210	3
	0,315	4
0,140	0,140	2
	0,280	3
	0,420	4

Fonte: DNIT, 2018a.

Após encerrar o ensaio, ainda com o corpo de prova posicionado no equipamento, iniciou-se o segundo procedimento, seguindo a norma ME 181/2018 (DNIT, 2018b). A frequência das cargas repetidas na tensão vertical foi mantida em 1 Hz (60 ciclos por minuto) e, nesse caso, não se aplica tensão confinante. Assim, 50 repetições de aplicação de carga foram aplicadas seguindo a sequência disposta na Tabela 15.

Tabela 15 – Tensões verticais para determinação do MR de materiais estabilizados quimicamente

Sequência	Tensão principal maior (σ_1 Mpa)	Número de aplicações de cargas
1	0,10	50
2	0,20	50
3	0,30	50
4	0,40	50
5	0,50	50

Fonte: DNIT, 2018b.

Para cada par de tensões, o equipamento fornece um conjunto de dados com os módulos de resiliência, considerando a tensão confinante e a tensão desvio. Utilizando-se da plotagem de gráficos a partir dos valores obtidos, foi possível determinar o modelo que melhor se adequa a situação.

3.4.6 Dimensionamento

O material estudado foi dimensionado para ser empregado em camada de base de pavimentos flexíveis, utilizando-se das metodologias definidas pelo DNIT e mecanística-empírica, incluindo também o método utilizado na África do Sul. Estes métodos estão dispostos no item 2.4, onde os procedimentos que foram seguidos já se encontram descritos. Cada traço estudado foi dimensionado para ser usado como camada de base na estrutura do pavimento, analisados separadamente.

Foi feito o dimensionamento para uma rodovia nova executada próxima ao local, portanto com o mesmo subleito e características de tráfego, e também se simulou novas camadas para o pavimento já existente. Nesse último caso, considerou-se apenas a camada de 15 cm de rachão existente acima do subleito, considerando a manutenção de trechos da rodovia em que a base original se encontrasse comprometida estruturalmente e a camada de rachão ainda pudesse ser utilizada. Sugere-se que as demais camadas, que seriam removidas nessa hipótese, fossem estudadas para que, assim como a camada fresada de CBUQ, tenham outro destino ambientalmente correto.

Na prática, cada trecho da rodovia deve ser avaliado, adotando-se a abordagem mais adequada conforme for o caso. Nesse estudo, é sugerido um reaproveitamento de resíduos, onde o fresado é misturado com outros materiais na usina e, posteriormente, realocado para o local de execução do pavimento. Caso haja a

necessidade de liberação rápida do trecho, por exemplo, novas frentes de trabalho precisariam ser adotadas.

Para os cálculos, foram utilizados os Números N fornecidos. Com base na experiência de demais autores, alguns valores de parâmetros para as camadas que não possuem dados foram adotados para dar sequência ao dimensionamento. Esses valores encontram-se expostos na Tabela 16.

Tabela 16 – Parâmetros dos materiais adotados para o dimensionamento

Parâmetros	Revestimento	Rachão	Subleito
MR (MPa)	3184,00	150,00	50,00
Peso Específico (kN/m ³)	24,00	18,00	17,03
Coefficiente de Poisson	0,30	0,35	0,45
ISC (%)	-	20,00	9,40

Fonte: Autor, 2019.

O ISC adotado para o rachão corresponde ao mínimo exigido pelo DNIT para camadas de sub-base. A camada de revestimento usada foi de concreto asfáltico modificado, RJ CAPFLEX 65/90 SBS PG 70-22, presente na base de dados do *software* MeDiNa.

Para o dimensionamento seguindo a metodologia do DNIT, O coeficiente de equivalência adotado é o referente às camadas granulares, K=1. Empregou-se o *software Everstress 5.0* para as análises mecânicas. Para o dimensionamento mecânico-empírico, os procedimentos seguidos estão dispostos no item 2.4.2. Para a metodologia adotada na África do Sul, as características da estrada foram analisadas a fim de enquadrá-las em uma categoria para posteriores cálculos, conforme descrito no item 2.4.3. Utilizou-se também do método exposto no item 2.4.3, procurando explorar o *software* MeDiNa através dos valores da base de dados do programa, bem como os valores calculados no decorrer do estudo.

3.5 Realização de análise e discussão dos resultados

A partir dos ensaios realizados, foi possível caracterizar os materiais utilizados nessa pesquisa de modo a permitir a correta estabilização para o uso em camadas de base e sub-base, com a granulometria adequada e, além disso, buscando-se atender demais especificações das camadas. Com base nos resultados, pretendeu-se encontrar a melhor alternativa para o uso dos materiais em análise.

3.6 Obtenção de conclusões

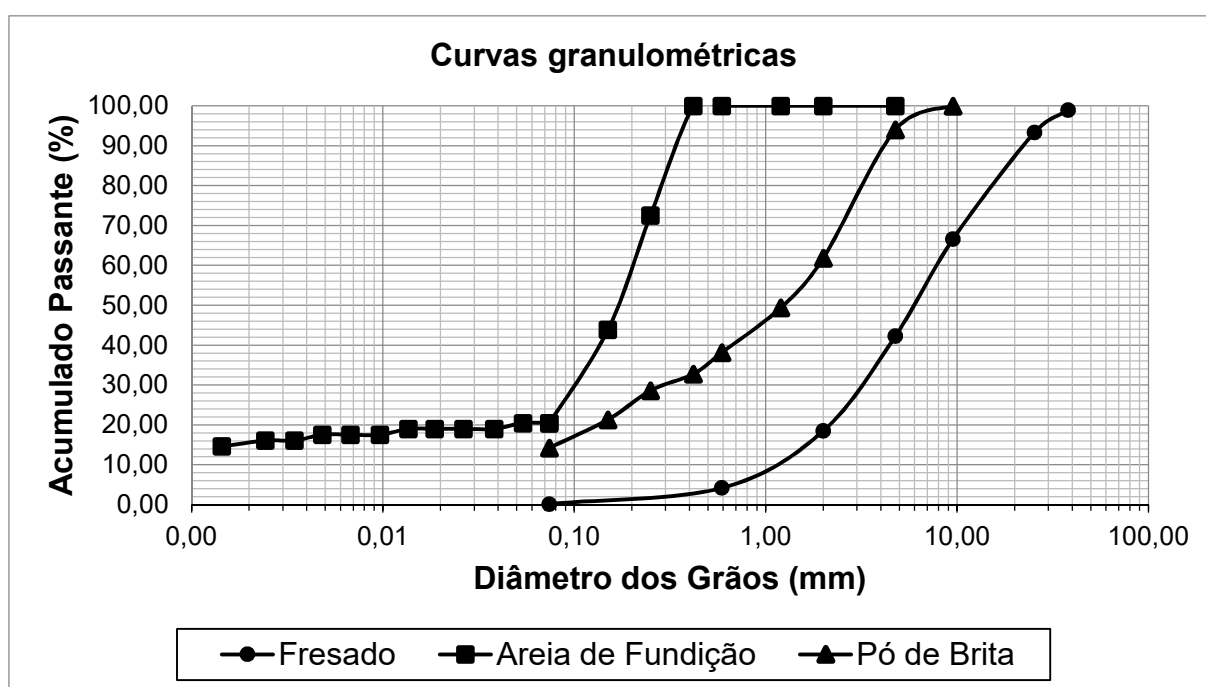
Tendo em vista os resultados obtidos, os diferentes métodos de dimensionamento aqui propostos foram analisados, objetivando-se a comparação entre os resultados obtidos. Desta forma, com o intuito de estabelecer o método mais adequado para o dimensionamento em questão, espessuras de camadas foram definidas, visando uma aplicação prática do estudo.

4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Análise Granulométrica

A partir dos ensaios de caracterização granulométrica dos três materiais estudados, foram obtidas as seguintes curvas granulométricas, conforme exposto na Figura 11.

Figura 11 – Curvas granulométricas dos materiais estudados



Fonte: Autor, 2019.

A partir das curvas, é possível classificar a porcentagem de cada fração, levando em consideração o diâmetro dos grãos e, assim, definir a quantidade de finos e graúdos de cada material. Deste modo, têm-se o exposto na Tabela 17.

Tabela 17 – Quantidade de finos e graúdos dos materiais estudados

Propriedades	Materiais		
	Fresado	Areia de Fundição	Pó de Brita
Pedregulho ($2\text{mm} < \varnothing \leq 60\text{mm}$)	80	0	38
Material granular fino ($0,074 < \varnothing \leq 2\text{mm}$)	18	80	48
Finos ($\varnothing \leq 0,074\text{mm}$)	2	20	14

Fonte: Autor, 2019.

Analisando-se os diferentes materiais, nota-se que o fresado apresenta uma quantidade significativa de pedregulho, o qual é predominante na sua granulometria. Já o pó de brita apresenta predominância de material granular fino, possuindo ainda uma parcela considerável de pedregulho e certa quantidade de finos, superior ao encontrado no Fresado. No caso da areia de fundição, têm-se grande quantidade de material granular fino, não possuindo grãos superiores à 2mm, o que o faz ser considerado um material fino. Além disso, encontra-se cerca de 18% de argila contida no material.

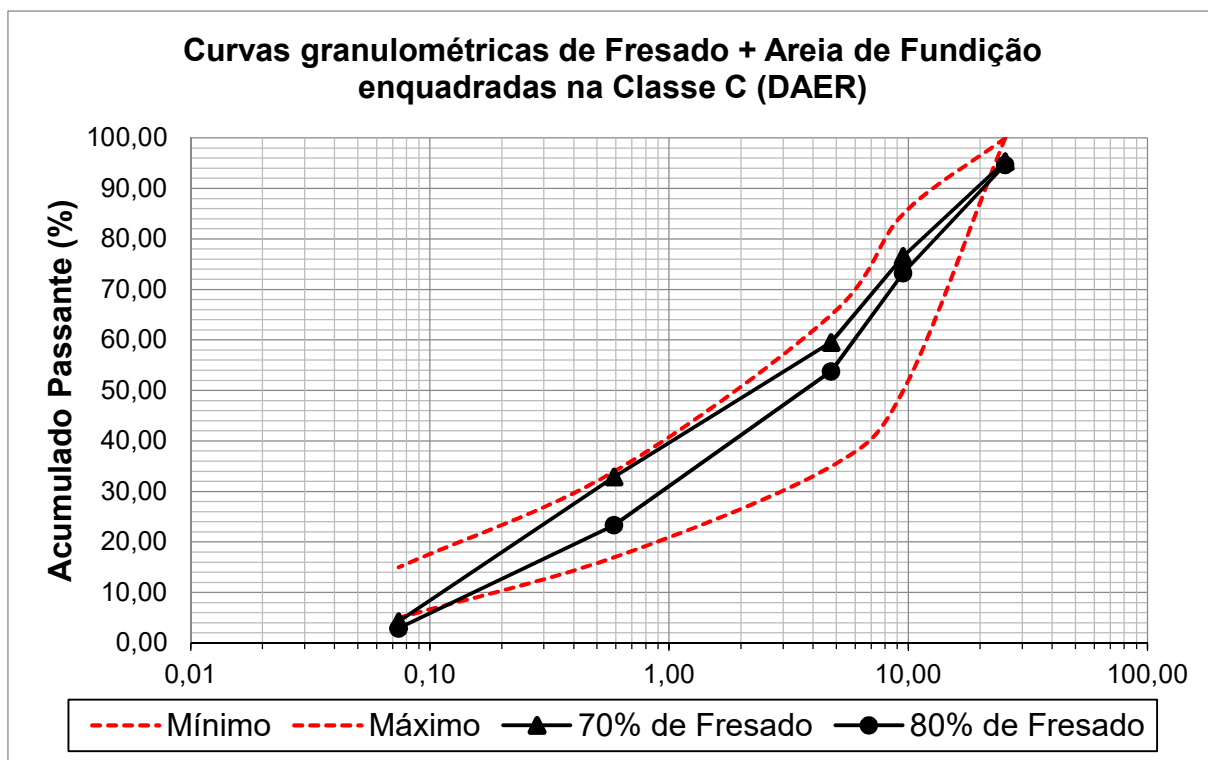
O material fresado, por sua vez, é formado por grumos de cimento asfáltico de petróleo (CAP), os quais aglomeram os finos e alteram a curva do material. Assim, constata-se que a granulometria desse material sofre variações devido à influência da velocidade de operação da máquina fresadora, da técnica utilizada na fresagem e também do sentido do giro do cilindro fresador (BONFIM, 2007).

4.1.1 Traço Fresado + Areia de Fundição

Em posse das curvas granulométricas e tendo como objetivo as camadas de base dos pavimentos, procedeu-se com o estudo da estabilização granulométrica do fresado com o uso da areia de fundição. Neste momento, considerou-se a mistura sem adição de cimento, uma vez que a quantidade considerada para adição é pouco significativa em relação à mudança na granulometria e não resultaria na alteração da curva para fora dos limites estabelecidos.

Tendo como referência as faixas granulométricas do DAER para bases granulares, conforme Tabela 1, e usando como ferramenta o Excel, simulou-se diferentes traços, com as seguintes porcentagens de fresado e o restante de areia de fundição: 40, 50, 60, 70, 80 e 90%. O DAER menciona três classificações distintas, estabelecendo limites a partir do tamanho do agregado da mistura. Simulou-se para todas as classes, sendo que a mistura melhor se enquadrou na classe C. Dentre as seis simulações de diversas porcentagens dos materiais, duas encontram-se dentro dos limites exigidos e estão expostas na Figura 12.

Figura 12 – Traço Fresado + Areia de Fundação



Fonte: Autor, 2019.

Tendo os traços definidos, verificou-se os demais requisitos mínimos para definição da classe. Parte dessa verificação diz respeito ao EA, que deve superior à 30. Fez-se o procedimento de ensaio, obtendo-se os resultados conforme demonstrados na Tabela 18.

Tabela 18 – EA do material fresado com areia de fundição

Traço	80% Fresado + 20% Areia de Fundação			70% Fresado + 30% Areia de Fundação		
	1	2	3	1	2	3
Proveta						
Leitura no topo da areia	9,60	9,40	9,20	7,20	7,50	8,40
Leitura no topo da argila	16,40	20,30	17,20	20,90	26,80	23,10
Equivalente de Areia (E.A.)	58,54	46,31	53,49	34,45	27,99	36,36
Média E.A.	52,78			32,93		
Valor adotado do E.A.	56			35		

Fonte: Autor, 2019.

Assim, foi possível verificar que ambos os traços estão de acordo com o exigido. Notou-se que, acrescentando finos à mistura, o valor do EA reduz. Nos dois casos, para encontrar o resultado final, descartou-se a proveta número 2 e prosseguiu-se

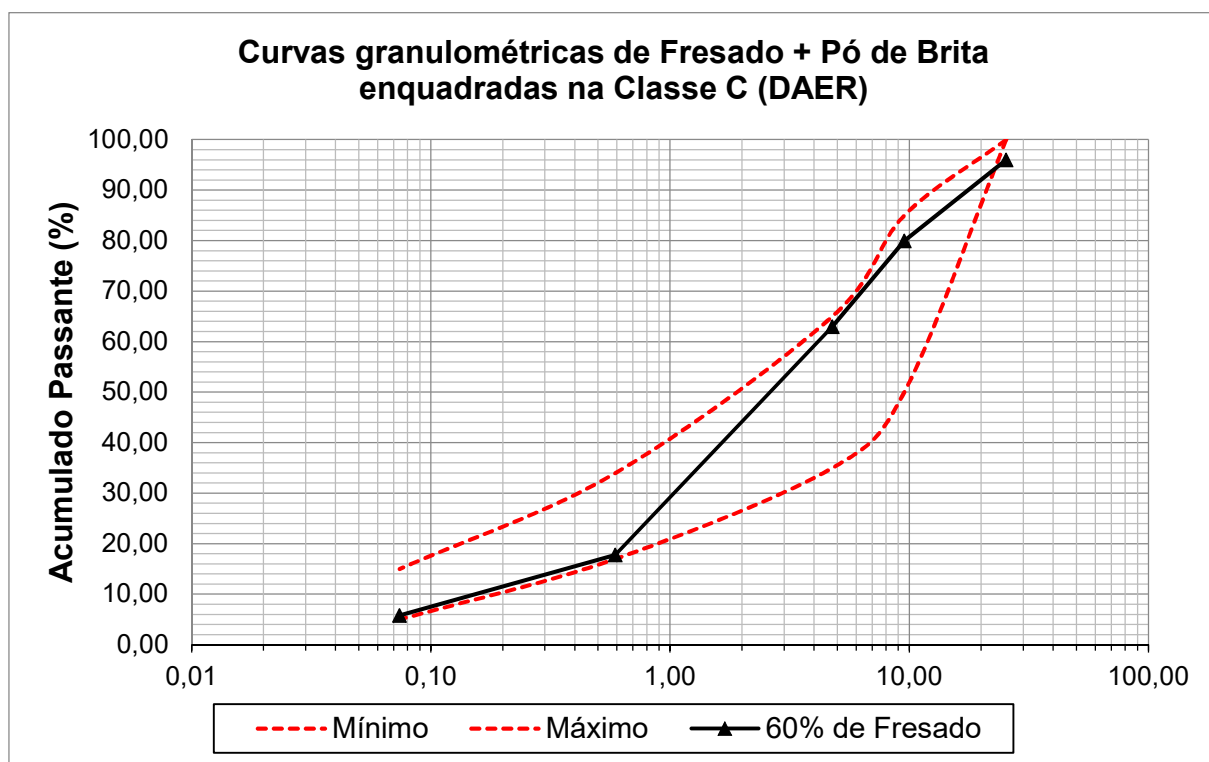
com a média das demais, arredondando o valor para o número mais próximo do resultado.

Para dar continuidade ao estudo, optou-se por adotar o traço composto por 80% de fresado, por estar mais longe dos limites das faixas granulométricas do DAER para bases e por conter uma quantidade mais significativa do fresado, material foco deste trabalho. Outro motivo para essa escolha está relacionado com questões referentes ao tempo disponível para este estudo.

4.1.2 Traço Fresado + Pó de Brita

O mesmo procedimento foi adotado para a definição do traço contendo pó de brita na mistura, considerando também as porcentagens citados no item 4.1.1. Enquadrou-se novamente na classe C do DAER e, assim, adotou-se o traço que melhor se apresentou diante dos limites estabelecidos, qual seja, o composto de 40% de pó de brita. Na Figura 13, é possível verificar a curva da mistura adotada e os devidos limites estabelecidos.

Figura 13 – Traço Fresado + Pó de Brita



Fonte: Autor, 2019.

O ensaio de EA também foi realizado para a mistura em questão. Os valores obtidos no ensaio estão dispostos na Tabela 19.

