



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



Edgar Alfredo Sá

Mistura Asfáltica com Utilização de Agregados Alternativos

Ouro Preto
2018

Edgar Alfredo Sá

Mistura Asfáltica com Utilização de Agregados Alternativos

Monografia de conclusão de curso para obtenção do grau de Engenheiro Civil na Universidade Federal de Ouro Preto defendida e aprovada em 13 de Julho de 2018 como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Civil.

Área de concentração: Transportes

Orientador: Prof. Fernando Abecê

Co-orientadores: Prof. Dr. Rodolfo Gonçalves Oliveira da Silva
Engº. Hebert da Consolação Alves
Prof. Ms. Ronderson Queiroz Hilário

Ouro Preto
2018

S111m Sá, Edgar Alfredo .
Mistura asfáltica com utilização de agregados alternativos [manuscrito] /
Edgar Alfredo Sá. - 2018.

70f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Antonio Borges Campos.
Coorientador: Prof. Dr. Rodolfo Gonçalves Oliveira da Silva.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas. Departamento de Engenharia Civil.

1. Resíduo de minério de ferro. 2. Resíduo de pedra sabão. 3. Pavimentação
rodoviária. 4. Mistura asfáltica. I. Campos, Fernando Antonio Borges. II.
Silva, Rodolfo Gonçalves Oliveira da. III. Universidade Federal de Ouro Preto.
IV. Título.

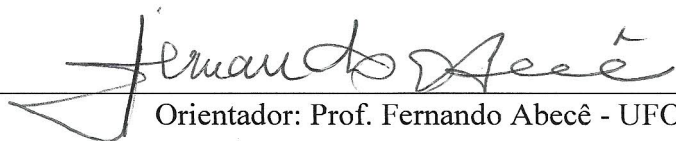
CDU: 624

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br

Edgar Alfredo Sá

Mistura Asfáltica com Utilização de Agregados Alternativos

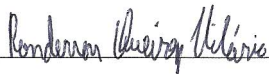
Monografia de conclusão de curso para
obtenção do grau de Engenheiro Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto
defendida e aprovada em 13 de Julho de
2018 como parte dos requisitos para a
obtenção do Grau de Engenheiro Civil.
Banca examinadora:



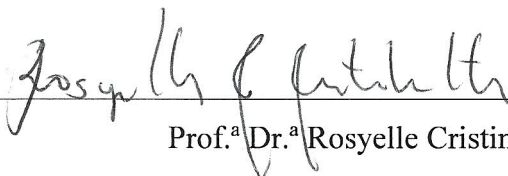
Orientador: Prof. Fernando Abecê - UFOP



Co-orientador: Engº. Hebert da Consolação Alves – UFOP



Co-orientador: Prof. Ms. Ronderson Queiroz Hilário - UFMG



Prof.^a Dr.^a Rosyelle Cristina Corteletti – UFOP



Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro - UFOP

Bolta di mundu i rabu di pumba, pabia fidju di n'sibi nunka i padidu. Nó garandis ta fala kuma galinha pindrada ka ta sibi si kaminhu lundju, pabia kin ku misti pis, i tem ku modja bunda na iagu. Si sombra di sibi ka ta sombria bas del, son la fora, enton, kin ku misti forel, i ta para balei. Kuma bunitasku di iagu salgadu i bunitu, ma i kansadu bibi, pa kila, ka bu disisti di bu sunhu, pabia si kanua ka n'kadja bu na tchiga nha ermon.

Ditus na kriol (Provérbios em crioulo)

DEDICATÓRIA

Dedico esta conquista aos meus irmãos, amigos e companheiros de luta diária, que nunca mediram força para me ajudar e escutar as minhas preces nas horas difíceis, de modo especial aos meus pais que sempre me mostraram e me incentivaram a abraçar a educação como arma para o desenvolvimento da humanidade, gratidão imensa a todos vocês.

AGRADECIMENTOS

Pa kumsa gardisimentu di Kaminhu lundju, sufridu i duru, nada mindjor diki gardisi Deus ku dan proteson i guian i dan forsa pan aguenta tudu. Ndji bili ossak banha na kinhene kulon, kundólis sadjakim osinu djenki djoran sakalani, mbari djaki unu, Usi luti sadjak bouk nini ogut osak oimni ndé djok ondima sakur ló, ari ó nkonoló ndji ó na ló ara pudukó kufer. Ndji ó na Usi asa onandji, ndji imni, kari kuar, mé pikil, ndji nori ma onu djau nandji.

Aos meus irmãos e irmãs, amigos e amigas e companheira, que torceram para que esta conquista se tornasse realidade, de modo especial, a Beatriz Francisca, Artemisa, Neusa, Leonarda, Din’hu, Amélia, Filomena, Orlando, Gininha, Gina, Ana Carolina, Deodinildo, Maira, Bruno Augusto, Desejado, Júvita, João Adulai, Ngoial, Edna, Carlos Miguel, ArCó, Cipriano, Luís, Noel, Lino, Josimar, Beto, Moisés, Zico, Ndjina, Ntchalá, Álvaro, Messias, Rafael, João Esmeraldo, Fr. Victor, Fr. Paulo, Rosilene Lapa, Adzania Fernandes, Cynthia Andrade, Lillian Costa, Dulce, Caio, Mandinga, Basílio, Milica, Braima (In memoriam), Ismael, Renato, Leopoldo, Romi, Adalgisa, Seuna, Djoca, Epifânio, Herculano, Elias, Vá (In memoriam), Amarildo, Ailton, Indira, Tércio, Suaré, Gabriel Ambrósio, Lidiane, Dalila, Raquel, Vanessa, Natanael, Ladia, Leonardo, Rodrigo, Lucas, Emanuel, Valderrama, Polegada, Mônica, Adilson Santos, Letícia, Jorge Adílio Penna, Marcilene, Adriano, Hermê, Virgílio, Marcos Paulo, Pedro, Riquelme, Jaime Sardi, Antenor Rodrigues Barbosa Júnior e João Luís Martins. Vocês são exemplos de pessoas a seguir.

Aos meus pais, Rosa Maria, Alfredo Sá (*in memoriam*), Lina Gomes (*in memoriam*), Unhadjaki Abotirló (*in memoriam*), Joanninha, Betânia dos Anjos, Bokundji (*in memoriam*), Nelson Tavares. Tios e tias, Jorge, Armando, Madju (Mban), Casemiro, Prut, Ir. Ndira Cruz, Ir. Eloisa Cruz, Edgar Cruz, Beri, Augusta, Apili, Maria, Opidón, Murida, Mpona, Fenda, Ankay, Danielly, Marcelo, Cyntia, Mônica e Maurílio. Avós e Avôs, Teté (*in memoriam*), Lotinha (*in memoriam*), Atutu, Neuza dos Anjos, Nsama (*in memoriam*), Adulai (*in memoriam*), Maria do Socorro, Nirce e Neide.

Aos integrantes do laboratório de Ferrovias e Asfalto (LFA), de modo especial aos meus Mestres/Professores Fernando Abecê, Rodolfo Gonçalves Oliveira da Silva, Miguel

Arcanjo Gomes, Márcio Socorro Garcia, Hebert da Consolação Alves, Adson Viana Alecrim, Ronderson Queiroz Hilário e Gilberto Fernandes. Aos bolsistas e voluntários Pelejadu, Júlia Alves, Mary Dany, Samuel, Bispo, Marcelo, Ariani, Lídia, Júlia Batata, Heila Empresária, Larissa, Thácio e a todos ex-bolsistas/voluntários. Foi um prazer imenso aprender, trabalhar e conviver com vocês durante esse tempo todo. Jamais esquecerei os momentos felizes que me proporcionaram nessa caminhada que parecia incerta. Levarei comigo uma bagagem cheia de experiência, mas aquela experiência única que ninguém vai botar defeitos.

À Universidade Federal de Ouro Preto, pela oportunidade honrosa de fazer parte da sua história, de modo especial ao Núcleo de Apoio Pedagógico (NAP), à Reitoria, ao Departamento de Engenharia Civil (DECIV) e à gloriosa Escola de Minas. À Fundação Gorceix, de modo especial ao Departamento de Treinamento Acadêmico e Profissional (DETAP). Meu muito obrigado pelos ensinamentos e apoio incondicional. Levarei comigo o aprendizado que adquiri nessas instituições. Prometo que aplicarei o meu conhecimento com um olhar humano, pensando em terceiros e não só em mim.

Às repúblicas, Federal dú Léo, Tróia, Ama-Zonas, K-Zona, MoíCana e aos colegas de curso da Engenharia Civil.

À Pedreira Irmãos Machado, pela doação dos agregados convencionais (Gnaisse). À Indústria e Comércio São José Ltda. (Talcos e Panelas), pela doação de resíduo de minério de serpentinito (pedra-sabão). E à Anglo American SA, pela doação de resíduo de minério de ferro. Muito obrigado por possibilitarem a realização desta pesquisa, doando as amostras.

O meu agradecimento especial vai aos professores Fernando Abecê, Rodolfo Gonçalves Oliveira da Silva, Hebert da Consolação Alves, Ronderson Queiroz Hilário, Rosyelle Cristina Corteletti e Paulo Marcos de Barros Monteiro por terem aceitado o convite para comporem a banca e pelas valiosas contribuições e orientações fornecidas durante a elaboração da monografia.

Agradeço a todos que participaram de forma direta e indireta para que esta conquista se torne real, fizeram-me ser uma pessoa culta e madura. Gratidão imensa por participarem

desta conquista tão especial da minha vida. Pude ver hoje que esse sonho tornou-se realidade, graças a vocês.

Enfim, suma ku nó ta fala na um bom kriol:

“SI BU MISTI PIS BU TEM KU MODJA BUNDA NA IAGU”

RESUMO

A preocupação com o meio ambiente aumentou nos últimos anos devido à degradação e à poluição que prejudica a qualidade de vida dos seres vivos. Com isso, precisamos buscar alternativas para o uso dos materiais que são conhecidos como rejeitos. Um exemplo são os rejeitos de mineração que são depositados em barragens. O processo de extração e beneficiamento de minérios gera uma quantidade significativa de resíduos (rejeitos), que provocam sérios problemas ambientais, quando não se dá a eles a destinação adequada. Para tentar reduzir esse grande problema que afeta o nosso meio, estudos começaram a ser feitos com a finalidade de utilizá-los na construção civil, em especial no uso em pavimentos. Com o crescente desenvolvimento das pesquisas relacionadas à pavimentação rodoviária pela busca de metodologias que visam proporcionar ao pavimento uma melhor resistência e durabilidade, associadas a um menor custo. Para tanto, foram utilizados materiais alternativos que possuem propriedades semelhantes ou até melhores do que os usualmente usados, possibilitando também uma redução no custo da rodovia. Com o desafio proposto pela reciclagem, o reuso e a economia vêm sendo de suma importância socioeconômica para o desenvolvimento sustentável. Nesse contexto, a engenharia rodoviária vem aperfeiçoando e inovando com tecnologias e formas de gerenciamentos que reduzem os custos, garantindo, assim, uma melhor configuração para a implantação e a manutenção das rodovias, e com isso acarretar um aumento nos investimentos em obras de infraestrutura rodoviária. Neste trabalho, foram utilizados agregados convencionais (gnaisse) e alternativos sendo um, resíduo de minério de ferro e o outro, resíduo de minério de serpentinito (pedra-sabão) para a dosagem das misturas asfálticas, usando a metodologia Marshall e enquadrando na faixa C do DNIT. O estudo tem por finalidade caracterizar e avaliar o comportamento mecânico de misturas asfálticas do tipo CAUQ (Concreto Asfáltico Usinado a Quente), utilizando a dosagem do método Marshall, empregando materiais alternativos como agregados. Baseando-se nos resultados dos ensaios de caracterização mecânica dos agregados e dos corpos de prova obtidos no laboratório, foi possível garantir que os materiais alternativos usados na pesquisa podem ser utilizados como revestimentos em pavimentos asfálticos. Todos os ensaios foram realizados no laboratório de ferrovias e asfalto do Departamento da Engenharia Civil da UFOP.

Palavras-chave: Resíduo de minério de ferro. Resíduo de pedra sabão. Pavimentação rodoviária. Mistura asfáltica.

RÉSUMÉ

Les préoccupations concernant l'environnement ont augmenté au cours de dernières années en raison de la dégradation et de la pollution qui nuisent à la qualité de vie des êtres vivants, avec ça, nous devons chercher des solutions de rechange à l'utilisation de matériaux connus sous le nom de résidus. Un exemple de ceci, sont les résidus miniers qui sont déposés dans les barrages. Le processus d'extraction et d'enrichissement des minerais génère une quantité importante de déchets (résidus), qui causent des problèmes environnementaux sérieux lorsqu'une élimination appropriée n'est pas donnée. Pour essayer de réduire ce grand problème qui affecte notre environnement, des études ont commencé à être faites dans le but de les utiliser dans la construction civile, en particulier l'utilisation dans les chaussées. Avec le développement croissant de la recherche liée au pavage routier par la recherche de méthodologies visant à offrir au revêtement une meilleure résistance et durabilité associée à un coût moindre en utilisant des matériaux alternatifs ayant des propriétés similaires ou même supérieures aux matériaux habituellement utilisés permettant également une réduction des coûts de l'autoroute. Le défi proposé par le recyclage, la réutilisation des matériaux, a généré une économie sociale d'une grande importance pour le développement écologique. Dans ce contexte, l'ingénierie routière a perfectionné et innové avec des technologies et des formes de gestion qui réduisent les coûts, assurant ainsi la meilleure configuration pour le déploiement et la maintenance; et avec cela, augmentant les investissements dans les travaux d'infrastructure routière. Dans ce travail, des agrégats conventionnels (gneiss) et alternatifs (résidus de minerai de fer et déchets de stéatite) ont été utilisés pour le dosage des mélanges d'asphalte en utilisant la méthodologie "Marshall" et en l'ajustant dans la "gamme C" du DNIT. Le but de cette étude était de caractériser et d'évaluer le comportement mécanique des enrobés bitumineux de type CAUQ (Béton bitumineux usiné à chaud), en utilisant la méthode Marshall dans le but d'impregner des matériaux alternatifs comme agrégats. Sur base des résultats des tests de caractérisation mécanique des agrégats et des échantillons obtenus en laboratoire, il sera possible de garantir que les matériaux alternatifs utilisés dans la recherche peuvent être utilisés comme revêtements sur les chaussées en asphalte. Tous les tests ont été réalisés au laboratoire de chemin de fer et d'asphalte du département de génie civil de l'UFOP.

MOTS CLÉS: résidu de minerai de fer, savon de pierre de rebut, pavage routier, mélange d'asphalte.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Coleta dos agregados utilizados no laboratório.

Figura 2.2 – Peneirador utilizado nos ensaios.

Figura 2.3 – Dimensões utilizadas para análise nos ensaios.

Figura 2.4 – Ensaio de partículas planas e alongadas.

Figura 2.5 – Máquina “Los Angeles” e carga abrasiva utilizada nos ensaios.

Figura 2.6 – Aparelho Treton.

Figura 2.7 – Ensaio de Durabilidade com utilização de sulfato de sódio.

Figura 2.8 – Avaliação da adesividade entre o agregado e o ligante asfáltico CAP 50/70.