Tabela 19 – EA do material fresado com pó de brita

Traço	60% Fresado + 40% Pó de Brita		
Proveta	1	2	3
Leitura no topo da areia	9,40	10,30	10,00
Leitura no topo da argila	12,60	13,90	13,50
Equivalente de Areia (E.A.)	74,60	74,10	74,07
Média E.A.	74,26		
Valor adotado do E.A.	74		

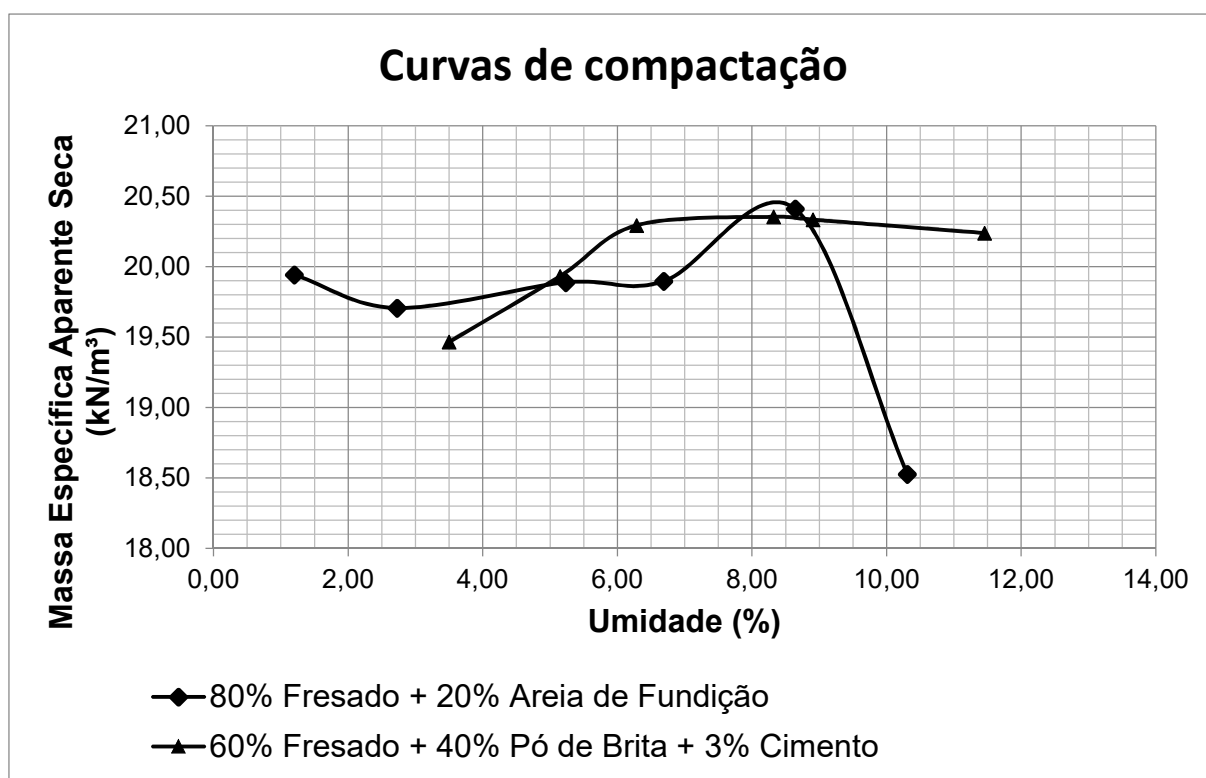
Fonte: Autor, 2019.

Neste, as três provetas mantiveram resultados semelhantes, mas seguindo recomendação da norma, descartou-se o primeiro resultado por ser mais distantes dos outros dois e adotou-se o valor de 74. Assim, tem-se o resultado como sendo favorável para a classificação na classe C.

4.2 Compactação e Índice de Suporte Califórnia

Através do ensaio de compactação, foi possível obter os valores de peso específico aparentemente seco máximo e umidade ótima dos materiais. Os valores obtidos nos ensaios estão expressos na Figura 14, assim como a Tabela 20 apresenta os valores dos parâmetros extraídos das curvas.

Figura 14 – Curvas de compactação



Fonte: Autor, 2019.

Tabela 20 – Resultados dos ensaios de compactação

Traço	80% Fresado + 20% Areia de Fundição	60% Fresado + 40% Pó de Brita + 3% Cimento
y_{dmáx} (kN/m³)	20,50	20,80
W_{ótima} (%)	8,50	8,50

Fonte: Autor, 2019.

A partir da análise das curvas de compactação e dos parâmetros obtidos, nota-se que ambos os traços mantiveram valores de peso específico aparente seco máximo ($y_{dmáx}$) semelhantes e umidade ótima ($W_{ótima}$) considerada igual. Todos os corpos de prova compactados foram submetidos ao ensaio de ISC. Além destes, moldou-se um corpo de prova contendo 80% de fresado, 20% de areia de fundição e 3% de cimento para submeter ao ensaio de ISC, este sendo moldado na umidade de 8%. A Tabela 21 apresenta os resultados apenas dos corpos de prova com a umidade ótima considerada e supracitada.

Tabela 21 – Valores de ISC e expansão

Traço	80% Fresado + 20% Areia de Fundição	80% Fresado + 20% Areia de Fundição + 3% Cimento	60% Fresado + 40% Pó de Brita + 3% Cimento
ISC (%)	25	280	200
Expansão (%)	0,21	0,09	0,00

Fonte: Autor, 2019.

Tendo em vista as condições para uso em camadas inferiores de pavimentos, definidas pelo DNIT e expostas na Tabela 3 do item 2.3.2, descarta-se o uso da mistura 80% Fresado + 20% Areia de Fundição para base de pavimentos, pois não se enquadra no requisito quanto ao valor mínimo de ISC, mas encontra-se adequada para o uso em sub-base, considerando o ISC e a expansão. Já as outras duas misturas são consideradas adequadas para o uso em camadas de sub-base e base.

4.3 Resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral

No ensaio de compressão simples, para a mistura que possui areia de fundição, encontrou-se o valor de 950 kPa de resistência. A mistura contendo pó de brita mostrou um comportamento semelhante, resultando em um valor de 940 kPa de resistência. Os ensaios foram realizados em velocidade igual a 1 mm/s.

As mesmas composições foram moldadas para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Obteve-se uma maior resistência na mistura contendo areia de fundição, sendo 220 kPa a resistência encontrada. Para a mistura com pó de brita, obteve-se o valor de 140,38 kPa. Durante a ruptura, em ambos os casos, a fissura ocorreu no sentido vertical, o que indica que a deformação crítica é perpendicular ao diâmetro solicitado.

Quanto à variação de umidade dos corpos de provas, em se tratando dos valores quando houve a moldagem e após o rompimento, passando-se o tempo de cura de 7 dias, obteve-se o exposto na Tabela 22:

Tabela 22 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples e à tração por compressão diametral

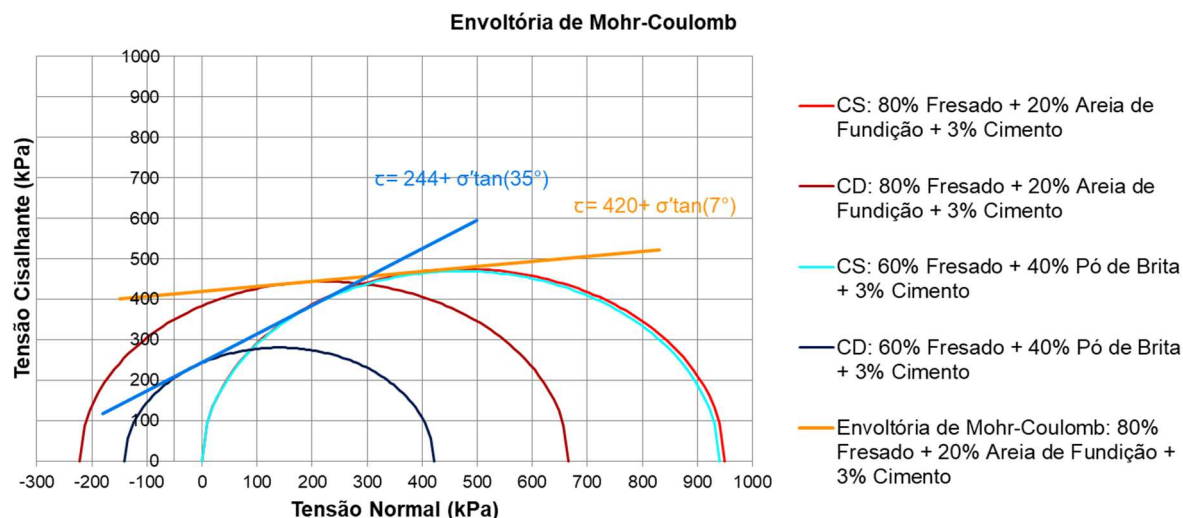
Ensaio	Traços			
	80% Fresado + 20% Areia de Fundição + 3% Cimento	60% Fresado + 40% Pó de Brita + 3% Cimento	80% Fresado + 20% Areia de Fundição + 3% Cimento	60% Fresado + 40% Pó de Brita + 3% Cimento
	Compressão Simples		Tração por compressão diametral	
Resistência (kPa)	950	940	220	140,38
Umidade de moldagem (%)	8,72	9,03	7,42	8,21
Desvio de umidade (%)	0,72	0,53	-0,58	-0,29
Umidade após o ensaio (%)	6,74	7,36	4,66	5,88
Desvio de umidade (%)	-1,26	-1,14	-3,34	-2,62
Variação de umidade (moldagem e após o ensaio) (%)	1,98	1,67	2,76	2,33

Fonte: Autor, 2019.

Segundo Pires *et al.* (2016), em amostras de material fresado e cimento, espera-se que o valor de resistência à tração por compressão diametral seja cerca de 16% do valor da resistência por compressão simples. Porém, essa afirmação não foi possível confirmar com os resultados encontrados nessa pesquisa. Para o material com areia de fundição em sua mistura, obteve-se a relação de 23,16% e, para a mistura com pó de brita, 14,93%.

Em posse dos resultados dos ensaios de compressão simples e tração por compressão diametral, foi possível determinar a envoltória de Mohr-Coulomb para as duas misturas, conforme exposto na Figura 15.

Figura 15 – Envoltória de Mohr-Coulomb para as misturas submetidas a ensaios de compressão simples e diametral



Fonte: Autor, 2019.

Percebe-se diferenças significativas de coesão e ângulo de atrito e, com base nos resultados obtidos, extrai-se os parâmetros indicados na Tabela 23, definidos a partir das equações 26 e 27.

Tabela 23 – Valores de coesão e ângulo de atrito das misturas

Traço	80% Fresado + 20% Areia de Fundação + 3% Cimento	60% Fresado + 40% Pó de Brita + 3% Cimento
Coesão c (kPa)	420	244
Ângulo de Atrito (°)	7	35

Fonte: Autor, 2019.

Analisando-se o gráfico e os valores gerados, verifica-se que, até um nível de tensões de aproximadamente 300 kPa, a resistência do material composto por areia de fundição é maior em relação ao composto por pó de brita. Os níveis de tensão calculados no meio da camada de base, conforme será demonstrado na sequência, ficaram abaixo desses valores e, portanto, constata-se que o material com areia de fundição em seu traço é mais resistente no nível de tensão de interesse.

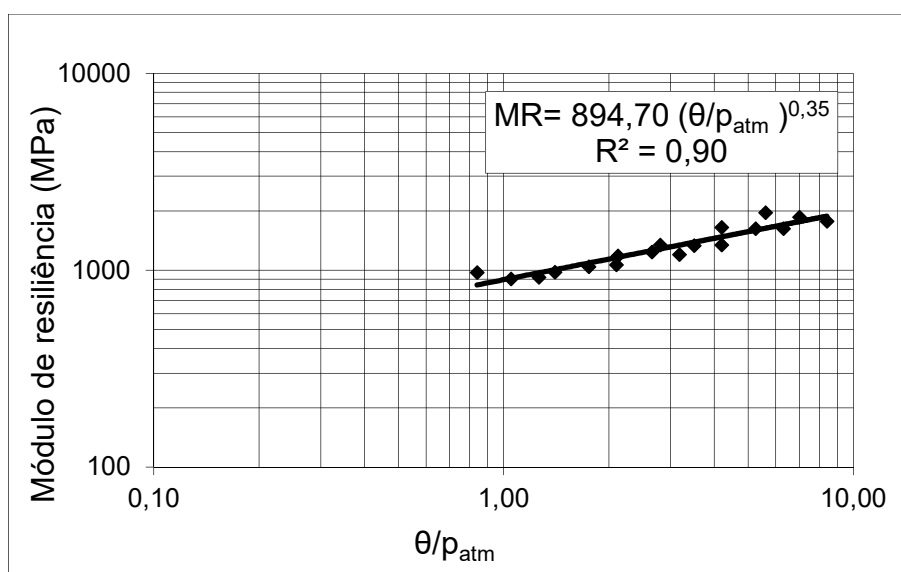
4.4 Ensaios triaxiais de carga repetida

A partir dos ensaios, seguindo as duas metodologias propostas no item 3.4.5, verificou-se que a tensão confinante (σ_3) tem grande influência sobre o material. Ao variá-la, embora mantendo a mesma tensão desvio (σ_d), o MR também variou.

Analizou-se o conjunto de todos os resultados obtidos a partir de ambas as metodologias, gerando um total de 36 modelos de cálculos. Entretanto, como no procedimento seguindo a norma ME 181/2018 (DNIT, 2018b) a tensão confinante é nula, optou-se por apresentar apenas os resultados obtidos através dos ensaios seguindo a metodologia proposta pela ME 134/2018 (DNIT, 2018a).

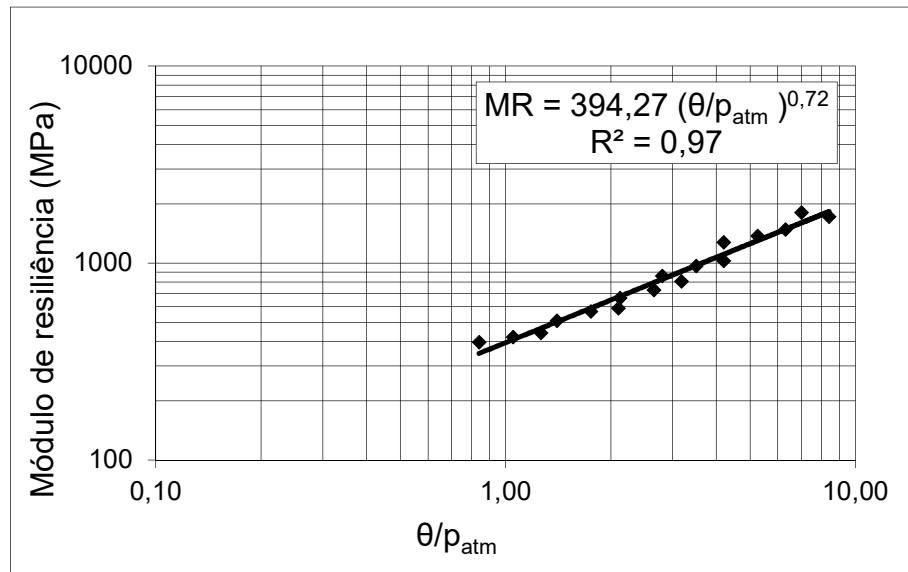
Gráficos em função do MR e da soma de tensões (θ), essa dividida pela pressão atmosférica ($p_{atm}=0,1$ Pa), foram gerados. Para cada mistura, apresentam-se três resultados distintos: corpo de prova número 1 (CP1), corpo de prova número 2 (CP2) e a média de ambos os resultados, onde se considerou todo o conjunto de dados obtidos pela soma de tensões nesses dois corpos de prova. Nas Figuras 16, 17 e 18, verifica-se os valores referentes ao traço de 80% Fresado + 20% Areia de Fundição + 3% Cimento. Na sequência, as Figuras 19, 20 e 21 representam os valores obtidos com o traço 60% Fresado + 40% Pó de Brita + 3% Cimento.

Figura 16 – Resultados de MR para CP1 80% Fresado + 20% Areia de Fundição + 3% Cimento



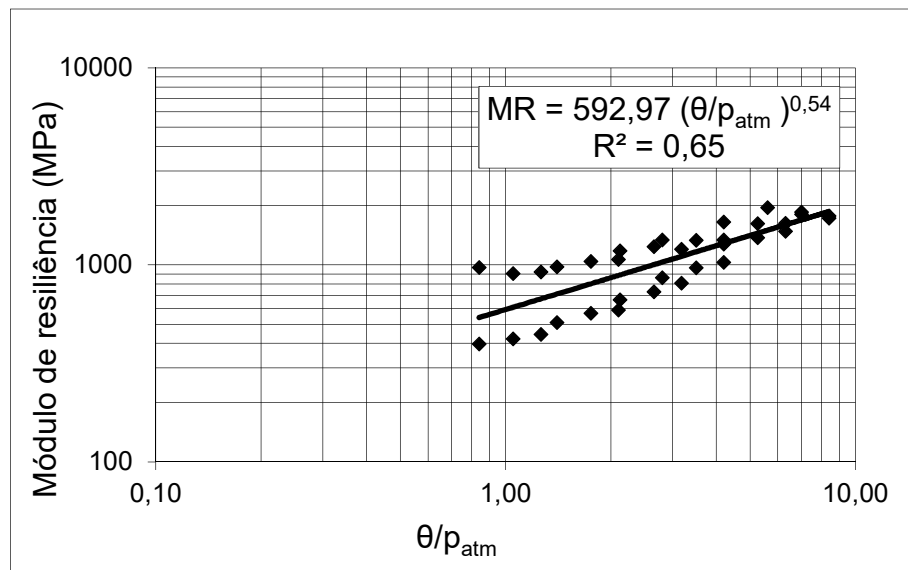
Fonte: Autor, 2019.

Figura 17 – Resultados de MR para CP2 80% Fresado + 20% Areia de Fundição + 3% Cimento



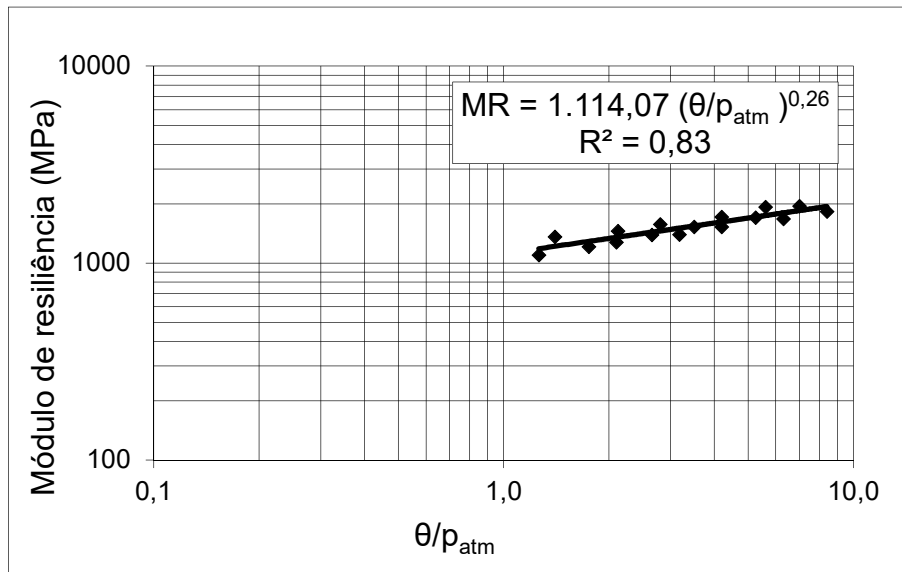
Fonte: Autor, 2019.