Figura 2.9 – Balanças para a determinação da densidade, massa específica, absorção e porosidade

Figura 2.10 – Ensaio para determinação da densidade real do fíler

Figura 2.11 – Frascos Le Chatelier dentro do banho-maria para controle da temperatura durante a realização do ensaio.

Figura 2.12 – Ensaio para determinação do equivalente de areia (EA) do agregado convencional.

Figura 2.13 – Pesagem do ligante asfáltico utilizado na elaboração do corpo de prova.

Figura 2.14 – Confecção manual das misturas asfálticas

Figura 2.15 – Mistura asfáltica pronta para ser colocada na estufa por um período de duas horas

Figura 3.1 – Os CP's moldados para a realização dos ensaios de caracterização mecânica

Figura 3.2 – Detalhe do corpo de prova durante a realização do ensaio de módulo de resiliência (MR)

Figura 3.3 – Vista lateral do corpo de prova utilizado no ensaio de MR

Figura 3.4 – Ensaio resistência à compressão diametral sendo realizado no Laboratório de Ferrovias e Asfalto

Figura 3.5 – Ensaio de estabilidade e fluência Marshall sendo realizado no Laboratório de Ferrovias e Asfalto

Figura 4.1 – Curva granulométrica da mistura MC

Figura 4.2 – Curva granulométrica da mistura RMF

Figura 4.3 – Curva granulométrica da mistura RPS

Figura 4.4 – Representação esquemática dos corpos de prova para determinação do teor de projeto – Adaptado de Silva (2017).

Figura 4.5 – Exemplo gráfico para determinação do teor de projeto baseado nos parâmetros V_v e RBV.

Figura 4.6 – Gráfico obtido para determinação do teor de projeto de resíduo de minério de ferro baseado nos parâmetros V_v e RBV.

Figura 4.7 – Gráfico obtido para determinação do teor de projeto de resíduo de minério de serpentinito (pedra-sabão) baseado nos parâmetros V_v e RBV.

Figura 4.8 – Propriedades volumétricas da mistura padrão MCG

Figura 4.9 – Propriedades volumétricas da mistura RMF.

Figura 4.10 – Propriedades volumétricas da mistura RPS.

Figura 4.11 – Valores de DMT das misturas asfálticas em função do teor de ligante

Figura 4.12 – Densidade aparente das misturas asfálticas em função do teor de ligante.

Figura 4.13 – Relação entre o V_v e o teor de ligante para cada mistura asfáltica

Figura 4.14 – Relação entre o VAM e o teor de ligante

Figura 4.15 – Resultado dos teores de projeto (TP) determinados para cada mistura

Figura 5.1 – Representação gráfica dos valores médios de RT das misturas utilizadas nesta pesquisa

Figura 5.2 – Valores médios de RT das misturas no teor de projeto

Figura 5.3 - Resultados do módulo de resiliência da mistura contendo resíduo de minério de ferro.

Figura 5.4 - Resultados do módulo de resiliência da mistura contendo resíduo de minério de serpentinito (pedra-sabão).

Figura 5.5 – Resultados do módulo de resiliência da mistura contendo agregado convencional de gnaiss.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Massas empregadas das diferentes frações para determinação das partículas planas e/ou alongadas (ASTM D 4791) – Adaptado de Silva (2017)

Tabela 4.1 – Composição granulométrica da mistura MCG – Adaptado de Silva (2017)

Tabela 4.2 – Composição granulométrica da mistura asfáltica de RMF.

Tabela 4.3 – Composição granulométrica da mistura asfáltica de RPS.

Tabela 4.4 – Valores médios dos parâmetros volumétricos obtidos para as misturas asfálticas.

Tabela 4.5 – Resultado dos parâmetros volumétricos das misturas asfálticas no teor de projeto.

Tabela 5.1 – Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral a 25°C.

Tabela 5.2 - Apresentação dos resultados dos ensaios de MR das misturas elaboradas com CAP 50/70 e os valores médios da relação MR/RT.

Tabela 5.3 – Resultados médios da estabilidade (E) e fluência (F) Marshall dos resíduos.

Tabela 5.4 – Resultados médios da estabilidade (E) e fluência (F) Marshall.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Objetivos da Pesquisa	17
1.1.1	Objetivos Geral.....	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
1.3	Revisão Bibliográfica	18
1.3.1	Panorama da malha rodoviária brasileira	18
1.3.2	Misturas asfálticas	19
1.3.3	Uso de resíduos industriais em revestimentos asfálticos.....	21
2	METODOLOGIA.....	22
2.1	Materiais e Métodos.....	22
2.1.1	Moldagem dos corpos de prova de pavimento asfáltico.....	23
2.2	Agregados utilizados na pesquisa	23
2.3	Caracterização dos Agregados	24
2.3.1	Análise granulométrica.....	25
2.3.2	Forma das partículas	25
2.3.3	Ensaio de partículas planas e alongadas	26
2.3.4	Abrasão Los-Angeles	27
2.3.5	Treton	28
2.3.6	Ensaio de sanidade.....	29
2.3.7	Adesividade ao ligante asfáltico	29
2.3.8	Densidade real, aparente e absorção do agregado graúdo e agregado miúdo	30
2.3.9	Densidade real do fíler.....	30
2.3.10	Equivalente de areia	32
2.4	Moldagem de Corpos de Prova de Concreto Asfáltico Usinado a Quente - CAUQ.....	33
3.	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS	35
3.1	Módulo de Resiliência	36
3.2	Resistência à Tração	37
3.3	Estabilidade e Fluência Marshall.....	38
4	RESULTADOS	39
4.1	Parâmetros Granulométricos	39
4.2	Mistura Comparativa	39
4.3	Mistura Contendo Resíduo de Minério de Ferro da Mina de Anglo American	41

4.4	Mistura Contendo Resíduo de Minério de Serpentinó (Pedra-Sabão) da Empresa Indústria e Comércio São José Ltda.	42
4.5	Preparação dos Corpos de Prova	43
4.6	Teor de Projeto (TP)	43
4.7	Resultados dos Parâmetros Volumétricos.....	45
4.8	Determinação e Avaliação dos Teores de Projeto	53
4.9	Resultados dos Ensaios Mecânicos.....	55
4.9.1	Resultados do Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT).....	55
4.9.2	Resultados do ensaio de Módulo de Resiliência (MR)	57
4.9.3	Resultados do ensaio de Estabilidade e fluência Marshall	62
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
6.	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	66
7	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com o meio ambiente tem aumentado nas últimas décadas devido à degradação e poluição constantes, que prejudicam e afetam a qualidade de vida dos seres vivos. Essa preocupação fez com que os órgãos governamentais e não-governamentais buscassem soluções para a utilização, reciclagem e reuso dos resíduos em geral. Essa política traz uma percepção de que a qualidade de vida está diretamente relacionada com um meio ambiente limpo.

O processo de poluição começa com a extração e o beneficiamento de minérios que geram enormes quantidades de resíduos industriais, que, se forem depositados inadequadamente, causam problemas sérios ao meio ambiente. Para diminuir esse impacto ambiental negativo, pesquisas estão em desenvolvimento visando ao aproveitamento desse material, dando-lhe um destino final ambientalmente adequado. Uma das alternativas propostas é o uso dos rejeitos industriais nos pavimentos rodoviários.

Com o aumento do interesse nas pesquisas para o desenvolvimento de pavimentos rodoviários alternativos mais resistentes, eficientes e com menos custo, utilizando materiais alternativos que possuam propriedades idênticas ou próximas dos agregados naturais comumente utilizados, abriu-se um enorme desafio aos pesquisadores, visando trazer a melhoria e a redução dos custos nas estruturas rodoviárias. Com o intuito de reduzir o custo para que se possa obter um retorno economicamente viável, o processo de reutilizar os resíduos vem sendo de suma importância socioeconômica para o desenvolvimento sustentável em todos os lugares. Em face disso, os engenheiros rodoviários vêm aperfeiçoando, por gerências de tecnologias inovadoras que reciclam e reutilizam os resíduos da mineração para o uso nos pavimentos, de modo a diminuir os custos das obras e dá mais segurança aos usuários.

1.1 Objetivos da Pesquisa

1.1.1 Objetivos Geral

Este trabalho tem por finalidade caracterizar e avaliar o comportamento mecânico de misturas asfálticas do tipo CAUQ, utilizando parcialmente em sua composição resíduo de minério de ferro e resíduo de minério de serpentinito (pedra-sabão) como agregados alternativos, analisando suas propriedades e similaridades, comparando-a com os agregados convencionais.

1.1.2 Objetivos Específicos

Este trabalho tem por objetivo caracterizar e avaliar o comportamento mecânico de misturas asfálticas do tipo CAUQ, analisando suas propriedades e similaridades, utilizando a dosagem do método Marshall e empregando materiais alternativos como agregados tais como: resíduo de minério de ferro do quadrilátero ferrífero de Minas Gerais e resíduo de minério de serpentinito (pedra-sabão) oriundo da região de Ouro Preto/MG..

1.2 Justificativa

A utilização de resíduos de mineração, substituindo parcialmente os agregados minerais comumente utilizados em misturas asfálticas, contribui para diminuir o impacto ambiental causado pela sua exploração. Esse procedimento visa melhorar as condições do pavimento quanto ao aumento de resistência mecânica, aderência e diminuição do ruído, aproveitando características essenciais de cada resíduo apresentado neste trabalho.

1.3 Revisão Bibliográfica

1.3.1 Panorama da malha rodoviária brasileira

O levantamento feito e publicado pela Confederação Nacional do Transporte (CNT), em outubro de 2017, mostrou que o Brasil possui 1.735.606km de rodovias, mas apenas 12,31% encontram-se pavimentadas. A qualidade das rodovias pavimentadas que foram levantadas e classificadas como boas ou em ótimo estado é de aproximadamente 40,84% dos 213.676km pavimentadas.

Segundo Motta e Medina (2015) *apud* Silva (2017), comparando o Brasil e os Estados Unidos da América, esses autores afirmam que, enquanto o Brasil, em 2013, possuía 11,8% de suas rodovias pavimentadas, os Estados Unidos, em 2011, já possuíam aproximadamente mais de 60% da sua malha rodoviária pavimentada. E destacam ainda que a malha rodoviária dos EUA é aproximadamente quatro vezes maior do que a brasileira, apesar de os dois países apresentarem extensões territoriais similares. No ano de 2013, enquanto 61,1% das cargas do Brasil eram transportadas pelas rodovias, nos Estados Unidos, apenas 33% circulavam por meio do modal rodoviário.

Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), no Brasil, a execução de pavimentos asfálticos de forma empírica iniciou-se na década de 1950 e foi difundida em 1966, pelo Engenheiro Murillo Lopes de Souza, que propôs um novo método de dimensionamento de pavimentos. Esse método ainda prevalece e se baseia praticamente na adaptação daquele desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE), que inicialmente era destinado à pavimentação dos aeroportos, utilizando basicamente o ensaio de índice suporte Califórnia (CBR).

De acordo com Bernucci et al. (2008); Campanha (2011) *apud* Silva (2017), nas últimas décadas, observou-se uma crescente insatisfação no setor produtivo devido ao baixo investimento de recursos financeiros destinados à infraestrutura rodoviária no país, que não satisfaz a real demanda do referido setor. O modal de transporte de carga mais utilizado no Brasil é a rodoviária e as obras de pavimentação desse contingente geram expressivas e intoleráveis cifras aos cofres públicos. Mesmo que os bens produzidos no país possam ser competitivos na fase de produção, eles perdem competitividade no quesito infraestrutura de transportes, devido a uma matriz modal deficiente, na qual as estradas encontram-se em estado tal que não são capazes de atender as necessidades de transporte de cargas nacionais.

1.3.2 Misturas asfálticas

De acordo com CNT (2017), um pavimento bem dimensionado visa prover segurança ao tráfego nas rodovias e deve suportar os efeitos das mudanças de clima, permitindo o deslocamento suave; não deve também causar desgaste excessivo dos pneus dos veículos e nível alto de ruídos; deve ter estrutura forte, resistir ao fluxo de carros, permitir o escoamento da água na sua superfície, possuir sistemas de drenagem eficientes para dar vazão à água da chuva e ter boa resistência a derrapagens. Se atender os requisitos acima citados, a estrutura do pavimento pode ser considerada muito bem dimensionada, que é algo muito importante para um projetista. A superestrutura deve ser constituída por camadas que distribuam as solicitações de carga, limitando as tensões e as deformações de maneira a garantir um desempenho adequado da via, por um longo período de tempo.

Nesse sentido, os pavimentos são divididos em camadas, para minimizar os esforços verticais produzidos pela ação do tráfego e, conseqüentemente, oferecer proteção ao subleito.

Segundo CHOWDHURY et al. (2001) *apud* VASCONCELOS (2004), o desempenho das misturas asfálticas a quente é significativamente influenciado por propriedades da combinação de agregados. Dentre essas propriedades, as que mais influenciam são forma (angularidade), textura (rugosidade) e granulometria. Uma distribuição granulométrica adequada ao tipo de mistura asfáltica que se quer produzir é um dos pontos-chave para a elaboração de uma mistura de bom desempenho a curto, médio e longo prazos.

Segundo CUNHA (2004) *apud* VASCONCELOS (2004), o método Bailey para Seleção de Granulometrias Densas e Contínuas apresenta ferramentas que permitem a avaliação da combinação de agregados para melhor compreensão da relação entre a granulometria e as propriedades da mistura. A otimização dos vazios e do intertravamento entre os agregados irá promover misturas resistentes à deformação permanente. Dessa forma, o método tenta adequar as vantagens das misturas densas com as vantagens das misturas descontínuas.

Segundo SOARES et al. (2000), os critérios convencionais volumétricos não garantem que o teor “ótimo” corresponda necessariamente ao melhor teor para todos os aspectos do comportamento de uma mistura asfáltica dentro dos novos conhecimentos da mecânica dos pavimentos, que devem nortear a dosagem com a obtenção das características mecânicas da mistura em estudo. Reforça-se também a necessidade de explorar melhor a granulometria dos agregados disponíveis, além de dosar cada mistura em função do CAP disponível e da estrutura na qual será empregada.

De acordo com Silva (2017), o asfalto é um aglutinante dos agregados minerais, sendo derivado do processamento do petróleo. No Brasil, o mais utilizado em misturas asfálticas para pavimentação é denominado cimento asfáltico de petróleo (CAP).

De acordo com Bernucci et al. (2008) *apud* Silva (2017), na maioria dos países, a pavimentação asfáltica é a principal forma de revestimento. No Brasil, há predominância de revestimento asfáltico nas estradas pavimentadas, além de ser utilizado em grande parte das ruas. Pode-se citar como principais justificativas do uso intensivo do asfalto em pavimentação: proporciona forte união dos agregados, agindo como um ligante que permite flexibilidade controlável; é impermeabilizante; é durável e resistente à ação da maioria dos ácidos, dos álcalis e dos sais, podendo ser utilizado aquecido ou emulsionado, em amplas combinações de esqueleto mineral, com ou sem aditivos.