Figura 18 – Média dos resultados de MR para Traço 80% Fresado + 20% Areia de Fundição + 3% Cimento



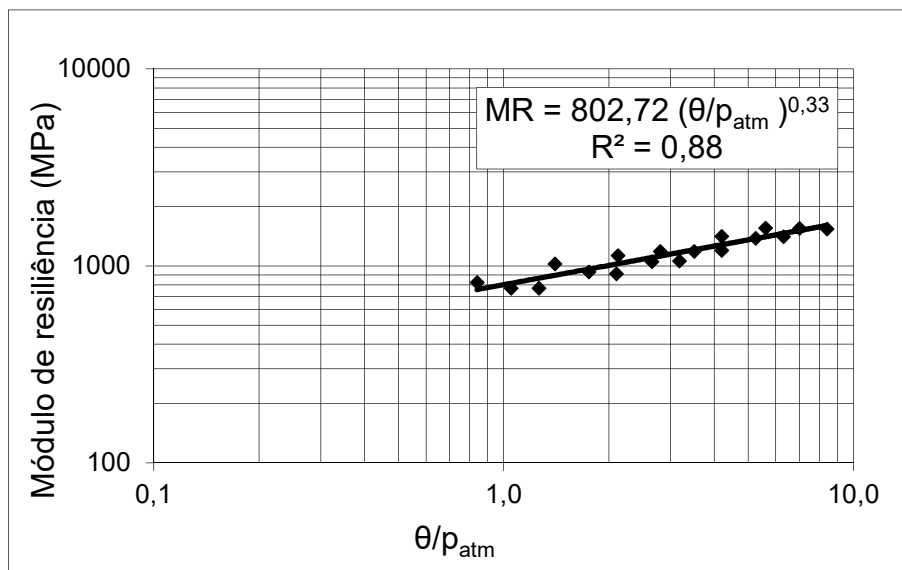
Fonte: Autor, 2019.

Figura 19 – Resultados de MR para CP1 60% Fresado + 40% Pó de Brita + 3% Cimento



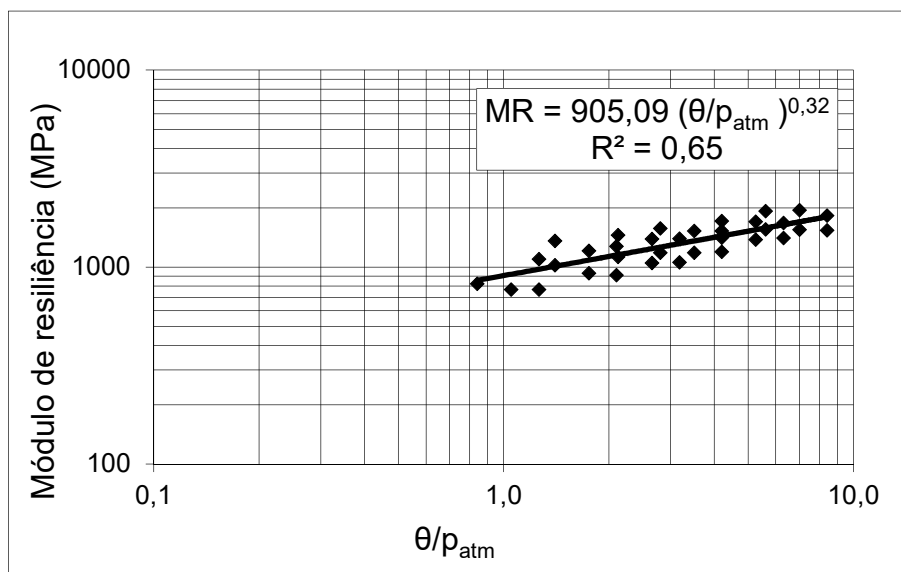
Fonte: Autor, 2019.

Figura 20 – Resultados de MR para CP2 60% Fresado + 40% Pó de Brita + 3% Cimento



Fonte: Autor, 2019.

Figura 21 – Média dos resultados de MR para 60% Fresado + 40% Pó de Brita + 3% Cimento



Fonte: Autor, 2019.

Visando trabalhar com o valor mais crítico do MR e considerando os ajustes das retas, selecionou-se o modelo de cálculo, para a variação do MR, considerado mais adequado para cada traço, o qual foi usado no dimensionamento dos pavimentos. Os modelos estão representados na Tabela 24.

Tabela 24 – Modelos para variação de MR

Traço	Corpo de Prova	Modelo
80% Fresado + 20% Areia de Fundição + 3% Cimento	CP 1	$MR=894,70 \left(\frac{\theta}{P_{atm}} \right)^{0,35}$
60% Fresado + 40% Pó de Brita + 3% Cimento	CP 2	$MR=802,72 \left(\frac{\theta}{P_{atm}} \right)^{0,33}$

Fonte: Autor, 2019.

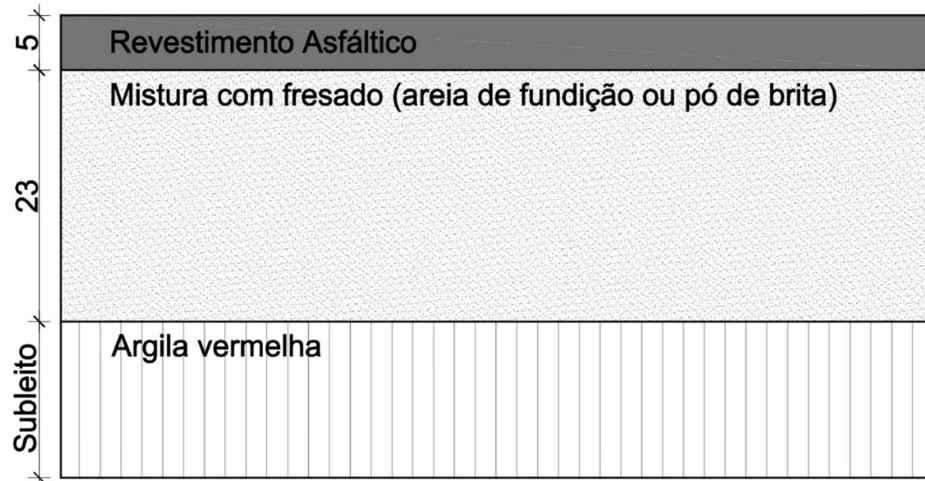
4.5 Dimensionamento

4.5.1 Método do DNIT (DNER/1981)

Utilizando-se do método empírico, considerando a base composta por 80% Fresado + 20% Areia de Fundição + 3% Cimento e também a composta por 60% Fresado + 40% Pó de Brita + 3% Cimento, obteve-se, para ambos os materiais, a espessura de 23 cm para a camada de base + sub-base. Para esse dimensionamento,

considerou-se a camada de revestimento com 5 cm, conforme o exigido pelo método e indicado na Tabela 6. A Figura 22 representa esquematicamente a estrutura desse pavimento.

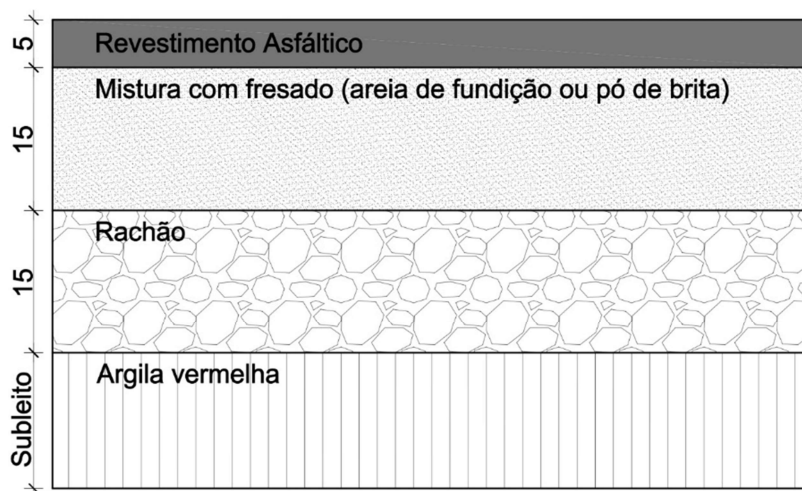
Figura 22 – Estrutura do pavimento novo pelo método do DNIT



Fonte: Autor, 2019.

Ao manter a camada de 15 cm de rachão sob o subleito, o resultado da espessura da camada de base + sub-base passa a ser de 15 cm, valor mínimo necessário segundo critérios do método. Porém, optando por executar dessa forma, haveriam dificuldades com a geometria da pista existente, uma vez que se retirou 27 cm do pavimento original e se retornaria apenas 20 cm do novo material (5 cm de revestimento + 15 cm de base + sub-base). Aumentar ainda mais a camada em questão se tornaria economicamente desfavorável. A Figura 23 traz a configuração das camadas considerando a restauração do pavimento existente.

Figura 23 – Estrutura da restauração de pavimento existente pelo método do DNIT



Fonte: Autor, 2019.

Para o valor considerado do ISC do subleito, há um bom desempenho, o que foi verificado principalmente ao se analisar a permanência da camada de rachão na via e a substituição das camadas acima pelos materiais aqui propostos. Ao adotar essa configuração, viu-se que não haveria a necessidade de utilizar outra camada devido à alta capacidade do subleito, onde, teoricamente, apenas o rachão seria suficiente. Adotar outra camada seria superdimensionar o pavimento, o que eventualmente pode ter acontecido na estrutura original do pavimento, bem como o surgimento das patologias podem ter resultado de uma má configuração.

4.5.2 Métodos mecanísticos-empíricos (pavimentos novos)

A partir das equações expostas no item 2.4.2, valores admissíveis foram determinados, com exceção da deformação horizontal admissível no subleito, em que se adotou o valor fixo encontrado na literatura. Para a determinação da deformação vertical admissível no subleito, utilizou-se das duas metodologias expostas anteriormente, adotando-se o valor mais crítico, sendo esse o encontrado através das constantes propostas pelo método *Asphalt Institute*. A Tabela 25 expressa o resumo dos valores definidos.

Tabela 25 – Valores admissíveis considerando o método mecanístico-empírico

Critério avaliado	Valor
Deflexão admissível	$D_{adm} = 0,662 \text{ mm}$
Tensão normal vertical admissível no topo do subleito	$\sigma_{V adm} = 52,973 \text{ kPa}$
Deformação vertical admissível no topo do subleito	$\epsilon_{V adm} = 340,330 \times 10^{-6}$
Deformação horizontal admissível na base da camada de revestimento	$\epsilon_{T adm} = 70 \times 10^{-6}$

Fonte: Autor, 2019.

Esses valores serviram para a definição das espessuras das camadas, buscando não os ultrapassar ao dimensionar um pavimento novo, considerando o subleito existente acrescido de camada de base (com os materiais aqui estudados) e camada de revestimento asfáltico.

Primeiramente, fixou-se a espessura da camada de revestimento em 5 cm e se estimou a espessura da camada de base, variando-a. Porém, os valores encontrados de deformação horizontal não permitiram tal dimensionamento, ultrapassando o valor admissível nas diversas tentativas realizadas. Então, adotou-se o valor de 4 cm para a camada de revestimento e se estimou a espessura da camada de base até encontrar a viável do ponto de vista técnico, considerando também a mais econômica.

Dessa forma, a estrutura de dois pavimentos distintos foi determinada, considerando um com base composta de 80% Fresado + 20% Areia de Fundação + 3% Cimento e outro com base de 60% Fresado + 40% Pó de Brita + 3% Cimento. As melhores hipóteses encontradas são apresentadas na Tabela 26.

Tabela 26 – Espessuras adotadas e resposta estrutural dos pavimentos pelo método mecanístico-empírico

Material da base		80% Fresado + 20% Areia de Fundição + 3% Cimento	60% Fresado + 40% Pó de Brita + 3% Cimento
Espessura do revestimento		4 cm	4 cm
Espessura da camada de base + sub-base		23 cm	26 cm
MR médio da camada de base + sub-base		730,08 MPa	701,72 MPa
Embaixo da roda do veículo	D	0,641mm	0,607 mm
	σ_v	39,46 kPa	34,31 kPa
	ϵ_v	$325,68 \times 10^{-6}$	$289,05 \times 10^{-6}$
	ϵ_T	$45,64 \times 10^{-6}$	$52,13 \times 10^{-6}$
	σ_1	178,48 kPa (compressão)	164,52 kPa (compressão)
	σ_3	73,42 kPa (tração)	60,44 kPa (tração)
Entre as rodas do veículo	D	0,622 mm	0,584 mm
	σ_v	41,21 kPa	36,21 kPa
	ϵ_v	$337,16 \times 10^{-6}$	$305,45 \times 10^{-6}$
	ϵ_T	$18,30 \times 10^{-6}$	$24,82 \times 10^{-6}$
	σ_1	109,84 kPa (compressão)	111,16 kPa (compressão)
	σ_3	83,59 kPa (tração)	68,08 kPa (tração)

Fonte: Autor, 2019.

Observou-se que, para a base com areia de fundição em sua composição, o MR médio se apresenta maior e a espessura da camada é menor em comparação à base com pó de brita na composição, gerando os demais resultados estruturais apresentados.

A partir disso, o método de dimensionamento de pavimentos da África do Sul (SAPEM) também foi analisado, considerando as equações expostas no item 2.4.4.

Tendo em vista que o valor fornecido do número N é estimado para 5 anos, enquadrou-se a rodovia na categoria B, conforme Tabela 8. Para a continuidade dos cálculos, algumas outras considerações tiveram de ser feitas. Como a camada de revestimento considerada se enquadra na categoria “esbelta”, por possuir 4 cm de espessura, utilizou-se a Tabela 9 para determinação da deformação horizontal admissível na base da camada de revestimento, considerando a granulometria descontínua.

Para a umidade da camada granular, adotou-se a constante para umidade considerada moderada. Outra consideração feita diz respeito à deformação vertical admissível no topo do subleito, onde se adotou, para a constante A, o valor referente

a uma deformação permanente limite de 10 mm, considerada mais crítica. O fator de segurança foi calculado com base nos resultados das tensões σ_1 e σ_3 , expostos na Tabela 26, tanto para o local embaixo da roda (F_1) quanto entre elas (F_2).

A Tabela 27 expressa os valores encontrados através dessa metodologia.

Tabela 27 – Valores considerando o método SAPEM

Critério avaliado	Valor
Deformação vertical admissível no topo do subleito	$\epsilon_{V adm} = 479,533 \times 10^{-6}$
Deformação horizontal admissível na base da camada de revestimento	$\epsilon_{T adm} = 122,490 \times 10^{-6}$
Fator de segurança admitido no meio da camada de base	$F = 1,1340$
Fator de segurança determinado na base de 80% Fresado + 20% Areia de Fundação + 3% Cimento	$F_1 = 2,360$
	$F_2 = 3,074$
Fator de segurança determinado na base de 60% Fresado + 40% Pó de Brita + 3% Cimento	$F_1 = 3,334$
	$F_2 = 4,184$

Fonte: Autor, 2019.

Ao comparar o método mecanístico-empírico e o método proposto pela SAPEM, observa-se que o primeiro se apresenta de forma mais conservadora. Além disso, o método da República da África do Sul leva em consideração o estado de tensão atuante no meio da camada de base e os parâmetros de resistência ao cisalhamento e ângulo de atrito. Ao analisar o fator de segurança determinado, conforme exposto na Tabela 27, nota-se que, para ambas as estruturas analisadas, o valor se apresentou superior ao necessário, correspondente à $F = 1,1340$.

Com base nessas observações, novas espessuras da camada de base foram estimadas e avaliadas, visando propostas mais econômicas e que atendessem aos critérios expostos. Para a camada de base composta por 80% Fresado + 20% Areia de Fundação + 3% Cimento, a espessura de 23 cm foi mantida, visto que, ao diminuir, a deformação vertical ultrapassa o limite imposto, mesmo considerando o método da República da África do Sul.

Para a camada de base composta por 60% Fresado + 40% Pó de Brita + 3% Cimento, viu-se a possibilidade de reduzi-la para 23 cm, uma vez que seria possível atender ao critério de deformação vertical proposto pelo método da República da África do Sul, mesmo que o mecanístico-empírico apresentado primeiramente não permitisse. Sendo assim, apresenta-se na Tabela 28 as respostas estruturais do pavimento para a nova espessura adotada.

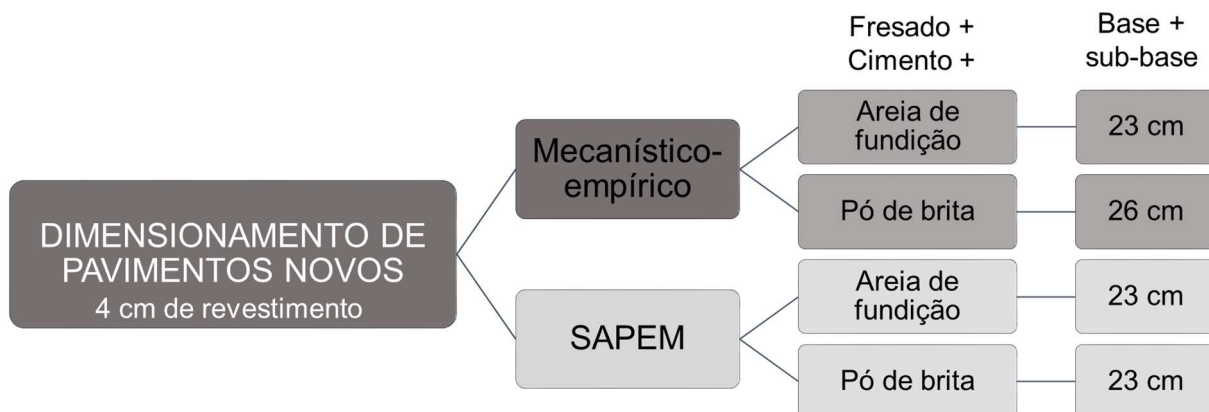
Tabela 28 – Respostas estruturais do pavimento com 23 cm de base de 60% Fresado + 40% Pó de Brita + 3% de Cimento e revestimento de 4 cm

Material da base		60% Fresado + 40% Pó de Brita +3% Cimento
Espessura do revestimento		4 cm
Espessura da camada de base		23 cm
MR da camada de base		670,79 MPa
Embaixo da roda do veículo	D	0,657 mm
	σ_v	40,91 kPa
	ϵ_v	$344,88 \times 10^{-6}$
	ϵ_T	$57,91 \times 10^{-6}$
	σ_1	177,70 kPa (compressão)
	σ_3	72,10 kPa (tração)
	F ₁	3,002
Entre as rodas do veículo	D	0,637 mm
	σ_v	42,76 kPa
	ϵ_v	$357,28 \times 10^{-6}$
	ϵ_T	$29,19 \times 10^{-6}$
	σ_1	110,90 kPa (compressão)
	σ_3	82,11 kPa (tração)
	F ₂	3,885

Fonte: Autor, 2019.

Sendo assim, seria possível adotar a espessura de 23 cm de base + sub-base para ambas as composições de pavimento dimensionados. Os relatórios completos dos dimensionamentos aqui apresentados, gerados através do *software everstress*, encontram-se no APÊNDICE A. Na Figura 24, apresenta-se resumidamente as espessuras encontradas no dimensionamento.

Figura 24 – Espessuras dos pavimentos novos



Fonte: Autor, 2019.

4.5.3 Análise mecanicista do método do DNIT (pavimentos novos)

Fazendo o uso da ferramenta *everstress*, a estrutura dimensionada pelo método do DNIT, com 5 cm de revestimento e 23 cm de base, foi analisada no programa. A Tabela 29 expressa as respostas estruturais para essa configuração. Os relatórios completos se encontram no APÊNDICE B.

Tabela 29 – Respostas estruturais dos pavimentos com espessuras dimensionadas pelo método do DNIT

Material da base		80% Fresado + 20% Areia de Fundição + 3% Cimento	60% Fresado + 40% Pó de Brita + 3% Cimento
Espessura do revestimento		5 cm	5 cm
Espessura da camada de base		23 cm	23 cm
MR da camada de base		601,35 MPa	565,40 MPa
Embaixo da roda do veículo	D	0,651mm	0,663 mm
	σ_v	39,78 kPa	40,83 kPa
	ϵ_v	$347,32 \times 10^{-6}$	$361,84 \times 10^{-6}$
	ϵ_T	$113,75 \times 10^{-6}$	$124,98 \times 10^{-6}$
	σ_1	155,93 kPa (compressão)	155,28 kPa (compressão)
	σ_3	74,28 kPa (tração)	72,78 kPa (tração)
	F ₁	2,582	3,288
Entre as rodas do veículo	D	0,636 mm	0,647 mm
	σ_v	41,92 kPa	43,06 kPa
	ϵ_v	$365,18 \times 10^{-6}$	$380,82 \times 10^{-6}$
	ϵ_T	$83,67 \times 10^{-6}$	$93,76 \times 10^{-6}$
	σ_1	107,87 kPa (compressão)	108,64 kPa (compressão)
	σ_3	83,04 kPa (tração)	81,39 kPa (tração)
	F ₂	3,114	3,946

Fonte: Autor, 2019.

Analisando os valores encontrados para a base com areia de fundição em sua composição e tendo em vista os valores admissíveis determinados pelo método mecanístico-empírico, nota-se que os resultados de deformação, tanto ϵ_v quanto ϵ_T , não atendem aos critérios. Porém, ao considerar a metodologia sul africana, o pavimento poderia ser considerado como tecnicamente viável.

Já a possibilidade de executar a base com 60% Fresado + 40% Pó de Brita + 3% Cimento, considerando as espessuras indicadas na Tabela 29, seria descartada

devido à deflexão elevada. Além disso, os valores de deformação também ultrapassam os admissíveis pelos métodos.

Nesse contexto, retrate-se a deficiência existente em métodos empíricos, que não levam em conta diversos fatores importantes e determinantes para a vida útil dos pavimentos, ocasionando eventuais patologias no decorrer do seu uso. Métodos mecanísticos-empíricos são mais apropriados para dimensionamento de pavimentos, uma vez que relatam prováveis situações que podem interferir na escolha de materiais e espessuras das camadas.

4.5.4 Métodos mecanísticos-empíricos (restauração de pavimento existente)

Considerando os critérios calculados pelo método mecanístico-empírico e pelo SAPEM, conforme item 4.5.1, foi dimensionada a camada de base considerando a presença do rachão na estrutura do pavimento. Para fins de comparação, manteve-se o valor de 4 cm para o revestimento.

Seguiu-se o mesmo procedimento adotado para o dimensionamento feito anteriormente. Em um primeiro momento, atendeu-se aos critérios mais restritos, sendo esses do método mecanístico-empírico, conforme Tabela 25. Após, consideraram-se valores admissíveis conforme o método SAPEM, segundo a Tabela 27.

A Tabela 30 apresenta os resultados encontrados e espessuras adotadas seguindo as duas metodologias expostas. Os relatórios gerados no *software everstress* para estes dimensionamentos estão disponíveis no APÊNDICE C.

Tabela 30 – Respostas estruturais dos pavimentos

Material da base		80% Fresado + 20% Areia de Fundição +3% Cimento		60% Fresado + 40% Pó de Brita +3% Cimento	
Método		Mecanístico-empírico	SAPEM	Mecanístico-empírico	SAPEM
Espessura do revestimento		4 cm	4 cm	4 cm	4 cm
Espessura da camada de base		21 cm	16 cm	26 cm	21 cm
MR da camada de base		937,11 MPa	906,99 MPa	840,32 MPa	847,96 MPa
Embaixo da roda do veículo	D	0,574 mm	0,654 mm	0,531 mm	0,587 mm
	σ_v	26,02 kPa	33,93 kPa	21,51 kPa	26,78 kPa
	ϵ_v	$336,56 \times 10^{-6}$	$436,05 \times 10^{-6}$	$281,81 \times 10^{-6}$	$348,30 \times 10^{-6}$
	ϵ_T	$21,25 \times 10^{-6}$	$25,50 \times 10^{-6}$	$34,15 \times 10^{-6}$	$31,47 \times 10^{-6}$
	σ_1	204,33 kPa (compressão)	234,66 kPa (compressão)	176,23 kPa (compressão)	203,87 kPa (compressão)
	σ_3	56,73 kPa (tração)	79,39 kPa (tração)	41,65 kPa (tração)	54,66 kPa (tração)
	F ₁	2,277	1,893	3,442	2,901
Entre as rodas do veículo	D	0,557 mm	0,643 mm	0,509 mm	0,569 mm
	σ_v	27,74 kPa	36,26 kPa	22,90 kPa	28,59 kPa
	ϵ_v	$363,58 \times 10^{-6}$	$470,87 \times 10^{-6}$	$304,40 \times 10^{-6}$	$376,70 \times 10^{-6}$
	ϵ_T	Apenas compressão atuando	Apenas compressão atuando	$10,33 \times 10^{-6}$	$5,15 \times 10^{-6}$
	σ_1	119,74 kPa (compressão)	117,80 kPa (compressão)	121,53 kPa (compressão)	121,63 kPa (compressão)
	σ_3	67,18 kPa (tração)	95,64 kPa (tração)	47,93 kPa (tração)	64,81 kPa (tração)
	F ₂	3,181	2,785	4,425	4,022

Fonte: Autor, 2019.

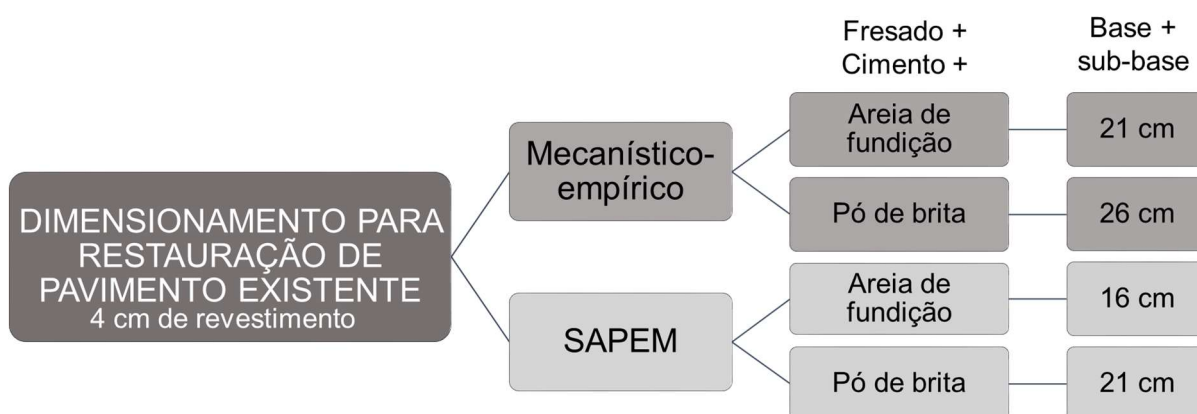
Analisando a estrutura pelo ponto de vista econômico, há vantagem em se adotar a areia de fundição na mistura, uma vez que retornou em espessuras inferiores. Outro ponto constatado novamente é a influência da tensão confinante no MR, onde o MR varia conforme a espessura adotada. Além disso, ao comparar os dois métodos utilizados para dimensionamentos, constata-se que o limite admissível de deformação horizontal se mostrou determinante para poder adotar espessuras menores. Quanto ao fator de segurança, calculado pelo método SAPEM, viu-se que a base composta por 80% Fresado + 20% Areia de Fundição + 3% Cimento apresenta valores inferiores

em relação à base de 60% Fresado + 40% Pó de Brita + 3% Cimento, mas ainda assim é aceito por não exceder $F = 1,1340$.

Ao considerar a adoção das espessuras aqui indicadas, deve-se atentar para a geometria da pista existente. Ao se remover as camadas acima do rachão, remove-se cerca de 27 cm do pavimento. Nesse caso, a espessura que poderia causar um eventual problema na pista seria adotar 16 cm na camada de base com 80% Fresado + 20% Areia de Fundação + 3% Cimento, pois haveria uma diferença de cota de 11 cm entre o trecho executado e o trecho existente.

Na Figura 25, apresenta-se resumidamente as espessuras encontradas no dimensionamento.

Figura 25 – Espessuras dos pavimentos com a restauração de pavimento existente



Fonte: Autor, 2019.

4.5.5 Método MeDiNa

Em um primeiro momento, dados do tráfego e características da estrada foram inseridos no programa. Ao fazer isso, verificou-se a incompatibilidade da interface do *software* com os dados obtidos no relatório fornecido do Número N, sendo insuficiente diante do exigido pelo programa. O MeDiNa acaba retornando valores diferentes aos inseridos, recalculando o Número N e, portanto, optou-se por adotar um valor aproximado.

Além disso, o tipo de via que deve ser informado não diz respeito à classe da rodovia, mas sim aos tipos: sistema arterial principal, primário ou secundário; sistema

coletor primário e secundário; e sistema local. Isso se configurou como uma segunda dificuldade para ter a precisão necessária no dimensionamento.

Como já descrito no item 2.4.4, para ter resultados precisos é necessário possuir todos os dados exigidos pelo programa. Não foi possível obter todas as informações do subleito real e, mesmo estimando parâmetros, como feito anteriormente no dimensionamento com auxílio do *everstress*, não foi possível informar valores referentes à deformação permanente, onde é exigido modelos de cálculo e coeficientes de regressão. Para a camada de base, usando-se dos dados obtidos através desse trabalho, também houve dificuldade para informar coeficientes de regressão.

Procurou-se dimensionar com 4 cm, para fins de comparação com o dimensionamento conforme item 4.5.2, mas o programa sempre retornou para o valor de 5 cm. Há a limitação do programa quanto à espessura do revestimento, não sendo possível adotar um valor menor que 5 cm, uma vez que o DNIT exige tal espessura como mínima a ser adotada.

Com o intuito de simular a estrutura de um pavimento e realizar análises, procurou-se estimar alguns dos valores inseridos. Sendo assim, para o subleito se adotou um solo presente na base de dados do programa e, para a base, estimou-se os coeficientes de regressão tendo como referência os materiais granulares presentes no software, os quais possuem todos os parâmetros definidos. Simulou-se diversas configurações de camadas, alterando apenas o referente à deformação permanente da camada de base. Ao fazer isso, notou-se que os coeficientes de regressão possuem grande influência nas respostas estruturais do pavimento, alterando principalmente o afundamento de trilha de roda.

Diante das dificuldades encontradas, não foi possível realizar o dimensionamento para esse estudo através do MeDiNa e, sendo assim, também não se dimensionou considerando a camada de rachão. Optou-se por não apresentar as simulações feitas por não apresentar a confiabilidade necessária devido à falta de informações. É preciso explorar melhor os materiais e os parâmetros exigidos para alimentar o programa.

5 CONCLUSÃO

A partir do estudo realizado para a estabilização de um material fresado, oriundo da RSC-287, Km 123, verificou-se que a adição da areia de fundição resulta em um material tecnicamente viável para ser empregado em camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis.

Verificou-se que a adição de 20% de areia de fundição é compatível para ser usada em sub-base de pavimentos flexíveis, estando essa de acordo com as faixas granulométricas exigidas pelo DAER. Objetivando o melhoramento da mistura, a adição de 3% de cimento se mostrou uma forma eficaz de aumentar a capacidade suporte do material e permitiu o uso em camadas de base também.

Comparando a adição do resíduo industrial aqui proposto com a adição de um material beneficiado, como o pó de brita, amplamente empregado, têm-se parâmetros semelhantes encontrados através de ensaios em laboratório. As diferenças principais entre as misturas dizem respeito ao ISC, onde o valor maior corresponde à mistura com areia de fundição, e também diferenças significativas de coesão e ângulo de atrito.

As características da mistura indicam o possível uso em pavimentos, principalmente como base ao se adicionar o cimento junto à mistura. Ressalta-se a influência da tensão confinante no material, que se mostrou determinante para a definição do MR e posterior espessura das camadas.

A partir dos métodos de dimensionamento empregados, percebe-se que a mistura com areia de fundição resulta em espessuras menores para o uso como base em comparação à mistura com pó de brita. Foi necessário verificar as respostas estruturais do pavimento, bem como a interação das camadas, para buscar soluções tecnicamente viáveis.

A partir de um dimensionamento empírico, como o método do DNIT, percebeu-se a carência na análise estrutural do pavimento, pois o método não considera diversos fatores importantes e determinantes para a vida útil dos pavimentos, podendo apresentar patologias ao decorrer dos anos de uso. A metodologia empírica também pode resultar em espessuras de camadas superdimensionadas e que, conseqüentemente, resultam em gastos desnecessários e, conforme verificado com o uso de metodologias mecanísticas-empíricas, podem ocasionar problemas na estrutura.

Assim, adotando-se metodologias mecanísticas-empíricas, foi possível avaliar diversas configurações de pavimentos flexíveis e constatar a influência do MR na escolha das espessuras da base. O ensaio triaxial mostrou-se fundamental para a adoção de metodologias avançadas de dimensionamento. Conforme os valores admissíveis adotados, viu-se a diferença ao adotar o método da República da África do Sul, que se apresenta menos conservador e permite maiores deformações, consequentemente permite a adoção de camadas menores de base. Além disso, outros fatores são levados em conta, como coesão e ângulo de atrito, umas das principais diferenças entre as misturas comparadas.

Avaliando a utilização do *software* MeDiNa, ferramenta do novo método de dimensionamento proposto pelo DNIT, o projetista pode se deparar com algumas dificuldades, como ocorreu nesse estudo. Apesar da agilidade do programa, para fazer uso é preciso possuir dados mais detalhados dos materiais utilizados, o que impossibilitou o dimensionamento.

Perante a necessidade de se atentar para questões financeiras, a areia de fundição apresenta vantagens por permitir espessuras menores e também por se tratar de um rejeito, sem custo de aquisição. Ao mesmo tempo, adota-se assim uma possibilidade ambientalmente correta, uma vez que se está dando destino para materiais que eventualmente seriam descartados.

O tempo hábil para o desenvolvimento desse estudo não permitiu explorar as características de outro traço com areia de fundição. Explorar outras porcentagens de adição poderia gerar resultados satisfatórios. Pode-se também avaliar o fresado resultante de outras camadas do pavimento, não apenas o CBUQ, bem como a adição de outros materiais à mistura. O cimento configurou o aumento de resistência, mas pouco se explorou a resistência a compressão, uma vez que se ensaiou apenas um corpo de prova e aos 7 dias de cura.

Uma sugestão é também analisar o comportamento do material frente à variação do teor de cimento. Por outro lado, a não adição de cimento poderá vir a resultar em misturas com capacidade para ser aplicada em sub-bases de pavimentos, como foi constatado ao realizar o ensaio de ISC, mas não se explorou a fundo a sua aplicação.

O estudo se caracterizou como o reuso de material proveniente da fresagem de pavimentos deteriorados e não a reciclagem de pavimentos propriamente dita. Poderá se explorar as aplicações em um trabalho futuro, bem como avaliar outras formas de explorar o trecho e as camadas existentes.

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. *Guide for design of pavement structures*. Washington, D.C., 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação de resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2011.

. *NBR 6458:2016 Versão Corrigida 2:2017: 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, 2016b.

. *NBR 7181 Versão Corrigida 2:2018: Solo – análise granulométrica – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2016a.

BALBO, José Tadeu. *Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração*. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

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

BRANCO, V. T. F. C. *et al. Utilização de resíduos na pavimentação*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM RESÍDUOS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. 2004, Costão do Santinho: [s.n.], 2004. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/cd/ictr/2004/ARQUIVOS%20PDF/14/14-074.pdf>>. Acesso em 23 ago. 2018.

BROSSEAUD, Yves. *Reciclagem de misturas asfálticas: Evolução após 20 anos e a situação atual na França*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE RODOVIAS E CONCESSÕES, 7, SALÃO DE INOVAÇÕES, 3. 2011, Foz do Iguaçu, 2011. p. 17.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, *Anuário CNT do transporte: estatísticas consolidadas*. Brasília: CNT, 2018a. Disponível em: <<http://anuariodotransporte.cnt.org.br/2018/File/PrincipaisDados.pdf>>. Acesso em 28 ago. 2018.

_____. *Dnit deve implementar novo método de pavimentação asfáltica*. Agência CNT de notícias *Agência CNT de notícias*, Brasília, 2 out. 2018b. Disponível em: <<https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/novo-metodo-pavimentacao-asfaltica-dnit-breve>>. Acesso em: 16 out. 2019.

CONSOLI, N. C. *et al.* *Mohr–Coulomb failure envelopes of lime-treated soils*. In: *Géotechnique*, 2014. v. 64, n. 2, p. 165–170.

COSTA, Clauber, FILHO, Wandemyr. *O uso de reciclagem de pavimentos, como alternativa para o desenvolvimento sustentável em obras rodoviárias no Brasil*. *Revista Traços*, Belém, v. 12, n. 26, p. 39-58, 2010.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. *Especificações gerais*. Rio Grande do Sul, 1998.