1.3.3 Uso de resíduos industriais em revestimentos asfálticos

Segundo CNT (2016) *apud* Silva (2017), a falta de políticas públicas direcionadas a um investimento mais acentuado em infraestrutura de transportes tem elevado os custos logísticos, limitando o desenvolvimento da economia brasileira e restringindo a competitividade dos produtos nacionais no mercado. A má qualidade das rodovias, aliada à ausência de serviços de manutenção, implica maiores gastos com a restauração dos pavimentos, requerendo soluções técnicas mais onerosas para a reversão desse cenário. Concomitantemente aumenta a probabilidade de ocorrência de acidentes, gerando custos elevados para os usuários. Principalmente com a elevação do custo de manutenção dos veículos, além do consumo de combustível, lubrificantes, pneus e freios.

De acordo com Silva (2017), mediante o contexto apresentado pela CNT em 2016, justifica-se um necessário e urgente investimento em materiais de baixo custo que otimize a vida útil da malha rodoviária e propicie a redução dos custos para o Estado. Nesse sentido, o presente trabalho tem por objetivo propor soluções técnicas para a execução de pavimentos alternativos, com a utilização parcial de resíduos de minério de ferro em misturas asfálticas. Elucida-se que a substituição parcial do agregado convencional por resíduos de mineração visa promover a redução do custo do revestimento asfáltico, de forma a estimular o investimento em construção de rodovias pavimentadas e propiciar melhor condições de trafegabilidade. E é importante destacar ainda que a aplicação do resíduo de minério de ferro como agregado alternativo contribui para a mitigação dos danos ambientais, reduzindo a extração e o consumo de agregados convencionais e a diminuição da geração de resíduos a serem dispostos em estruturas de contenção.

Segundo Silva (2017), várias metodologias foram desenvolvidas para a determinação em laboratório do módulo de resiliência de misturas asfálticas. Atualmente, o ensaio mais popular para a determinação do módulo de resiliência é o de tração indireta por compressão diametral, devido a sua simplicidade técnica e pela utilização de corpos de prova cilíndricos.

2 METODOLOGIA

2.1 Materiais e Métodos

O resíduo de minério de serpentinito (pedra-sabão) de coloração cinza, utilizado neste trabalho, é oriundo da empresa Indústria e Comércio São José Ltda. (Talcos e Panelas), localizada na região de Mata dos Palmitos, no distrito de Santa Rita, município de Ouro Preto/MG. O resíduo de minério de ferro de coloração marrom é oriundo da empresa Anglo American S/A, localizada no município de Conceição do Mato Dentro/MG. O agregado convencional de gnaiss de coloração cinza foi adquirido na empresa Pedreira Irmãos Machado, cuja jazida localiza-se no distrito de Amarantina, município de Ouro Preto/MG. Optou-se pela utilização do agregado gnáissico pelo fato de o mesmo ser utilizado corriqueiramente em obras de pavimentação rodoviária na região. A figura 2.1 abaixo mostra a coleta dos materiais.

Figura 2.1– Coleta dos agregados utilizados no laboratório:

a) agregado gnáissico; b) resíduo de minério de ferro



(a)

(b)

O ligante asfáltico utilizado foi um CAP 50/70, fornecido pela Refinaria Gabriel Passos (REGAP), localizada no município de Betim/MG. Optou-se também por esse tipo de cimento asfáltico por ser o mais utilizado nas rodovias de tráfego pesado inseridas na região do Quadrilátero Ferrífero e no Brasil.

2.1.1 Moldagem dos corpos de prova de pavimento asfáltico

No presente trabalho foram produzidas misturas asfálticas contendo resíduos de mineração (resíduos de minério de serpentinito ‘pedra-sabão’ e de minério de ferro), de forma que seus parâmetros e especificações se enquadrassem de acordo com a norma DNIT 031/2006, que estabelece os requisitos concernentes aos materiais utilizados em revestimentos asfálticos. Foi empregada a metodologia Marshall para a confecção dos corpos de prova. A caracterização mecânica das misturas foi avaliada por meio dos ensaios de estabilidade e fluência Marshall, resistência à tração por compressão diametral (RT) e módulo de resiliência (MR). O desempenho mecânico das misturas alternativas foi comparado com os resultados obtidos da mistura convencional, que utiliza o agregado gnáissico na sua composição.

Os corpos de prova foram moldados em um compactador Marshall automático, com as dosagens de seis tipos de teores de ligantes asfálticos (CAP), variando de 4,5% a 6,5%, incluindo o teor do projeto (TP) para cada tipo de resíduo usado. Os corpos de provas tinham aproximadamente 10cm de diâmetro e 6,35cm de altura.

2.2 Agregados utilizados na pesquisa

O resíduo de minério de serpentinito (pedra-sabão) coletado na empresa provém do corte de peças para a confecção das painéis. Esses resíduos são constituídos basicamente de lama, contendo partículas finas e miúdas do agregado mais água. A lama é encaminhada para a unidade de tratamento composto por tanques de sedimentação gravitacional. Quando tiver uma quantidade significativa de resíduos nos tanques, a água é removida, gerando, assim, uma massa sólida dos agregados. Os operadores, então, usam a retroescavadeira para a remoção dessas massas e, em seguida, elas são depositadas em grandes áreas, com pequeno percentual de reaproveitamento.

O resíduo de minério de ferro foi coletado na barragem de rejeitos e depois depositado por meio de bombeamento da lama para a barragem, até estabilizar por sistema de sedimentação.

Os agregados convencionais de gnaiss foram coletados e ensacados dentro da pedreira pela equipe de laboratório de Ferrovias e Asfalto.

O resíduo de minério de serpentinito (pedra-sabão) adquirido na empresa foi classificado em dois tipos de fração: os resíduos finos gerados pelo material retirado com discos de serra ou lâminas de corte de blocos para obter a peça desejada no ato da confecção de painéis de pedras e outros utensílios desejados; e os resíduos grossos provenientes das rebarbas ou aparas geradas durante o corte das peças com discos de serra. Os resíduos de minério de ferro foram classificados como a fração fina devido ao tipo de material coletado e doado pela empresa responsável. Os agregados convencionais de gnaiss foram classificados como: grão, miúdo e fino.

2.3 Caracterização dos Agregados

Agregados são um dos materiais mais utilizados da construção em nível mundial. Na pavimentação rodoviária é possível constatar seu emprego no concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ), como elemento estrutural majoritário no revestimento. Comumente utilizam-se ligante asfáltico, agregados grãos, miúdos e filler para compor o CAUQ, que é um dos elementos estruturais do pavimento flexível. Tais elementos devem ser devidamente dimensionados para resistir aos esforços solicitantes dos veículos. Com a finalidade de atender as demandas das normas instituídas pelo DNIT, foi realizada uma série de ensaios com os agregados, para averiguar sua adequação no uso em pavimentos. Os ensaios realizados para a caracterização dos agregados e a metodologia utilizada foram:

- x Granulometria (NBR 7181/84);
- x Forma das partículas (DNER ME 086/94);
- x Ensaio de partículas planas e alongadas (ASTM D 4791);
- x Abrasão Los-Angeles (DNER-ME 035/98);
- x Treton (DNER-ME 399/99);
- x Ensaio de sanidade (DNER-ME 089/1994);
- x Adesividade ao ligante asfáltico (DNER-ME 078/94);
- x Densidade real, aparente e absorção do agregado grão (DNER-ME 081/98);
- x Densidade real do agregado miúdo (DNER-ME 084/95);
- x Densidade real do filler (DNER-ME 085/94);
- x Equivalente de areia (DNER-ME 054/97)

2.3.1 Análise granulométrica

A distribuição granulométrica dos agregados graúdos e miúdos usados nesta pesquisa foi avaliada de acordo com a metodologia NBR 7181/84 com a utilização de um peneirador mecânico convencional. A figura 2.2 abaixo mostra o peneirador empregado nos ensaios.