____. Manual de ensaios. Porto Alegre, 2001a. v. 2.

____. Manual de ensaios. Porto Alegre, 2001b. v. 1.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. *DNIT 134/2018-ME: Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência*. Rio de Janeiro, 2018a.

____. *DNIT 181/2018-ME: Pavimentação – Material Estabilizado Quimicamente – Determinação do módulo de resiliência*. Rio de Janeiro, 2018b.

____. *DNIT 172/2016-ME: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas*. Rio de Janeiro, 2016.

____. *DNIT 137/2010-ES: Pavimentação – Regularização do subleito*. Rio de Janeiro, 2010b.

____. *DNIT 138/2010-ES: Pavimentação – Reforço do subleito*. Rio de Janeiro, 2010c.

____. *DNIT 139/2010-ES: Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente*. Rio de Janeiro, 2010d.

____. *DNIT 141/2010-ES: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente*. Rio de Janeiro, 2010a.

____. *DNIT 143/2010-ES: Pavimentação – Base de solo-cimento*. Rio de Janeiro, 2010e.

____. *Manual de Estudos de Tráfego*. Rio de Janeiro, 2006c.

____. *Manual de Pavimentação*. Rio de Janeiro, 2006a.

____. *Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos*. Rio de Janeiro, 2006b.

____. *DNER-ME 180/94: Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à compressão simples*. Rio de Janeiro, 1994.

EGR. Desenvolvido pela Empresa Gaúcha de Rodovias. Apresenta informações gerais sobre a RSC-287. Disponível em: <<http://www.egr.rs.gov.br/conteudo/1563/rsc-287>>. Acesso em: 3 nov. 2018.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. *Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments*. Washington, D.C., 1997. Disponível em: <<https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/98042/02.cfm>>. Acesso em 11 set. 2018.

FLORES, G. C.; SPECHT, L. P. *Aplicação do software medina na análise e no projeto de reforço de pavimentos*. In: X SEMINÁRIO DE ENGENHARIA GEOTÉCNIA DO RIO GRANDE DO SUL, Santa Maria, 2019.

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. *MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional*. Manual de Utilização MeDiNa. Versão 1.0.0. Rio de Janeiro, 2018.

HOOD, Rogério da Silva Scott. *Análise da viabilidade técnica da utilização de resíduos de construção e demolição como agregado miúdo reciclado na confecção de blocos de concreto para pavimentação*. 2006. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

JAEGER, J. C.; COOK, N. G. W.; ZIMMERMAN, R. W. *Fundamentals of rock mechanics*. 4. ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2007.

SOUZA JÚNIOR, José Geraldo de. *Aplicação do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos a trechos de uma rodovia federal*. 2018. 263 f. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ. 2018.

KLINSKY, Luis Miguel Gutiérrez. *Proposta de reaproveitamento de areia de fundição em sub-bases e bases de pavimentos flexíveis, através de sua incorporação a solos argilosos*. 2008. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em Infraestrutura de Transportes – Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. *Mecânica dos pavimentos*. 3. ed. Rio de Janeiro: UFRJ, 2015.

MOTTA, L. M. G. *et al. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. 3. ed. Rio de Janeiro, 2008.

MOTTA, Laura Maria Goretti da. *Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis: critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetitivas*. 1991. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia – Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

PIRES, G. M. *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. *Revista Matéria*, Rio de Janeiro, v. 21, p. 365-384, 2016.

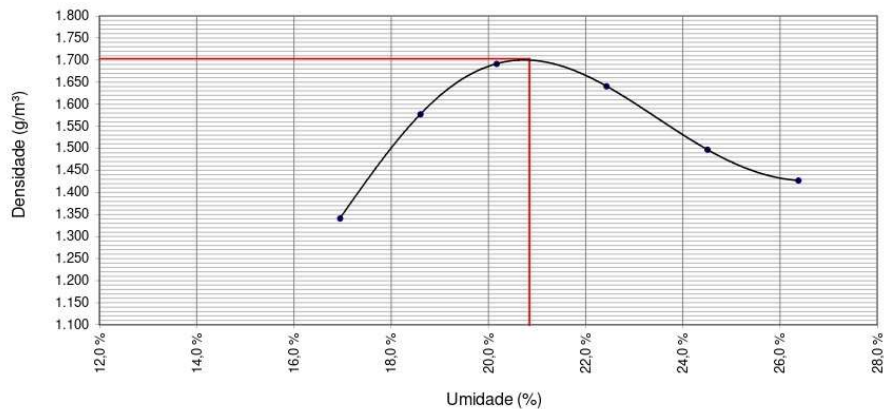
SENÇO, Wlastermiller de. *Manual de técnicas de pavimentação*. 2. ed. São Paulo: Pini, 2007. v. 1.

SOUTH AFRICAN NATIONAL ROADS AGENCY SOC LTD. *South African pavement engineering manual (SAPEM)*. África do Sul: SANRAL, 2013.

ANEXO A – Relatório de controle tecnológico do subleito

	LABORATÓRIO DE SOLOS	COMPACTAÇÃO																																																																																
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%;"> OBRA: RSC-287 </td> <td style="width: 33%;"> Estaca: 127+390 </td> <td style="width: 33%;"> Coleta: 11/04/2019 </td> </tr> <tr> <td> Trecho: LOTE 2, km105 ao km177,16 </td> <td> Lado: LE </td> <td> Data: 12/04/2019 </td> </tr> <tr> <td> Camada: SUBLEITO </td> <td> Procedência: PISTA </td> <td> Equipe: LABORATÓRIO </td> </tr> </table>			OBRA: RSC-287	Estaca: 127+390	Coleta: 11/04/2019	Trecho: LOTE 2, km105 ao km177,16	Lado: LE	Data: 12/04/2019	Camada: SUBLEITO	Procedência: PISTA	Equipe: LABORATÓRIO																																																																							
OBRA: RSC-287	Estaca: 127+390	Coleta: 11/04/2019																																																																																
Trecho: LOTE 2, km105 ao km177,16	Lado: LE	Data: 12/04/2019																																																																																
Camada: SUBLEITO	Procedência: PISTA	Equipe: LABORATÓRIO																																																																																
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Item</th> <th>Unid.</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> <th colspan="2">Umidade Higroscópica</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cápsula Nº</td> <td>-</td> <td>28</td> <td>9</td> <td>6</td> <td>10</td> <td>69</td> <td>18</td> <td>1</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>Peso Bruto Úmido</td> <td>g</td> <td>107,4</td> <td>121,1</td> <td>167,4</td> <td>169,3</td> <td>111,4</td> <td>115,2</td> <td>123,60</td> <td>113,70</td> </tr> <tr> <td>Peso Bruto Seco</td> <td>g</td> <td>95,2</td> <td>105,7</td> <td>143,0</td> <td>142,9</td> <td>94,1</td> <td>96,0</td> <td>117,70</td> <td>107,90</td> </tr> <tr> <td>Peso da Água</td> <td>g</td> <td>12,2</td> <td>15,4</td> <td>24,4</td> <td>26,4</td> <td>17,3</td> <td>19,2</td> <td>5,90</td> <td>5,8</td> </tr> <tr> <td>Peso da Cápsula</td> <td>g</td> <td>23,2</td> <td>22,9</td> <td>22,0</td> <td>25,2</td> <td>23,5</td> <td>23,2</td> <td>23,60</td> <td>15,20</td> </tr> <tr> <td>Peso do Solo Seco</td> <td>g</td> <td>72,0</td> <td>82,8</td> <td>121,0</td> <td>117,7</td> <td>70,6</td> <td>72,8</td> <td>94,10</td> <td>92,7</td> </tr> <tr> <td>Umidade</td> <td>%</td> <td>16,94%</td> <td>18,60%</td> <td>20,17%</td> <td>22,43%</td> <td>24,50%</td> <td>26,37%</td> <td>6,27</td> <td>6,26</td> </tr> </tbody> </table>			Item	Unid.	1	2	3	4	5	6	Umidade Higroscópica		Cápsula Nº	-	28	9	6	10	69	18	1	4	Peso Bruto Úmido	g	107,4	121,1	167,4	169,3	111,4	115,2	123,60	113,70	Peso Bruto Seco	g	95,2	105,7	143,0	142,9	94,1	96,0	117,70	107,90	Peso da Água	g	12,2	15,4	24,4	26,4	17,3	19,2	5,90	5,8	Peso da Cápsula	g	23,2	22,9	22,0	25,2	23,5	23,2	23,60	15,20	Peso do Solo Seco	g	72,0	82,8	121,0	117,7	70,6	72,8	94,10	92,7	Umidade	%	16,94%	18,60%	20,17%	22,43%	24,50%	26,37%	6,27	6,26
Item	Unid.	1	2	3	4	5	6	Umidade Higroscópica																																																																										
Cápsula Nº	-	28	9	6	10	69	18	1	4																																																																									
Peso Bruto Úmido	g	107,4	121,1	167,4	169,3	111,4	115,2	123,60	113,70																																																																									
Peso Bruto Seco	g	95,2	105,7	143,0	142,9	94,1	96,0	117,70	107,90																																																																									
Peso da Água	g	12,2	15,4	24,4	26,4	17,3	19,2	5,90	5,8																																																																									
Peso da Cápsula	g	23,2	22,9	22,0	25,2	23,5	23,2	23,60	15,20																																																																									
Peso do Solo Seco	g	72,0	82,8	121,0	117,7	70,6	72,8	94,10	92,7																																																																									
Umidade	%	16,94%	18,60%	20,17%	22,43%	24,50%	26,37%	6,27	6,26																																																																									
								6,27																																																																										
Água Total	g	398	458	518	578	638	678	Peso do Material																																																																										
Água Adicionada	g	360	420	480	540	600	640	4.000																																																																										
% Água Adicionada	%	9,00%	11,00%	13,00%	15,00%	17,00%	19,00%	P. Mat. Seco	Peso Água																																																																									
Peso Bruto Úmido	g	3.421	3.696	3.844	3.822	3.690	3.635	3.962	38																																																																									
Peso do Solo Úmido	g	1.429	1.704	1.852	1.830	1.698	1.643	Moldes																																																																										
Dens. Solo Úmido	g / m³	1.569	1.870	2.033	2.009	1.864	1.804	Nº	Peso																																																																									
Dens. Solo Seco	g / m³	1.341	1.577	1.692	1.641	1.497	1.427	A-1	Volume																																																																									
Esforço de Compactação:		Observações: F-1 ARGILA VERMELHA						A-1	1.992	911																																																																								
Resultados:								A-1	1.992	911																																																																								
H. Ótima	Dens. Máx							ISC	Expansão	A-1	1.992	911																																																																						
20,85 %	1.703							9,4	1,30	A-1	1.992	911																																																																						

ANÁLISE GRÁFICA





LABORATÓRIO DE SOLOS

CBR

OBRA: RSC-287	Estaca: 127+390	Coleta: 11/04/2019
Trecho: LOTE 2, km105 ao km177,16	Lado: LE	Data: 12/04/2019
Camada: SUBLEITO	Procedência: PISTA	Equipe: LABORATÓRIO

PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

DETERMINAÇÕES DE UMIDADE	HIGROSCÓPICA		MOLDAGEM		APÓS SATURAÇÃO	
Cápsula nº	1	4	1	2		
Peso da Cápsula+Solo Úmido(g)	123,60	113,70	104,80	110,30		
Peso da Cápsula+Solo Seco(g)	117,70	107,90	91,50	94,70		
Peso da Água(g)	5,90	5,80	13,30	15,60		
Peso da Cápsula(g)	23,60	15,20	23,50	18,10		
Peso do Solo Seco(g)	94,10	92,70	68,00	76,60		
Teor de Umidade(%)	6,27	6,26	19,56	20,37		
Umidade Média(%)	6,27		19,97			
UMID. ÓTIMA(%):	20,85	AMOSTRA ÚMIDA(g):	5,000	ÁGUA A ADICIONAR(ml):	686	

COMPACTAÇÃO DA AMOSTRA

DENSIDADE	MOLDAGEM	SATURADO	EXPANSÃO			
Cilindro nº	1		Altura do Corpo de Prova (mm)			
Água Adicionada(ml)	686		DATA	Tempo Decorrido em dias	Expansão Lida em mm	Expansão em Porcentagem
Peso do Cilindro+Solo Úmido(g)	9.397					
Peso do Cilindro(g)	5.216		14/04/2019		1,00	
Peso do Solo Úmido(g)	4.181		15/04/2019		2,22	1,07
Volume do Cilindro(cm³)	2.069		16/04/2019		2,38	1,21
Densid. Aparente Úmida(g/cm³)	2,021		17/04/2019		2,45	1,27
Densid. Aparente Seca(g/cm³)	1,685		18/04/2019		2,48	1,30

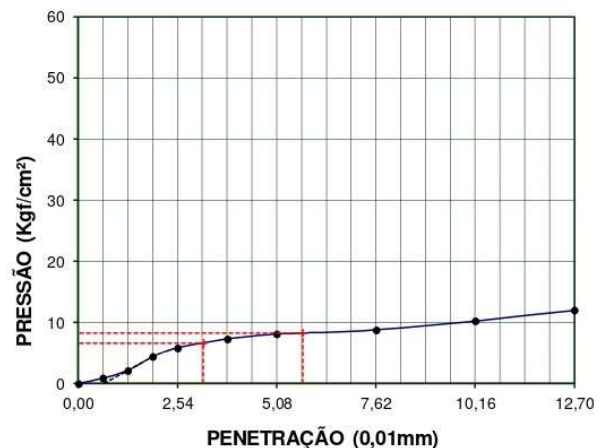
ENSAIO DE PENETRAÇÃO

Constante do Anel	0,0974		
Tempo (min.)	Penet. (mm)	Leitura (0,001mm)	Pressão (kgf/cm²)
0,5	0,64	9	0,9
1,0	1,27	22	2,1
1,5	1,91	45	4,4
2,0	2,54	60	5,8
3,0	3,81	75	7,3
4,0	5,08	83	8,1
6,0	7,62	90	8,8
8,0	10,16	105	10,2
10,0	12,70	123	12,0

CÁLCULO DO I.S.C.

Leitura (mm)	Pressão		I.S.C. (%)
	Aplic.	Corrigida	
2,54	5,8	6,6	9,4
5,08	8,1	8,3	7,8

GRÁFICO PRESSÃO PENETRAÇÃO



DENS.SECA MÁX.(g/cm³):	1,703	UMID. ÓTIMA(%):	20,8	I.S.C.(%):	9,40	EXPANSÃO(%):	1,30
------------------------	-------	-----------------	------	------------	------	--------------	------

Observações:

F-1

ARGILA VERMELHA



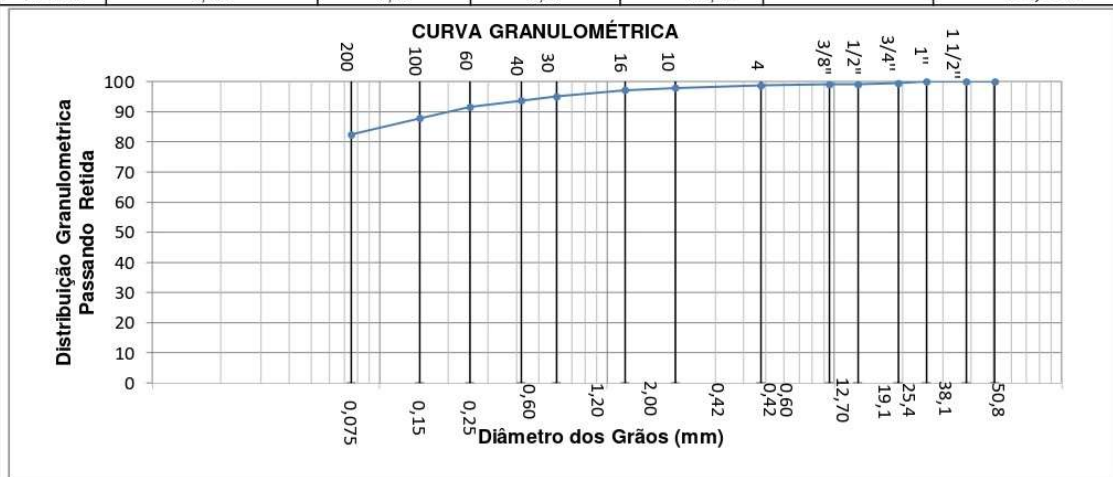
LABORATÓRIO DE SOLOS

GRANULOMETRIA

OBRA: RSC-287	Estaca: 127+390	Coleta: 11/04/2019
Trecho: LOTE 2, km105 ao km177,16	Lado: LE	Data: 12/04/2019
Camada: SUBLEITO	Procedência: PISTA	Equipe: LABORATÓRIO

Umidade Higroscópica				
Cápsula nº	9		Total	Parcial
Cápsula+Solo Úmido(g)	82,50	Peso úmido	4192,5	150,0
Cápsula+Solo Seco(g)	73,50	Peso retido na # 2,00 mm (g)	75,8	
Peso da Água(g)	9,00	Peso úmido pass. # 2,00 mm (g)	4116,7	
Peso da Cápsula(g)	17,00	Peso seco pass. # 2,00 mm (g)	3551,0	
Peso do Solo Seco(g)	56,5	Peso amostra seca	3626,8	129,4
Teor de Umidade(%)	15,93			

Peneiras (pol)		Peso Retido Parcial (g)	Peso Passando (g)	%Passando Amostra Total	Observações: F-1 ARGILA VERMELHA	
Pol	mm					
2"	50,8	0,00	0,00	100,00		
1 1/2"	38,1	0,00	0,00	100,00		
1"	25,4	0,00	0,00	100,00		
3/4"	19,1	19,90	0,55	99,45		
1/2"	12,7	31,70	0,87	99,13		
3/8"	9,50	34,50	0,95	99,05		
N.º 4	4,76	46,30	1,28	98,72		
N.º 10	2,00	75,80	2,09	97,91		
N.º 16	1,20	1,00	0,76	97,15	COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA (%)	
N.º 30	0,60	2,80	2,12	95,03	PEDREGULHO	1,28%
N.º 40	0,42	1,80	1,36	93,67	AREIA GROSSA	0,81%
N.º 60	0,25	2,80	2,12	91,55	AREIA MÉDIA	4,24%
N.º 100	0,15	4,90	3,71	87,85	AREIA FINA	11,20%
N.º 200	0,075	7,10	5,37	82,47	SILTE E ARGILA	82,47%
					TOTAL AMOSTRA	100,00%



ANEXO B – Cálculo do Número N

CÁLCULO DOS FATORES DE VEÍCULO - AASHTO																
Rodovia: RSC-267																
Pátio: Candelária																
Hipótese:		% Veículos - Máx. Legal			70%		% Veículos - Vazios			25%		% Veículos - Máx. c/ Tol.			5%	
Categoria	Tipo	nº de Eixos	Configuração de Eixos				Volume Médio Diário	Distrib. (%)	Fatores de Veículos - AASHTO							
			ESRS	ESRD	ETD	ETT			Individual			Total				
									Carregado	Vazio	Excesso	Carregado	Vazio	Excesso		
DNIT	Ônibus	2CB	2	1	1	0	0	65	3,9%	2,72	0,14	4,11	0,11	0,01	0,16	
		3CB	3	1	0	1	0		0,0%	1,97	0,11	2,93	0,00	0,00	0,00	
		4CB	4	1	0	0	1		0,0%	1,89	0,10	2,83	0,00	0,00	0,00	
	Cam. Leves	2C	2	1	1	0	0	585	35,5%	2,72	0,14	4,11	0,97	0,05	1,46	
	Cam. Médios	3C	3	1	0	1	0	257	15,6%	1,97	0,11	2,93	0,31	0,02	0,46	
	Cam. Pesados	4C	4	1	0	0	1	54	3,9%	1,89	0,10	2,83	0,07	0,00	0,11	
	Semi-Reboques	2S1	3	1	2	0	0	257	15,6%	5,12	0,26	7,72	0,60	0,04	1,20	
		2S2	4	1	1	1	0	54	3,9%	4,36	0,23	6,55	0,17	0,01	0,25	
		2S3	5	1	1	0	1	39	2,4%	4,28	0,22	6,44	0,10	0,01	0,15	
		3S1	4	1	1	1	0	16	1,0%	4,36	0,23	6,55	0,04	0,00	0,06	
		3S2	5	1	0	2	0	39	2,4%	3,61	0,20	5,37	0,09	0,00	0,13	
		3S3	6	1	0	1	1	119	7,2%	3,53	0,19	5,26	0,25	0,01	0,38	
		3S2S2	7	1	0	3	0	17	1,1%	5,25	0,30	7,60	0,06	0,00	0,08	
		3S2C4	9	1	0	4	0	1	0,1%	6,90	0,39	10,24	0,01	0,00	0,01	
		2C2	4	1	3	0	0	16	1,0%	7,51	0,38	11,34	0,07	0,00	0,11	
	Reboques	2C3	5	1	2	1	0	10	0,6%	6,76	0,35	10,16	0,04	0,00	0,06	
		3C2	5	1	2	1	0	10	0,6%	6,76	0,35	10,16	0,04	0,00	0,06	
		3C3	6	1	1	2	0	79	4,8%	6,01	0,32	8,98	0,29	0,02	0,43	
		3C4	7	1	0	3	0	7	0,5%	5,25	0,30	7,60	0,02	0,00	0,04	
		2C4	6	1	3	1	0		0,0%	9,15	0,47	13,77	0,00	0,00	0,00	
Especiais	Reboques	3C4	7	1	0	3	0		0,0%	5,25	0,30	7,60	0,00	0,00	0,00	
		3L3	6	1	1	2	0		0,0%	6,01	0,32	8,98	0,00	0,00	0,00	
		3S3S3	9	1	0	1	2	0	0	0,0%	5,09	0,26	7,60	0,00	0,00	0,00
	Semi-Reboques	3E	3	2	1	0	0		0,0%	3,05	0,15	4,60	0,00	0,00	0,00	
		4E	4	2	0	1	0		0,0%	2,30	0,13	3,43	0,00	0,00	0,00	
		5E	5	2	0	0	1		0,0%	2,21	0,12	3,32	0,00	0,00	0,00	
		2I2	4	1	3	0	0		0,0%	7,51	0,38	11,34	0,00	0,00	0,00	
		2I3	5	1	4	0	0		0,0%	9,91	0,50	14,95	0,00	0,00	0,00	
		3I3	6	1	3	1	0		0,0%	9,15	0,47	13,77	0,00	0,00	0,00	
		2S2C2	6	1	3	1	0		0,0%	9,15	0,47	13,77	0,00	0,00	0,00	
		bi-rem 8	8	1	0	2	1	1	0,1%	5,17	0,29	7,70	0,00	0,00	0,00	
		3S2C2	7	1	2	2	0		0,0%	8,40	0,44	12,60	0,00	0,00	0,00	
						Total	1.647	99,5%				3,44	0,18	5,17		
														FV AASHTO		2,71

CÁLCULO DOS FATORES DE VEÍCULO - USACE

Rodovia: RSC-287
Pátio: Candelária

Hipótese:		% Veículos - Máx. Legal		70%		% Veículos - Vazios		25%		% Veículos - Máx. c/ Tol.		5%			
Categoria		Tipo	nº de Eixos	Configuração de Eixos				Volume Médio Diário	Distrib. (%)	Fatores de Veículos - USACE					
				ESR&	ESRD	ETD	ETT			Individual		Total		Excesso	Excesso
										Carregado	Vazio	Carregado	Vazio		
DNIT	Ônibus	2CB	2	1	1	0	0	65	3,9%	3,57	0,15	6,38	0,14	0,01	0,25
		3CB	3	1	0	1	0		0,0%	8,63	0,29	14,83	0,00	0,00	0,00
		4CB	4	1	0	0	1		0,0%	9,58	0,43	16,23	0,00	0,00	0,00
	Cam. Leves	2C	2	1	1	0	0	585	35,5%	3,57	0,15	6,38	1,27	0,05	2,27
	Cam. Médios	3C	3	1	0	1	0	257	15,6%	8,63	0,29	14,83	1,38	0,04	2,31
	Cam. Pesados	4C	4	1	0	0	1	64	3,9%	9,58	0,43	16,23	0,37	0,02	0,63
	Semi-Reboques	2S1	3	1	2	0	0	257	15,6%	6,86	0,28	12,35	1,07	0,04	1,93
		2S2	4	1	1	1	0	64	3,9%	12,12	0,42	20,80	0,47	0,02	0,81
		2S3	5	1	1	0	1	39	2,4%	12,87	0,56	22,21	0,31	0,01	0,53
		3S1	4	1	1	1	0	16	1,0%	12,12	0,42	20,80	0,12	0,00	0,20
		3S2	5	1	0	2	0	39	2,4%	17,38	0,55	29,24	0,41	0,01	0,70
		3S3	6	1	0	1	1	119	7,2%	18,13	0,70	30,65	1,31	0,05	2,21
		3S2S2	7	1	0	3	0	17	1,1%	25,92	0,82	43,66	0,27	0,01	0,46
		3S2C4	9	1	0	4	0	1	0,1%	34,47	1,09	58,08	0,03	0,00	0,05
		2C2	4	1	3	0	0	16	1,0%	10,15	0,42	18,32	0,10	0,00	0,18
	Reboques	2C3	5	1	2	1	0	10	0,6%	15,41	0,55	26,77	0,09	0,00	0,16
		3C2	5	1	2	1	0	10	0,6%	15,41	0,55	26,77	0,09	0,00	0,16
		3C3	6	1	1	2	0	79	4,8%	20,66	0,69	35,21	0,99	0,03	1,69
		3C4	7	1	0	3	0	7	0,5%	25,92	0,82	43,66	0,12	0,00	0,20
		2C4	6	1	3	1	0		0,0%	18,70	0,69	32,74	0,00	0,00	0,00
Especiais	Reboques	3C4	7	1	0	3	0		0,0%	25,92	0,82	43,66	0,00	0,00	0,00
		3L3	6	1	1	2	0		0,0%	20,66	0,69	35,21	0,00	0,00	0,00
		3S3S3	9	1	0	1	2	0	0,0%	27,43	1,11	46,48	0,01	0,00	0,01
	Semi-Reboques	3E	3	2	1	0	0		0,0%	3,65	0,17	6,79	0,00	0,00	0,00
		4E	4	2	0	1	0		0,0%	9,10	0,30	15,23	0,00	0,00	0,00
		5E	5	2	0	0	1		0,0%	9,86	0,45	16,64	0,00	0,00	0,00
		2I2	4	1	3	0	0		0,0%	10,15	0,42	18,32	0,00	0,00	0,00
		2I3	5	1	4	0	0		0,0%	13,44	0,55	24,29	0,00	0,00	0,00
		3I3	6	1	3	1	0		0,0%	18,70	0,69	32,74	0,00	0,00	0,00
		2S2C2	6	1	3	1	0		0,0%	18,70	0,69	32,74	0,00	0,00	0,00
		bi-brem 8	8	1	0	2	1	1	0,1%	26,68	0,97	45,07	0,02	0,00	0,03
		3S2C2	7	1	2	2	0		0,0%	23,95	0,82	41,18	0,00	0,00	0,00
								Total	1.647	99,5%				8,56	0,32
												FV USACE		6,81	

CÁLCULO DO NÚMERO "N" (Solicitações do Tráfego) - PRAÇA DE PEDÁGIO CANDELÁRIA

Rodovia: RSC-287

Pátio: Candelária

Ano de Estudo	Taxa de Crescimento	Fatores de Veículo - FV		Fator Climático Regional - FR	Fator de Pista FP
		Método AASHTO	Método USACE		
2015	3,0%	2,71	6,81	1,00	0,50

Cálculo do Número "N"

ANO	A	VMDc	N - AASHTO		N - USACE	
			Nº Ano	Acumulado	Nº Ano	Acumulado
2015	AE	1.647				
2016	-	1.696	8,39E+05	8,39E+05	2,11E+06	2,11E+06
2017	1	1.747	8,64E+05	8,64E+05	2,17E+06	2,17E+06
2018	2	1.799	8,89E+05	1,75E+06	2,23E+06	4,41E+06
2019	3	1.853	9,16E+05	2,67E+06	2,30E+06	6,71E+06
2020	4	1.909	9,44E+05	3,61E+06	2,37E+06	9,08E+06
2021	5	1.966	9,72E+05	4,59E+06	2,44E+06	1,15E+07
Número N (5 anos):			AASHTO	4,59E+06	USACE	1,15E+07

ANEXO C – Relatórios de classificação do resíduo areia de fundição



ID Cliente: 4115
RELATÓRIO DE ENSAIO
Nº: 38154/28.12
Página 1 de 3

Cliente: FUNDAÇÃO VENÂNCIO AIRES LTDA
 RST 453 - KM 05, nº 220 - Cx. Postal 77
 VENÂNCIO AIRES RS

BATTISTI

Dados de Identificação da Amostra

Identificação: Areia
 Local de Coleta: RST 453 - KM 05, nº 220 - Cx. Postal 77
 Coletador: Empresa Solicitante

Tipo da Amostra: Sólido

Data de Coleta: 18/07/2012

CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS

1. ORIGEM DO RESÍDUO:

O resíduo é originado do processo industrial.

2. AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO RESÍDUO:

2.1 - Inflamabilidade:

A amostra não apresentou a característica inflamabilidade de acordo com os termos referidos na norma.

2.2 - Corrosividade:

A amostra apresentou pH (sol. 5%) igual a 10,07 não apresentando a característica corrosividade de acordo com os termos referidos na norma.

2.3 - Reatividade:

A faixa de pH indicada e os componentes utilizados no processo produtivo não indicam a amostra como sendo reativa.

2.4 - Toxicidade:

A amostra não apresentou a característica toxicidade de acordo com os termos referidos na norma.

2.5 - Patogenicidade:

O resíduo não apresentou a característica patogenicidade de acordo com os termos referidos na norma.

3. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS:

3.1 - Dados da Lixiviação

<u>PARÂMETROS</u>	<u>RESULTADOS</u>
pH Inicial	10,07
pH Final	1,3
Solução Número	1
Tempo de Lixiviação	18 hs
Volume Líquido	180 ml





Liberado e Assinado Eletronicamente E6B9C15E

- A ECONSULTING garante que todas as análises foram executadas dentro do prazo de validade de cada parâmetro, segundo o PO 046- Manual de coleta de amostras.

Todas as análises realizadas em PC: nra/nra - Mana de trabalho das análises e estão à disposição para serem solicitadas qualquer momento pelo interessado.



ORIGINAL

ID Cliente: 4115

RELATÓRIO DE ENSAIO

Nº: 38154/28.12

Página 2 de 3

Cliente: FUNDIÇÃO VENÂNCIO AIRES LTDA
RST 453 - KM 05, nº 220 - Cx. Postal 77
VENÂNCIO AIRES RS

BATTISTI

Dados de Identificação da Amostra

Identificação: Areia
Local de Coleta: RST 453 - KM 05, nº 220 - Cx. Postal 77
Coletador: Empresa Solicitante Tipo da Amostra: Sólido Data de Coleta: 18/07/2012

3.2 - Ensaio de Lixiviação (NBR 10005)

PARÂMETROS	UNIDADE	RESULTADOS	LIMITE DE DETECÇÃO	LIMITE MÁXIMO (mg/L)
Arsênio	µg/L	< 1,5	1,5	1,0
Bário	mg/L	< 0,5	0,5	70
Cádmio	mg/L	< 0,005	0,005	0,5
Chumbo	mg/L	< 0,005	0,005	1,0
Cromo Total	mg/L	< 0,003	0,003	5,0
Mercurio	µg/L	< 0,05	0,05	0,1
Prata	mg/L	< 0,0015	0,0015	5,0
Fluoreto	mg/L	0,032	Zero	150
Selênio	µg/L	< 2,0	2,0	1,0

3.3 - Ensaio de Solubilização (NBR 10006)

PARÂMETROS	UNIDADE	RESULTADOS	LIMITE DE DETECÇÃO	LIMITE MÁXIMO (mg/L)
Alumínio	mg/L	27,01	0,2	0,2
Arsênio	µg/L	< 1,5	1,5	0,01
Bário	mg/L	< 0,5	0,5	0,7
Cádmio	mg/L	< 0,005	0,005	0,005
Sódio	mg/L	147,6	0,01	200
Cobre	mg/L	0,026	0,0015	2,0
Zinco	mg/L	0,017	0,0015	5,0
Chumbo	mg/L	< 0,005	0,005	0,01
Cromo Total	mg/L	< 0,003	0,003	0,05
Ferro	mg/L	7,778	0,03	0,3
Manganês	mg/L	0,057	0,0015	0,1
Mercurio	µg/L	< 0,05	0,05	0,001
Fenol	mg/L	< 0,001	0,001	0,01
Nitrato	mg/L	0,808	0,04	10,0
Cianeto	mg/L	< 0,0003	0,0003	0,07
Sulfato	mg/L	< 1,0	1,0	250,0
Surfactantes	mg/L	< 0,01	0,01	0,5
Cloreto	mg/L	83,31	Zero	250,0
Fluoreto	mg/L	Zero	Zero	1,5
Prata	mg/L	< 0,0015	0,0015	0,05
Selênio	µg/L	< 2,0	2,0	0,01

Liberado e Assinado Eletronicamente

E6B9C15E

- A ECONSULTING garante que todas as análises foram executadas dentro do prazo de validade de cada parâmetro, segundo o PO 046- Manual de coleta de amostras.
Todas estas datas constam no PG 008/006 - Mapa de trabalho das análises e estão à disposição para serem solicitadas qualquer momento pelo interessado.
- Os resultados contidos neste documento têm significação restrita, aplica-se exclusivamente à amostra ensaiada e somente poderão ser reproduzidos na íntegra.



Viamão, 09/08/2012

(51) 3435.2000
www.econsulting.com.br

Econsulting Projetos e Consultoria Ambiental Sociedade Simples Ltda.
Rua Torino, 161 - Santa Isabel - Viamão - RS / Cep: 94480-795

ID Cliente: 4115

RELATÓRIO DE ENSAIO

Nº: 38154/28.12

Página 3 de 3

Cliente: FUNDIÇÃO VENÂNCIO AIRES LTDA
 RST 453 - KM 05, nº 220 - Cx. Postal 77
 VENÂNCIO AIRES RS

BATTISTI

Dados de Identificação da Amostra

Identificação: Areia

Local de Coleta: RST 453 - KM 05, nº 220 - Cx. Postal 77

Coletador: Empresa Solicitante

Tipo da Amostra: Sólido

Data de Coleta: 18/07/2012

4. AVALIAÇÃO QUÍMICA DO RESÍDUO:**4.1 - Composição Química:****PARÂMETROS**

Matéria Orgânica
 Cinzas
 Umidade
 pH

RESULTADOS

5,77	%
91,1	%
3,13	%
10,07	-

5. CLASSIFICAÇÃO DO RESÍDUO SEGUNDO A NBR 10004:

De acordo com os parâmetros analisados a amostra foi classificada como:
RESÍDUO NÃO INERTE- CLASSE IIA.


 Eng.º Edu Ricardo Beltrame
 Responsável Técnico
 CRQ - 05301723


 Eng.º Charles Beltrame
 Responsável Técnico Substituto
 CRQ - 05302222

ORIGINAL

Liberado e Assinado Eletronicamente

E6B9C15E

- A ECONSULTING garante que todas as análises foram executadas dentro do prazo de validade de cada parâmetro, segundo o PO 046- Manual de coleta de amostras.
 Todas estas datas constam no PG 008/006 - Mapa de trabalho das análises e estão à disposição para serem solicitadas qualquer momento pelo interessado.
 - Os resultados contidos neste documento têm significação restrita, aplica-se exclusivamente à amostra ensaiada e somente poderão ser reproduzidos na íntegra.

Viamão, 09/08/2012

(51) 3435.2000
 www.econsulting.com.br

Econsulting Projetos e Consultoria Ambiental Sociedade Simples Ltda.
 Rua Torino, 161 - Santa Isabel - Viamão - RS / Cep: 94480-795

LCR 5491/13 (página 1 de 5)

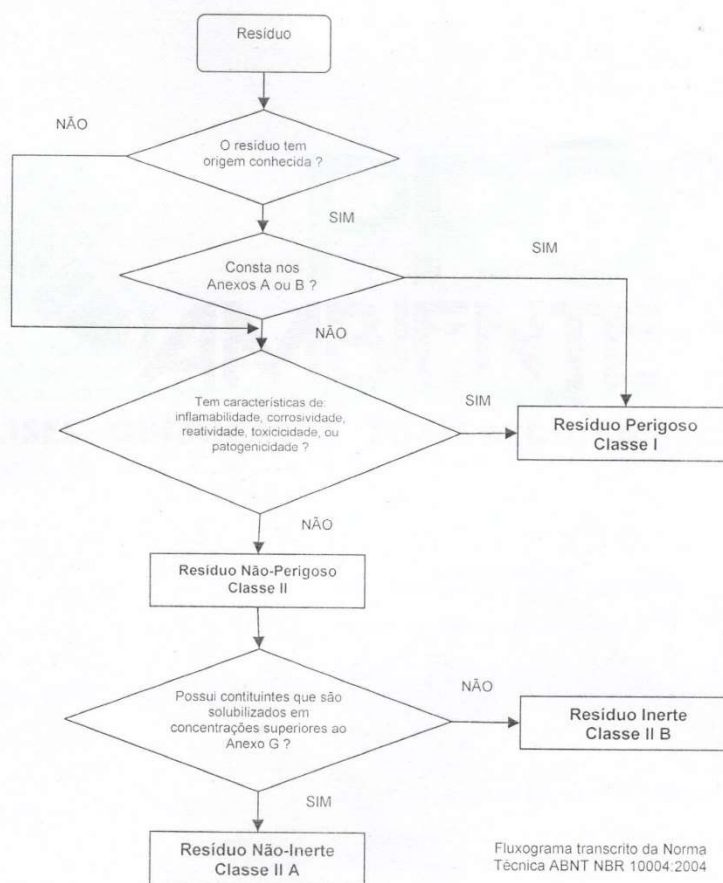
Porto Alegre, 10 de Julho de 2013.