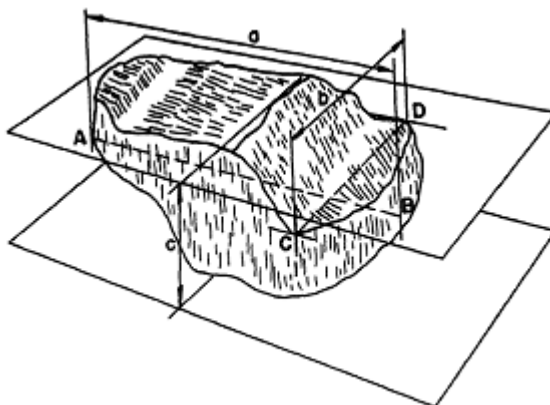
Figura 2.2 – Peneirador utilizado nos ensaios.



2.3.2 Forma das partículas

A forma apropriada dos agregados utilizados na mistura asfáltica é fundamental para o bom funcionamento do revestimento asfáltico, assim, formas lamelares e alongadas dos grãos não são desejadas, dando-se preferência a formatos cúbicos. A determinação do índice de forma das partículas foi realizada seguindo os procedimentos da norma DNER-ME 086/94. O equipamento utilizado no ensaio é composto por um conjunto de crivos circulares e crivos redutores. A Figura 2.3 abaixo mostra o formato de dimensões coletados.

Figura 2.3 – Dimensões utilizadas para análise nos ensaios.



2.3.3 Ensaio de partículas planas e alongadas

De acordo com Silva (2017), a diminuição da trabalhabilidade da mistura e a quebra de partículas durante a compactação podem ser causadas pela utilização de partículas com formas planas e/ou alongadas em misturas asfálticas. A quantidade excessiva dessas partículas dificulta a compactação da mistura, promovendo um consumo maior de ligante asfáltico. Assim, na tentativa de minimizar os problemas causados pelo uso de quantidades excessivas dessas partículas, o Supervape adotou o ensaio de partículas planas e alongadas em agregado graúdo, conforme a norma ASTM D 4791. O ensaio consiste na utilização de um equipamento especial, denominado Caliper (Figura 2.4a), que permite determinar a razão dimensional das partículas, especificamente entre comprimento e largura, largura e espessura e ainda entre comprimento e espessura. O Caliper possibilita a avaliação de razões de 2:1; 3:1; 4:1 e 5:1. A Tabela 2.1 apresenta a massa mínima da amostra necessária para o ensaio. Como exemplo, uma proporção 5:1 significa que um agregado deve possuir, para sua maior dimensão, um valor cinco vezes maior do que o valor de sua menor dimensão. A Figura 2.4b apresenta as definições dimensionais adotadas. Nesta pesquisa o comprimento é considerado como a maior dimensão da partícula, como a largura é definida a maior dimensão da partícula em um plano perpendicular ao comprimento e a espessura como sendo o maior comprimento da partícula em um plano perpendicular ao comprimento e à largura. As partículas podem ser classificadas como lamelar, plana e alongada. O padrão de convenção adotado pode ser definido como:

- ¾ Plana: as partículas devem apresentar razão dimensional entre largura e espessura superior às proporções específicas.
- ¾ Alongada: as partículas devem apresentar razão dimensional entre comprimento e largura superior às proporções específicas.
- ¾ Plana e alongada (lamelar): as partículas devem apresentar razão dimensional entre largura comprimento e espessura superior às proporções específicas.

O Superpave especifica um limite máximo de 10% de partículas lamelares na amostra ensaiada, com razão dimensional 5:1.

Tabela 2.1 – Massas empregadas das diferentes frações para determinação das partículas planas e/ou alongadas (ASTM D 4791) – Adaptado de Silva (2017)

Diâmetro Nominal Máximo (mm)	Massa mínima para o ensaio (kg)
9,5	1
12,5	2
19	5

Figura 2.4 – Ensaio de partículas planas e alongadas: (a) Caliper; (b) Dimensões da partícula do agregado - Adaptado de Silva (2017)



2.3.4 Abrasão Los-Angeles

O ensaio de Abrasão Los Angeles permite quantificar o desgaste sofrido pelo material quando inserido no equipamento padrão (Máquina Los Angeles), juntamente com uma carga abrasiva (que varia de 8 a 12 esferas de aço, dependendo da faixa onde o material em uso se enquadrar. Essas esferas juntas possuem uma massa de aproximadamente 5 kg e são submetidas a um número determinado de rotações e a uma velocidade de 30 e 33 rpm. O ensaio de desgaste ao choque e à abrasão permite avaliar a quebra e a degradação dos agregados graúdos, resultante das ações combinadas do atrito e do impacto. O método adotado segue os procedimentos da norma DNER-ME 035/98, que consiste em submeter determinada quantidade do material, juntamente com uma carga abrasiva (esferas metálicas), a um número especificado de revoluções no interior do tambor da máquina Los Angeles. A Figura 2.5 abaixo mostra a máquina do Abrasão Los Angeles utilizada nos ensaios.

Figura 2.5 – Máquina “Los Angeles” e carga abrasiva utilizada nos ensaios.



2.3.5 Treton

A resistência ao choque é um índice empregado para a diferenciação de materiais utilizados como agregado em pavimentos, pois esse tipo de esforço é muito comum nessa espécie de estrutura durante as passagens dos veículos. Dessa forma, o resultado do ensaio pode antever o comportamento do material quando aplicado como agregado graúdo. O ensaio consiste em amostra de vinte fragmentos escolhidos ao acaso com dimensões entre 16 a 19mm, depois da escolha dos fragmentos, eles são lavados e posteriormente secos em estufa entre 100 e 110°C, por 24 horas. Após resfriados os fragmentos, suas massas são verificadas, então, são colocados no aparelho Treton, onde são submetidos a 10 golpes provocados por queda livre de uma massa pesando 16kg e 380mm de um martelo cilíndrico padronizado. O material obtido é lavado em água corrente, em uma peneira de abertura 1,7mm até que fique livre de pó, sendo secos em estufa entre 100 e 110°C, por mais 24 horas. Depois é novamente resfriado e verificada a sua massa. Esse ensaio foi realizado por meio do método DNER-ME 399/99. A Figura 2.6 abaixo mostra máquina do Treton utilizada nos ensaios.

Figura 2.6 – Aparelho Treton



2.3.6 Ensaio de sanidade

Este ensaio simula os danos provocados pelas intempéries após anos de exposição do material ao meio ambiente. As amostras foram submetidas a cinco ciclos de imersão em solução de sulfato de sódio e secagem em estufa. A avaliação da resistência à desintegração química dos agregados foi realizada por meio do método de ensaio DNER-ME 089/94. Essa norma recomenda avaliar a porcentagem em massa de resíduos coletados em relação à massa total do corpo de prova e observar as modificações ocorridas. A Figura 2.7 mostra os materiais e a solução utilizada no ensaio.

Figura 2.7 – Ensaio de Durabilidade com utilização de sulfato de sódio: detalhe das amostras em banho-maria (DNER-ME 089/94)



2.3.7 Adesividade ao ligante asfáltico

O ensaio consiste na submersão da amostra em água destilada a 40°C durante um período de 72 horas e verificação visual se há ou não o deslocamento da película de ligante. O método empregado para avaliar a adesividade dos agregados ao ligante asfáltico foi o DNER-ME 078/94. Para essa pesquisa, foi utilizado como ligante o CAP 50/70 fornecido pela REGAP. A Figura 2.8 mostra os materiais e o recipiente utilizado no ensaio.