LAUDO TÉCNICO DE CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUO SÓLIDO

1 *Objetivo*

Classificar resíduo sólido quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente, aplicando para tal a Norma Técnica ABNT NBR 10004:2004.

2 *Metodologia de Caracterização e Classificação de Resíduos*






LCR 5491/13 (página 2 de 5)

3 Informações sobre o Resíduo

3.1 Empresa Geradora e Dados Cadastrais

Razão Social: **FUNDAÇÃO VENÂNCIO AIRES - FAIRES**

C.N.P.J. : 90.689.118/0001-61

Endereço: Rodovia RSC-453, km 5

Município / Estado: Venâncio Aires / RS

3.2 Denominação do Resíduo

AREIA VERDE – M-3

3.3 Processo Gerador, Matérias-Primas e Insumos Envolvidos

Trata-se de resíduo gerado na fundição de peças. É composto por areia, carvão ativado e bentonita.

4 Enquadramento como Resíduo Perigoso de Fontes Específicas e Não-Específicas

De acordo com a natureza e a origem do resíduo, o mesmo não é enquadrável nos Anexos A e B da Norma Técnica ABNT NBR 10.004:2004.

5 Amostragem

5.1 Data da Coleta: 12.06.2013

5.2 Data do Recebimento da Amostra no Laboratório: 13.06.2013 (Registro 5491)

5.3 Segregação, Forma de Acondicionamento e Armazenamento do Resíduo no Gerador

Segundo o gerador, armazenado em bag's, sobre piso impermeável, em prédio coberto.

5.4 Aspecto da Amostra

Sólido, homogêneo, arenoso, predominantemente preto e com odor característico.

5.5 Procedimento de Amostragem

Coletada amostra composta, diretamente no ponto de descarte do processo.

5.6 Responsável Técnico pela Amostragem

Juir Luiz Hansel – CRES RS 039956.

LCR 5491/13 (página 3 de 5)

6 *Análises de Composição Química do Resíduo*

Parâmetros	Unidades	Resultados da Amostra
pH (mistura 1:1 em água)	-	7,4
Umidade	(%)	0,1
Matéria Orgânica	(%)	1,5
Cinzas	(%)	98,4
Óleos e Graxas (base seca)	(%)	0,2
Benzeno (base seca)	(mg/kg)	Não Detectado
Tolueno (base seca)	(mg/kg)	Não Detectado
Xilenos (base seca)	(mg/kg)	Não Detectado
Etilbenzeno (base seca)	(mg/kg)	Não Detectado
Estireno (base seca)	(mg/kg)	Não Detectado
Sulfeto (base seca)	(mg/kg)	Não Detectado
Cianeto (base seca)	(mg/kg)	Não Detectado

7 *Avaliação de Corrosividade*

A mistura da amostra de resíduo com água, na proporção de 1:1 em peso, apresentou pH igual a 7,4, caracterizando caráter alcalino discreto. O pH não se insere na faixa alcalina que indica corrosividade (pH acima de 12,5), conforme o item 4.2.1.2 da Norma Técnica ABNT NBR 10004:2004.

8 *Avaliação de Reatividade*

A amostra do resíduo não apresentou nenhuma das propriedades que conferem reatividade ao mesmo, conforme o item 4.2.1.3 da Norma Técnica ABNT NBR 10004:2004.

9 *Avaliação de Inflamabilidade*

A amostra do resíduo não apresentou nenhuma das propriedades que conferem inflamabilidade ao mesmo, conforme o item 4.2.1.1 da Norma Técnica ABNT NBR 10004:2004.

10 *Avaliação de Patogenicidade*

A amostra do resíduo não apresentou nenhuma das propriedades que conferem patogenicidade ao mesmo, conforme o item 4.2.1.5 da Norma Técnica ABNT NBR 10004:2004.



LCR 5491/13 (página 4 de 5)

11 Avaliação de Toxicidade

11.1 Presença de Substâncias que Conferem Periculosidade ao Resíduo

A amostra do resíduo não apresentou concentração significativa de substâncias ou elementos que conferem periculosidade aos resíduos, listados no Anexo C da Norma Técnica ABNT NBR 10004:2004.

11.2 Presença de Substâncias Tóxicas e Agudamente Tóxicas

A amostra do resíduo não é constituída por restos de embalagens, nem por materiais resultantes de derramamentos, nem por produtos fora de especificação ou de validade. Assim, não é enquadrável como resíduo que contém substâncias agudamente tóxicas (Anexo D da Norma Técnica ABNT NBR 10004:2004) ou substâncias tóxicas (Anexo E da Norma Técnica ABNT NBR 10004:2004).

11.3 Resultados do Ensaio de Lixiviação (conforme a NBR 10.005)

Parâmetros	Unidades	Resultados da Amostra	Limites Máximos (NBR-10.004)
<i>Inorgânicos</i>			
Arsênio	(mg/L)	ND*	1,0
Bário	(mg/L)	ND*	70,0
Cádmio	(mg/L)	ND*	0,5
Chumbo	(mg/L)	ND*	1,0
Cromo Total	(mg/L)	ND*	5,0
Mercurio	(mg/L)	ND*	0,1
Fluoreto	(mg/L)	12,3	150,0
Prata	(mg/L)	ND*	5,0
Selênio	(mg/L)	ND*	1,0

ND* = Não Detectado

LCR 5491/13 (página 5 de 5)

12 Resultados do Ensaio de Solubilização (conforme a NBR 10.006)

Parâmetros	Unidades	Resultados da Amostra	Limites Máximos (NBR-10.004)
Fenóis Totais	(mg/L)	ND*	0,001
Mercurio	(mg/L)	ND*	0,001
Arsênio	(mg/L)	ND*	0,01
Bário	(mg/L)	ND*	0,7
Cádmio	(mg/L)	ND*	0,005
Chumbo	(mg/L)	ND*	0,01
Cromo Total	(mg/L)	ND*	0,05
Alumínio	(mg/L)	ND*	0,2
Ferro	(mg/L)	42,1	0,3
Manganês	(mg/L)	0,1	0,1
Sódio	(mg/L)	115,5	200,0
Zinco	(mg/L)	0,2	5,0
Cobre	(mg/L)	ND*	2,0
Prata	(mg/L)	ND*	0,05
Selênio	(mg/L)	ND*	0,01
Cianeto	(mg/L)	ND*	0,07
Fluoreto	(mg/L)	3,0	1,5
Nitrato	(mg/L)	ND*	10,0
Cloreto	(mg/L)	48,0	250,0
Sulfato	(mg/L)	19,0	250,0
Surfactantes	(mg/L)	ND*	0,5

ND* = Não Detectado

13 Parecer Final de Classificação

De acordo com as prescrições da Norma Técnica ABNT NBR 10004:2004, o resíduo objeto deste Laudo Técnico é classificado como RESÍDUO NÃO-INERTE - CLASSE II-A (ver item 12).


Eng. Químico Marcos dos Santos Aidos
 CREA RS 81632
 CRQ 5ª Região 05301850

P.S.: O presente laudo é válido enquanto persistirem a origem, a natureza e a composição química do resíduo. Quaisquer alterações tecnológicas no processo de geração e/ou mudanças nas matérias-primas e insumos envolvidos no processo gerador, a classificação deverá ser repetida, de forma a garantir a sua confiabilidade técnica.

APÊNDICE A – Relatórios *Everstress* (dimensionamento de pavimentos novos)

Layered Elastic Analysis by Everstress© 5.0

Title: 80% Fresado + 20% Areia de Fundicao + 3% Cimento (23 cm)

No of Layers: 4

No of Loads: 2

No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1	.30	4.000	3184.00			
2	.35	23.000	730.08	730.08	894.70	.350
3	.45	*****	50.00			
4	.45		50.00			
Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)	
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.790	
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.790	

No of Iteration: 3

Maximum Error in Modulus: .0

Location No: 1

X-Position (cm): .000

Y-Position (cm): .000

Normal Stresses						
Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)
.000	1	-1322.01	-1470.55	-560.00	.00	.00
3.999	1	-6.46	-8.67	-497.25	.00	30.93
4.000	1	-6.15	-8.33	-497.22	.00	30.94
15.500	2	48.23	73.42	-171.07	.00	41.00
27.000	2	255.29	311.33	-39.46	.00	5.26

Normal Strains and Deflections						
Z-Position (cm)	Layer	Exx (10^-6)	Eyy (10^-6)	Ezz (10^-6)	Ux (microns)	Uy (microns)
.000	1	-223.89	-284.53	87.24	18.586	.000
3.999	1	45.64	44.74	-154.75	7.190	.000
4.000	1	45.70	44.81	-154.80	7.187	.000
15.500	2	112.88	159.45	-292.63	-11.356	.000
27.000	2	219.34	322.96	-325.68	-33.238	.000

Principal Stresses and Strains						
Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10^-6)	E2 (10^-6)
.000	1	-1470.55	-1322.01	-560.00	-284.53	-223.88
3.999	1	-499.19	-8.67	-4.52	-155.54	44.74
4.000	1	-499.17	-8.33	-4.21	-155.59	44.81
15.500	2	-178.48	55.65	73.42	-306.35	126.59
27.000	2	-39.55	255.39	311.33	-325.86	219.52

Location No: 2

X-Position (cm): 15.000

Y-Position (cm): .000

Normal Stresses						
Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)
.000	1	-97.43	-877.39	.00	.00	.00
3.999	1	-780.19	-210.09	-112.59	.00	.00
4.000	1	-780.36	-209.93	-112.61	.00	.00
15.500	2	18.31	83.59	-109.84	.00	.00
27.000	2	257.67	327.89	-41.21	.00	.00

Normal Strains and Deflections						
Z-Position (cm)	Layer	Exx (10^-6)	Eyy (10^-6)	Ezz (10^-6)	Ux (microns)	Uy (microns)
.000	1	52.07	-266.38	91.85	.000	.000
3.999	1	-214.63	18.13	57.94	.000	.000
4.000	1	-214.70	18.20	57.94	.000	.000
15.500	2	37.66	158.38	-199.30	.000	.000
27.000	2	215.51	345.34	-337.16	.000	.000

Principal Stresses and Strains						
Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10^-6)	E2 (10^-6)
.000	1	-877.39	-97.43	.00	-266.38	52.07
3.999	1	-780.19	-210.09	-112.59	-214.63	18.13
4.000	1	-780.36	-209.93	-112.61	-214.70	18.20
15.500	2	-109.84	18.31	83.59	-199.30	37.66
27.000	2	-41.21	257.67	327.89	-337.16	215.51

Layered Elastic Analysis by Everstress® 5.0

Title: 60% Fresado + 40% Po de Brita + 3% Cimento (26 cm)

No of Layers: 4

No of Loads: 2

No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1	.30	4.000	3184.00			
2	.35	26.000	701.72	701.72	802.72	.330
3	.45	*****	50.00			
4	.45		50.00			
Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)	
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.790	
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.790	

No of Iteration: 3

Maximum Error in Modulus: .0

Location No: 1 X-Position (cm): .000 Y-Position (cm): .000

Normal Stresses						
Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)
.000	1	-1291.92	-1426.48	-560.00	.00	.00
3.999	1	19.30	22.31	-498.18	.00	26.52
4.000	1	19.61	22.65	-498.15	.00	26.53
17.000	2	37.27	60.44	-157.05	.00	38.85
30.000	2	217.77	263.71	-34.31	.00	4.71

Normal Strains and Deflections						
Z-Position (cm)	Layer	Exx (10^-6)	Eyy (10^-6)	Ezz (10^-6)	Ux (microns)	Uy (microns)
.000	1	-218.58	-273.53	80.25	17.039	.000
3.999	1	50.90	52.13	-160.38	6.913	.000
4.000	1	50.96	52.20	-160.44	6.911	.000
17.000	2	101.30	145.87	-272.53	-10.447	.000
30.000	2	195.93	284.30	-289.05	-30.535	.000

Principal Stresses and Strains						
Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10^-6)	E2 (10^-6)
.000	1	-1426.48	-1291.92	-560.00	-273.53	-218.58
3.999	1	-499.53	20.66	22.31	-160.94	51.45
4.000	1	-499.51	20.97	22.65	-160.99	51.52
17.000	2	-164.52	44.75	60.44	-286.92	115.69
30.000	2	-34.40	217.86	263.71	-289.22	196.10

Location No: 2 X-Position (cm): 15.000 Y-Position (cm): .000

Normal Stresses						
Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)
.000	1	-28.37	-813.11	.00	.00	.00
3.999	1	-786.32	-191.99	-117.05	.00	.00
4.000	1	-786.51	-191.84	-117.07	.00	.00
17.000	2	11.60	68.08	-111.16	.00	.00
30.000	2	228.08	280.88	-36.21	.00	.00

Normal Strains and Deflections						
Z-Position (cm)	Layer	Exx (10^-6)	Eyy (10^-6)	Ezz (10^-6)	Ux (microns)	Uy (microns)
.000	1	67.70	-252.70	79.28	.000	.000
3.999	1	-217.84	24.82	55.41	.000	.000
4.000	1	-217.91	24.88	55.41	.000	.000
17.000	2	38.02	146.68	-198.16	.000	.000
30.000	2	202.99	304.57	-305.45	.000	.000

Principal Stresses and Strains						
Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10^-6)	E2 (10^-6)
.000	1	-813.11	-28.36	.00	-252.70	67.70
3.999	1	-786.32	-191.99	-117.05	-217.84	24.82
4.000	1	-786.51	-191.84	-117.07	-217.91	24.88
17.000	2	-111.16	11.60	68.08	-198.16	38.02
30.000	2	-36.21	228.08	280.87	-305.45	202.99

Layered Elastic Analysis by Everstress® 5.0

Title: 60% Fresado + 40% Po de Brita + 3% Cimento (23 cm)

No of Layers: 4 No of Loads: 2

No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1	.30	4.000	3184.00			
2	.35	23.000	670.79	670.79	802.72	.330
3	.45	*****	50.00			
4	.45		50.00			

Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.790
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.790

No of Iteration: 3

Maximum Error in Modulus: .0

Location No: 1 X-Position (cm): .000 Y-Position (cm): .000

Normal Stresses							
Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-1367.41	-1522.30	-560.00	.00	.00	.00
3.999	1	46.82	50.41	-493.42	.00	30.96	.00
4.000	1	47.16	50.78	-493.39	.00	30.96	.00
15.500	2	46.91	72.10	-170.44	.00	40.38	.00
27.000	2	244.68	299.41	-40.91	.00	5.55	.00

Normal Strains and Deflections							
Z-Position (cm)	Layer	Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.000	1	-233.27	-296.51	96.39	18.800	.000	657.160
3.999	1	56.44	57.91	-164.13	6.789	.000	655.587
4.000	1	56.51	57.99	-164.19	6.786	.000	655.586
15.500	2	121.24	171.94	-316.18	-12.251	.000	605.973
27.000	2	229.88	340.04	-344.88	-34.842	.000	572.345

Principal Stresses and Strains							
Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-1522.30	-1367.41	-560.00	-296.51	-233.27	96.39
3.999	1	-495.18	48.59	50.41	-164.85	57.17	57.91
4.000	1	-495.16	48.92	50.78	-164.91	57.23	57.99
15.500	2	-177.70	54.17	72.10	-330.79	135.85	171.94
27.000	2	-41.02	244.78	299.41	-345.10	230.10	340.04

Location No: 2 X-Position (cm): 15.000 Y-Position (cm): .000

Normal Stresses							
Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-76.95	-902.90	.00	.00	.00	.00
3.999	1	-800.40	-182.17	-116.58	.00	.00	.00
4.000	1	-800.59	-182.00	-116.59	.00	.00	.00
15.500	2	17.58	82.11	-110.90	.00	.00	.00
27.000	2	247.00	315.57	-42.76	.00	.00	.00

Normal Strains and Deflections							
Z-Position (cm)	Layer	Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.000	1	60.91	-276.32	92.32	.000	.000	636.745
3.999	1	-223.24	29.19	55.97	.000	.000	639.881
4.000	1	-223.31	29.26	55.96	.000	.000	639.882
15.500	2	41.22	171.10	-217.34	.000	.000	623.339
27.000	2	225.88	363.87	-357.28	.000	.000	592.379

Principal Stresses and Strains							
Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-902.90	-76.95	.00	-276.32	60.91	92.32
3.999	1	-800.40	-182.17	-116.58	-223.24	29.19	55.97
4.000	1	-800.59	-182.00	-116.59	-223.31	29.26	55.96
15.500	2	-110.90	17.58	82.11	-217.34	41.22	171.10
27.000	2	-42.76	247.00	315.57	-357.28	225.88	363.87

APÊNDICE B – Relatórios *Everstress* (dimensionamento considerando as espessuras encontradas no método DNIT)

Layered Elastic Analysis by Everstress® 5.0

Title: 80% Fresado + 20% Areia de Fundicao + 3% Cimento (23cm - DNIT)						
No of Layers: 4		No of Loads: 2		No of X-Y Evaluation Points: 2		
Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1	.30	5.000	3184.00			
2	.35	23.000	601.35	601.35	894.70	.350
3	.45	*****	50.00			
4	.45		50.00			
Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)	
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.790	
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.790	
No of Iteration: 3			Maximum Error in Modulus: .0			
Location No: 1		X-Position (cm): .000		Y-Position (cm): .000		
Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses				
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)
						Sxy (kPa)
.000	1	-1382.32	-1550.40	-560.00	.00	.00
4.999	1	265.05	311.54	-433.87	.00	32.93
5.000	1	265.37	311.90	-433.84	.00	32.94
16.500	2	49.50	74.28	-148.57	.00	38.87
28.000	2	217.29	265.81	-39.78	.00	5.61
Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections				
		Exx (10^-6)	Eyy (10^-6)	Ezz (10^-6)	Ux (microns)	Uy (microns)
						Uz (microns)
.000	1	-235.30	-303.93	100.44	18.305	.000
4.999	1	94.77	113.75	-190.59	3.030	.000
5.000	1	94.83	113.83	-190.65	3.027	.000
16.500	2	125.56	181.18	-319.11	-14.137	.000
28.000	2	229.79	338.70	-347.32	-35.523	.000
Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains				
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10^-6)	E2 (10^-6)
						E3 (10^-6)
.000	1	-1550.40	-1382.31	-560.00	-303.93	-235.30
4.999	1	-435.42	266.60	311.54	-191.22	95.40
5.000	1	-435.39	266.92	311.90	-191.28	95.47
16.500	2	-155.93	56.86	74.28	-335.62	142.07
28.000	2	-39.90	217.41	265.81	-347.60	230.06
Location No: 2		X-Position (cm): 15.000		Y-Position (cm): .000		
Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses				
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)
						Sxy (kPa)
.000	1	-122.97	-937.79	.00	.00	.00
4.999	1	-649.07	28.12	-145.22	.00	.00
5.000	1	-649.19	28.30	-145.23	.00	.00
16.500	2	28.48	83.04	-107.87	.00	.00
28.000	2	225.10	282.56	-41.92	.00	.00
Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections				
		Exx (10^-6)	Eyy (10^-6)	Ezz (10^-6)	Ux (microns)	Uy (microns)
						Uz (microns)
.000	1	49.74	-282.95	99.95	.000	.000
4.999	1	-192.82	83.67	12.90	.000	.000
5.000	1	-192.88	83.74	12.89	.000	.000
16.500	2	61.82	184.29	-244.29	.000	.000
28.000	2	234.27	363.26	-365.18	.000	.000
Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains				
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10^-6)	E2 (10^-6)
						E3 (10^-6)
.000	1	-937.79	-122.97	.00	-282.95	49.74
4.999	1	-649.07	-145.22	28.12	-192.82	12.90
5.000	1	-649.19	-145.23	28.30	-192.88	12.89
16.500	2	-107.87	28.48	83.04	-244.29	61.82
28.000	2	-41.92	225.10	282.56	-365.18	234.27

Layered Elastic Analysis by Everstress® 5.0

Title: 60% Fresado + 40% Po de Brita + 3% Cimento (23 cm - DNIT)

No of Layers: 4

No of Loads: 2

No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1	.30	5.000	3184.00			
2	.35	23.000	565.41	565.40	802.72	.330
3	.45	*****	50.00			
4	.45		50.00			

Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.790
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.790

No of Iteration: 3

Maximum Error in Modulus: .0

Location No: 1

X-Position (cm): .000

Y-Position (cm): .000

Normal Stresses						
Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)
.000	1	-1415.00	-1589.38	-560.00	.00	.00
4.999	1	308.50	361.70	-429.28	.00	32.84
5.000	1	308.83	362.08	-429.25	.00	32.85
16.500	2	48.08	72.78	-148.01	.00	38.45
28.000	2	210.14	257.73	-40.83	.00	5.83

Normal Strains and Deflections						
Z-Position (cm)	Layer	Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)
.000	1	-241.89	-313.09	107.20	18.509	.000
4.999	1	103.26	124.98	-197.97	2.598	.000
5.000	1	103.32	125.07	-198.03	2.595	.000
16.500	2	131.61	190.58	-336.60	-14.879	.000
28.000	2	237.40	351.02	-361.84	-36.735	.000

Principal Stresses and Strains						
Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)
.000	1	-1589.38	-1415.00	-560.00	-313.09	-241.89
4.999	1	-430.74	309.95	361.70	-198.57	103.85
5.000	1	-430.71	310.29	362.08	-198.63	103.92
16.500	2	-155.28	55.35	72.78	-353.96	148.97
28.000	2	-40.96	210.28	257.73	-362.16	237.73

Location No: 2

X-Position (cm): 15.000

Y-Position (cm): .000

Normal Stresses						
Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)
.000	1	-115.78	-961.47	.00	.00	.00
4.999	1	-653.18	58.28	-147.70	.00	.00
5.000	1	-653.31	58.48	-147.71	.00	.00
16.500	2	27.55	81.39	-108.64	.00	.00
28.000	2	217.95	274.20	-43.06	.00	.00

Normal Strains and Deflections						
Z-Position (cm)	Layer	Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)
.000	1	54.23	-291.06	101.50	.000	.000
4.999	1	-196.72	93.76	9.66	.000	.000
5.000	1	-196.78	93.84	9.66	.000	.000
16.500	2	65.59	194.15	-259.58	.000	.000
28.000	2	242.40	376.70	-380.82	.000	.000

Principal Stresses and Strains						
Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)
.000	1	-961.47	-115.78	.00	-291.06	54.23
4.999	1	-653.18	-147.70	58.28	-196.72	9.66
5.000	1	-653.31	-147.71	58.48	-196.78	9.66
16.500	2	-108.64	27.55	81.39	-259.58	65.59
28.000	2	-43.06	217.95	274.20	-380.82	242.40

APÊNDICE C – Relatórios *Everstress* (dimensionamento considerando a camada de rachão)

Layered Elastic Analysis by Everstress® 5.0

Title: 80% Fresado + 20% Areia de Fundicao + 3% Cimento (21 cm + rachao)						
No of Layers: 5		No of Loads: 2		No of X-Y Evaluation Points: 2		
Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1	.30	4.000	3184.00	937.11	894.70	.350
2	.35	21.000	937.11			
3	.35	15.000	150.00			
4	.45	*****	50.00			
5	.45		50.00			
Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)		Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00		20500.0	560.00	10.790
2	30.00	.00		20500.0	560.00	10.790
No of Iteration: 3			Maximum Error in Modulus: .0			
Location No: 1		X-Position (cm): .000		Y-Position (cm): .000		
Normal Stresses						
Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)
.000	1	-1172.42	-1301.53	-560.00	.00	.00
3.999	1	-126.53	-140.21	-507.15	.00	28.60
4.000	1	-126.29	-139.94	-507.12	.00	28.60
14.500	2	31.73	56.73	-197.33	.00	40.65
40.000	3	31.69	38.20	-26.02	.00	4.00
Normal Strains and Deflections						
Z-Position (cm)	Layer	Exx (10^-6)	Eyy (10^-6)	Ezz (10^-6)	Ux (microns)	Uy (microns)
.000	1	-192.83	-245.54	57.22	16.919	.000
3.999	1	21.25	15.67	-134.15	7.615	.000
4.000	1	21.30	15.73	-134.19	7.613	.000
14.500	2	86.38	122.38	-243.61	-7.472	.000
40.000	3	182.86	241.45	-336.56	-29.720	.000
Principal Stresses and Strains						
Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10^-6)	E2 (10^-6)
.000	1	-1301.53	-1172.42	-560.00	-245.54	-192.83
3.999	1	-509.28	-140.21	-124.40	-135.02	15.67
4.000	1	-509.26	-139.94	-124.15	-135.06	15.73
14.500	2	-204.33	38.73	56.73	-253.70	96.46
40.000	3	-26.30	31.97	38.20	-339.05	185.35
Location No: 2		X-Position (cm): 15.000		Y-Position (cm): .000		
Normal Stresses						
Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)
.000	1	-119.13	-775.81	.00	.00	.00
3.999	1	-701.92	-257.30	-101.81	.00	.00
4.000	1	-702.06	-257.18	-101.83	.00	.00
14.500	2	-6.87	67.18	-119.74	.00	.00
40.000	3	35.44	41.12	-27.74	.00	.00
Normal Strains and Deflections						
Z-Position (cm)	Layer	Exx (10^-6)	Eyy (10^-6)	Ezz (10^-6)	Ux (microns)	Uy (microns)
.000	1	35.68	-232.43	84.32	.000	.000
3.999	1	-186.62	-5.08	58.40	.000	.000
4.000	1	-186.67	-5.03	58.40	.000	.000
14.500	2	12.30	118.98	-150.30	.000	.000
40.000	3	205.04	256.16	-363.58	.000	.000
Principal Stresses and Strains						
Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10^-6)	E2 (10^-6)
.000	1	-775.81	-119.13	.00	-232.43	35.68
3.999	1	-701.92	-257.30	-101.81	-186.62	-5.08
4.000	1	-702.06	-257.18	-101.83	-186.67	-5.03
14.500	2	-119.74	-6.87	67.18	-150.30	12.30
40.000	3	-27.74	35.44	41.12	-363.58	205.04

Layered Elastic Analysis by Everstress® 5.0

Title: 80% Fresado + 20% Areia de Fundicao + 3% Cimento (16 cm + rachao)

No of Layers: 5

No of Loads: 2

No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1	.30	4.000	3184.00			
2	.35	16.000	906.99	906.99	894.70	.350
3	.35	15.000	150.00			
4	.45	*****	50.00			
5	.45		50.00			

Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.790
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.790

No of Iteration: 3

Maximum Error in Modulus: .0

Location No: 1		X-Position (cm): .000		Y-Position (cm): .000		
----------------	--	-----------------------	--	-----------------------	--	--

Normal Stresses							
Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-1292.92	-1462.90	-560.00	.00	.00	.00
3.999	1	-104.19	-120.28	-497.65	.00	36.21	.00
4.000	1	-103.91	-119.97	-497.62	.00	36.22	.00
12.000	2	49.14	79.39	-228.24	.00	42.68	.00
35.000	3	40.21	49.72	-33.93	.00	5.39	.00

Normal Strains and Deflections							
Z-Position (cm)	Layer	Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.000	1	-215.47	-284.87	83.78	19.963	.000	654.262
3.999	1	25.50	18.93	-135.15	7.392	.000	653.006
4.000	1	25.55	19.00	-135.19	7.389	.000	653.004
12.000	2	111.62	156.64	-301.25	-9.498	.000	625.218
35.000	3	231.21	316.84	-436.05	-37.441	.000	530.773

Principal Stresses and Strains							
Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-1462.90	-1292.92	-560.00	-284.87	-215.47	83.78
3.999	1	-500.95	-120.28	-100.89	-136.49	18.93	26.85
4.000	1	-500.92	-119.97	-100.61	-136.54	19.00	26.90
12.000	2	-234.66	55.56	79.39	-310.80	121.18	156.64
35.000	3	-34.32	40.60	49.72	-439.56	234.72	316.84

Location No: 2		X-Position (cm): 15.000		Y-Position (cm): .000		
----------------	--	-------------------------	--	-----------------------	--	--

Normal Stresses							
Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-219.36	-940.47	.00	.00	.00	.00
3.999	1	-706.22	-250.44	-98.02	.00	.00	.00
4.000	1	-706.33	-250.28	-98.03	.00	.00	.00
12.000	2	1.21	95.64	-117.80	.00	.00	.00
35.000	3	44.61	53.60	-36.26	.00	.00	.00

Normal Strains and Deflections							
Z-Position (cm)	Layer	Exx (10 ⁻⁶)	Eyy (10 ⁻⁶)	Ezz (10 ⁻⁶)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.000	1	19.72	-274.71	109.28	.000	.000	642.838
3.999	1	-188.97	-2.88	59.35	.000	.000	646.391
4.000	1	-189.02	-2.82	59.34	.000	.000	646.392
12.000	2	9.89	150.44	-167.25	.000	.000	639.992
35.000	3	256.92	337.86	-470.87	.000	.000	548.350

Principal Stresses and Strains							
Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10 ⁻⁶)	E2 (10 ⁻⁶)	E3 (10 ⁻⁶)
.000	1	-940.47	-219.36	.00	-274.71	19.72	109.28
3.999	1	-706.22	-250.44	-98.02	-188.97	-2.88	59.35
4.000	1	-706.33	-250.28	-98.03	-189.02	-2.82	59.34
12.000	2	-117.80	1.21	95.64	-167.25	9.89	150.44
35.000	3	-36.26	44.61	53.60	-470.87	256.92	337.86

Layered Elastic Analysis by Everstress® 5.0

Title: 60% Fresado + 40% Po de Brita + 3% Cimento (26 cm + rachao)

No of Layers: 5

No of Loads: 2

No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1	.30	4.000	3184.00	840.32	802.72	.330
2	.35	26.000	840.32			
3	.35	15.000	150.00			
4	.45	*****	50.00			
5	.45		50.00			
Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)	
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.790	
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.790	

No of Iteration: 3

Maximum Error in Modulus: .0

Location No: 1		X-Position (cm): .000		Y-Position (cm): .000			
Normal Stresses							
Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-1147.17	-1258.77	-560.00	.00	.00	.00
3.999	1	-63.44	-66.55	-507.33	.00	22.18	.00
4.000	1	-63.18	-66.27	-507.30	.00	22.19	.00
17.000	2	19.20	41.65	-169.18	.00	37.11	.00
45.000	3	27.16	32.17	-21.51	.00	3.27	.00
Normal Strains and Deflections							
Z-Position (cm)	Layer	Exx (10^-6)	Eyy (10^-6)	Ezz (10^-6)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.000	1	-188.93	-234.49	50.81	14.767	.000	531.518
3.999	1	34.15	32.88	-147.09	6.906	.000	529.394
4.000	1	34.20	32.94	-147.13	6.904	.000	529.393
17.000	2	75.97	112.03	-226.67	-7.051	.000	486.182
45.000	3	156.21	201.24	-281.81	-25.432	.000	416.300
Principal Stresses and Strains							
Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10^-6)	E2 (10^-6)	E3 (10^-6)
.000	1	-1258.77	-1147.17	-560.00	-234.49	-188.93	50.81
3.999	1	-508.43	-66.55	-62.33	-147.54	32.88	34.60
4.000	1	-508.41	-66.27	-62.08	-147.58	32.94	34.65
17.000	2	-176.23	26.25	41.65	-237.99	87.29	112.03
45.000	3	-21.72	27.38	32.17	-283.77	158.18	201.24

Location No: 2		X-Position (cm): 15.000		Y-Position (cm): .000			
Z-Position (cm)	Layer	Normal Stresses					
		Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-8.49	-692.41	.00	.00	.00	.00
3.999	1	-717.13	-215.39	-110.53	.00	.00	.00
4.000	1	-717.30	-215.28	-110.55	.00	.00	.00
17.000	2	-10.18	47.93	-121.53	.00	.00	.00
45.000	3	30.47	34.55	-22.90	.00	.00	.00
Z-Position (cm)	Layer	Normal Strains and Deflections					
		Exx (10^-6)	Eyy (10^-6)	Ezz (10^-6)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.000	1	62.57	-216.66	66.04	.000	.000	509.065
3.999	1	-194.52	10.33	53.15	.000	.000	511.649
4.000	1	-194.58	10.39	53.15	.000	.000	511.650
17.000	2	18.54	111.89	-160.34	.000	.000	497.717
45.000	3	175.95	212.70	-304.40	.000	.000	426.536
Z-Position (cm)	Layer	Principal Stresses and Strains					
		S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10^-6)	E2 (10^-6)	E3 (10^-6)
.000	1	-692.41	-8.49	.00	-216.66	62.57	66.04
3.999	1	-717.13	-215.39	-110.53	-194.52	10.33	53.15
4.000	1	-717.30	-215.28	-110.55	-194.58	10.39	53.15
17.000	2	-121.53	-10.18	47.93	-160.34	18.54	111.89
45.000	3	-22.90	30.47	34.55	-304.40	175.95	212.70

Layered Elastic Analysis by Everstress® 5.0

Title: 60% Fresado + 40% Po de Brita + 3% Cimento (21 cm + rachao)

No of Layers: 5

No of Loads: 2

No of X-Y Evaluation Points: 2

Layer	Poisson's Ratio	Thickness (cm)	Moduli(1) (MPa)	Moduli(2) (MPa)	Multiplier (MPa)	Power
1	.30	4.000	3184.00	847.96	802.72	.330
2	.35	21.000	847.96			
3	.35	15.000	150.00			
4	.45	*****	50.00			
5	.45		50.00			
Load No	X-Position (cm)	Y-Position (cm)	Load (N)	Pressure (kPa)	Radius (cm)	
1	.00	.00	20500.0	560.00	10.790	
2	30.00	.00	20500.0	560.00	10.790	

No of Iteration: 3

Maximum Error in Modulus: .0

Location No: 1		X-Position (cm): .000		Y-Position (cm): .000			
Normal Stresses							
Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-1215.62	-1349.90	-560.00	.00	.00	.00
3.999	1	-76.37	-84.87	-503.71	.00	28.43	.00
4.000	1	-76.11	-84.57	-503.69	.00	28.44	.00
14.500	2	29.69	54.66	-197.10	.00	39.78	.00
40.000	3	32.94	39.82	-26.78	.00	4.18	.00
Normal Strains and Deflections							
Z-Position (cm)	Layer	Exx (10^-6)	Eyy (10^-6)	Ezz (10^-6)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.000	1	-201.84	-256.66	65.85	17.065	.000	587.322
3.999	1	31.47	28.00	-143.01	7.275	.000	585.570
4.000	1	31.52	28.07	-143.05	7.273	.000	585.568
14.500	2	93.81	133.55	-267.25	-8.119	.000	548.801
40.000	3	189.16	251.09	-348.30	-30.776	.000	467.679
Principal Stresses and Strains							
Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10^-6)	E2 (10^-6)	E3 (10^-6)
.000	1	-1349.90	-1215.62	-560.00	-256.66	-201.84	65.85
3.999	1	-505.60	-84.87	-74.49	-143.78	28.00	32.24
4.000	1	-505.57	-84.57	-74.22	-143.82	28.07	32.29
14.500	2	-203.87	36.47	54.66	-278.04	104.60	133.55
40.000	3	-27.07	33.23	39.82	-350.92	191.79	251.09

Location No: 2		X-Position (cm): 15.000		Y-Position (cm): .000			
Normal Stresses							
Z-Position (cm)	Layer	Sxx (kPa)	Syy (kPa)	Szz (kPa)	Syz (kPa)	Sxz (kPa)	Sxy (kPa)
.000	1	-93.82	-796.76	.00	.00	.00	.00
3.999	1	-726.48	-233.49	-106.48	.00	.00	.00
4.000	1	-726.64	-233.36	-106.50	.00	.00	.00
14.500	2	-8.39	64.81	-121.63	.00	.00	.00
40.000	3	36.87	42.89	-28.59	.00	.00	.00
Normal Strains and Deflections							
Z-Position (cm)	Layer	Exx (10^-6)	Eyy (10^-6)	Ezz (10^-6)	Ux (microns)	Uy (microns)	Uz (microns)
.000	1	45.61	-241.40	83.91	.000	.000	568.954
3.999	1	-196.13	5.15	57.01	.000	.000	571.963
4.000	1	-196.19	5.21	57.00	.000	.000	571.963
14.500	2	13.56	130.10	-166.73	.000	.000	561.837
40.000	3	212.41	266.64	-376.70	.000	.000	481.015
Principal Stresses and Strains							
Z-Position (cm)	Layer	S1 (kPa)	S2 (kPa)	S3 (kPa)	E1 (10^-6)	E2 (10^-6)	E3 (10^-6)
.000	1	-796.76	-93.82	.00	-241.40	45.61	83.91
3.999	1	-726.48	-233.49	-106.48	-196.13	5.15	57.01
4.000	1	-726.64	-233.36	-106.50	-196.19	5.21	57.00
14.500	2	-121.63	-8.39	64.81	-166.73	13.56	130.10
40.000	3	-28.59	36.87	42.89	-376.70	212.41	266.64