Figura 2.8 – Avaliação da adesividade entre o agregado e o ligante asfáltico CAP 50/70



2.3.8 Densidade real, aparente e absorção do agregado graúdo e agregado miúdo

As propriedades de massa específica aparente, absorção e porosidade aparentes dizem muito sobre a qualidade do material em relação à sua utilização como material nos pavimentos. A densidade e absorção dos agregados graúdos (material retido na peneira de 4,8 mm) foram determinadas segundo a norma DNER-ME 081/98. Foi utilizado o método do DNER-ME 084/95 para determinar a densidade real dos agregados miúdos. A Figura 2.9 apresenta a balança e os recipientes utilizados no ensaio.

Figura 2.9– Balanças para a determinação da densidade, massa específica, absorção e porosidade



2.3.9 Densidade real do fíler

A densidade real do fíler foi determinada utilizando o frasco Le Chatelier, conforme metodologia DNER-ME 085/94. Para a realização do ensaio é necessário fazer a pesagem da amostra seca, que posteriormente é colocada dentro do frasco contendo querosene. O volume de querosene deslocado dentro do frasco durante o ensaio é definido como sendo o volume real do fíler. As leituras do volume inicial e final devem ser feitas

para a mesma temperatura, por isso os frascos são colocados dentro do equipamento denominado “banho-maria”. As Figuras 2.10 e 2.11 apresentam os frascos Le Chatelier e recipiente de banho-maria utilizados no ensaio.

Figura 2.10 – Ensaio para determinação da densidade real do filer



Figura 2.11 – Frascos Le Chatelier dentro do banho-maria para controle da temperatura durante a realização do ensaio



2.3.10 Equivalente de areia

Esse ensaio determina a proporção relativa de argila ou pó em agregados miúdos, por meio de uma relação volumétrica que corresponde à razão entre a altura do nível superior do agregado sedimentado e a altura do nível superior da suspensão argilosa de uma determinada quantidade do material. O ensaio consiste em colocar uma amostra de agregado em uma proveta contendo solução flocculante. Posteriormente, o conjunto é agitado horizontalmente por 30 segundos e, após completar a proveta com a solução até um nível predeterminado, deixado em repouso por 20 minutos. Após o período de repouso, é feita a leitura da altura do nível superior da argila em suspensão e da altura do nível superior da areia. O equivalente de areia foi determinado conforme o método DNER-ME 054/97. Foram realizados três ensaios, pois o resultado final para determinação do equivalente de areia (EA) é a média aritmética dos três ensaios. A Figura 2.12 apresenta as buretas utilizadas no ensaio.

Figura 2.12 – Ensaio para determinação do equivalente de areia (EA) do agregado convencional



2.4 Moldagem de Corpos de Prova de Concreto Asfáltico Usinado a Quente - CAUQ

As moldagens dos corpos de prova foram feitas sob a responsabilidade do graduando, de acordo com o método Marshall, conforme a norma DNER-ME 043/95 (Misturas betuminosas a quente – Ensaio Marshall). Todas as misturas realizadas no laboratório foram determinadas no projeto de pesquisa de acordo com as especificações contidas na norma DNIT 031/2006. Os técnicos do laboratório e os professores orientadores tinham como tarefa auxiliar o graduando a controlar as temperaturas do agregado e do ligante, pesagem da massa de cada componente da mistura (Figura 2.13) e também o controle do tempo da usinagem. As misturas foram feitas manualmente, em uma panela sobre um fogão a gás (Figura 2.14). Esses processos foram executados cuidadosamente e todos envolvidos nos experimentos que usaram EPI's adequados.

Figura 2.13 – Pesagem do ligante asfáltico utilizado na elaboração do corpo de prova



Figura 2.14 – Confeção manual das misturas asfálticas



Como o processo de usinagem das misturas asfálticas é realizado em altas temperaturas e com materiais tóxicos (ligante asfáltico), o graduando passou por um treinamento prévio, sempre com a supervisão do orientador e dos técnicos do laboratório. Para a determinação da moldagem dos corpos de provas de CAUQ pela metodologia Marshall, foram utilizados os moldes cilíndricos de aproximadamente 10cm de diâmetros e 8cm de altura. As misturas (Figura 2.15) eram feitas e colocadas na estufa por um período de duas horas, com o objetivo de simular o efeito de envelhecimento do ligante asfáltico a curto prazo na rodovia.

Figura 2.15 – Mistura asfáltica pronta para ser colocada na estufa por um período de duas horas



Em seguida, a mistura é colocada no molde cilíndrico e aplicam-se 75 golpes em cada face do corpo de prova (CP). Após a compactação do corpo de prova, ele é colocado em cima de uma bancada para resfriar até atingir a temperatura ambiente. A extração do corpo de prova é feita com a utilização do extrator hidráulico de amostras. Caso os corpos de prova estivessem dentro das especificações de projeto (altura e diâmetro adequados), o CP's eram liberados para fazer os ensaios mecânicos. O laboratório tinha a capacidade de produzir sete corpos de prova por dia, que posteriormente eram identificados por números definidos pelo graduando.

3. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS

Os ensaios mecânicos auxiliam os projetistas de rodovias a avaliar, mesmo que de forma indireta ou aproximada, o comportamento das misturas asfálticas quando em condições de campo. A realização desses ensaios consiste em submeter as misturas asfálticas em condições que simulem os esforços que elas vão sofrer nas condições reais de uso, chegando a limites extremos ou não de solicitação. As propriedades mecânicas definem o comportamento de um material quando sujeito a esforços mecânicos e, com a análise de tensões e deformação, pode-se conhecer as características mecânicas do objeto. Para a realização dos ensaios mecânicos (módulo de resiliência e resistência à tração), os corpos de prova foram mantidos em um compartimento com a temperatura controlada de aproximadamente 25°C, por um período mínimo de 4 horas, até chegar à temperatura desejada para o ensaio.

Para a realização do ensaio mecânico (estabilidade e fluência Marshall), os corpos de prova foram mantidos também em um compartimento de “banho-maria” com a temperatura controlada de aproximadamente 60°C, por um período mínimo de 3 horas, até chegar à temperatura desejada para o ensaio. A caracterização mecânica dos CP's foi realizada mediante os ensaios: módulo de resiliência (MR), resistência à tração (RT) e estabilidade e fluência Marshall. Para a realização dos ensaios foi prevista a moldagem de 150 corpos de prova, com o objetivo de avaliar a influência do teor de ligante asfáltico e dos tipos de agregado no desempenho mecânico das misturas. Foram especificados seis tipos de teores de ligantes diferentes, incluindo o teor de projeto (TP) para cada resíduo utilizado no experimento, variando de 4,5% a 6,5%. A Figura 3.1 apresenta alguns corpos de provas elaborados nesta pesquisa.

Figura 3.1 – Os CP's moldados para a realização dos ensaios de caracterização mecânica



3.1 Módulo de Resiliência

Segundo Bernucci et al. (2008), os estudos sobre o comportamento resiliente dos materiais usados em pavimentação foram iniciados na década de 1930 com Francis Hveem, que foi o primeiro a relacionar as deformações recuperáveis (resiliência) com as fissuras surgidas nos revestimentos asfálticos. Foi ele também quem adotou o termo “resiliência”, que é definido classicamente como “energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações.”

O ensaio para determinação do módulo de resiliência (MR) em misturas asfálticas foi padronizado no Brasil pela DNER-ME 133/94 (DNER, 1994). Esse ensaio é realizado aplicando-se cargas repetidamente no plano diametral vertical de um corpo de prova de forma cilíndrica regular, conforme mostrado na Figura 3.2. A carga gera uma tensão de tração transversalmente ao plano de aplicação. Medem-se, então, o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada e à capacidade de suportar grandes cargas dentro da zona elástica, a uma temperatura média de 25°C, conforme mostrado na Figura 3.3. Os corpos de prova cilíndricos são de aproximadamente 10cm de diâmetro e 6,35cm de altura (Figura 3.3), moldados no compactador Marshall, o carregamento diametral gera um estado biaxial de tensões.

Figura 3.2 – Detalhe do corpo de prova durante a realização do ensaio de módulo de resiliência (MR)

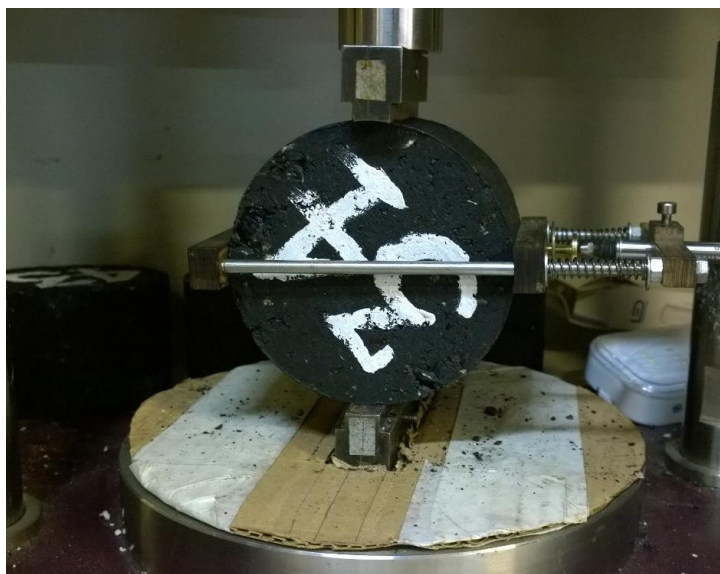


Figura 3.3 – Vista lateral do corpo de prova utilizado no ensaio de MR



3.2 Resistência à Tração

O ensaio de resistência à compressão diametral em misturas asfálticas, com a sigla (RT), foi padronizado no Brasil segundo a metodologia DNIT ME 136/2010. A aplicação das forças se dá por meio de frisos metálicos de 12,7mm de largura, com curvatura apropriada ao corpo de prova cilíndrico. A norma não considera a influência desses frisos no cálculo da RT. A expressão de resistência à tração usada pelo DNER assume comportamento unicamente elástico durante o ensaio e a ruptura do corpo de prova ao longo do diâmetro solicitado, sendo devido apenas às tensões de tração geradas. O friso é solicitado diametralmente por cargas uniformemente concentradas de compressão diametral, que em seguida gera uma tensão de tração uniforme por unidade de espessura perpendicularmente ao diâmetro solicitado, como mostrado na Figura 3.4. O cálculo da RT para as misturas asfálticas admite que o corpo de prova rompe devido à tensão de tração uniforme gerada ao longo do diâmetro solicitado, que se iguala à tensão máxima admissível do material. O CP permanece em regime elástico durante os primeiros segundos do ensaio até a ruptura, que por sua vez fica em regime plástico.

Figura 3.4 – Ensaio resistência à compressão diametral sendo realizado no Laboratório de Ferrovias e Asfalto



3.3 Estabilidade e Fluência Marshall

De acordo com Silva (2017), a Estabilidade Marshall é definida como a resistência máxima a compressão radial, apresentada pelo corpo de prova quando moldado e ensaiado de acordo com a metodologia citada abaixo. A indicação dessa força máxima normalmente é dada em Newton (N). O valor da fluência Marshall é obtido simultaneamente ao da estabilidade. Esse parâmetro é definido como sendo a deformação total apresentada pelo corpo de prova, desde a aplicação da carga inicial nula até a aplicação da carga máxima, expressa em décimos de milímetros. Os procedimentos adotados para a realização desse ensaio foram baseados na norma DNER ME 043/95. A Figura 3.5 abaixo mostra como é feito o ensaio.

Figura 3.5 – Ensaio de estabilidade e fluência Marshall sendo realizado no Laboratório de Ferrovias e Asfalto



4 RESULTADOS

4.1 Parâmetros Granulométricos

Todas as misturas foram preparadas de modo com que se enquadrassem na Faixa C do DNIT, como especificada pela norma DNIT ES 031/2006, sendo classificadas como Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ). Para se obter melhor controle da distribuição granulométrica dos corpos de prova, o agregado gnáissico e os resíduos de minério de ferro e de pedra-sabão foram peneirados e estocados separadamente, em recipientes plásticos, identificados para cada uma das peneiras especificadas pela Faixa C (peneiras de 3/4", 1/2", 3/8", n° 10, n° 40, n° 80, n° 200 e material passante na peneira n° 200).

No decorrer dessa etapa foram testadas várias composições granulométricas das misturas, combinando, assim, a granulometria de cada componente (brita 0, pó de pedra, resíduo de minério de ferro e resíduo de minério de serpentinito ‘pedra-sabão’), de modo a se obter a granulometria que se enquadrasse na faixa C. A curva granulométrica constituída, em cada peneira, foi obtida pelo somatório dos produtos das percentagens passantes em cada peneira pelas percentagens de contribuição de cada material na mistura. Essa metodologia foi adotada com o intuito de determinar uma combinação definitiva bem elaborada dos agregados para que as misturas alternativas possuam as características bem próximas das convencionais. Para cada uma das misturas contendo tanto resíduo de minério de ferro quanto resíduo de minério de serpentinito (pedra-sabão), a composição granulométrica foi elaborada de forma a aproveitar o máximo de resíduo em sua composição.

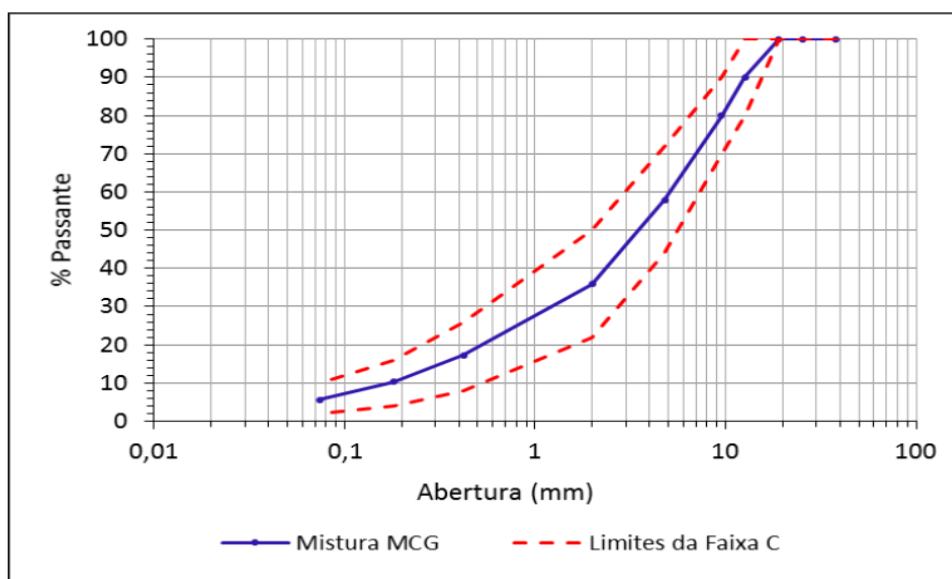
4.2 Mistura Comparativa

Inicialmente adotou-se a faixa de projeto utilizada por Silva (2017), quando foi elaborada uma mistura convencional, utilizando apenas o agregado gnáissico em sua composição, denominada por esse autor como MCG (Mistura Comparativa Gnaiss). A mistura foi composta basicamente do material selecionado das amostras de brita 0 e pó de pedra. A Tabela 4.1 apresenta a granulometria de projeto definida para a mistura citada, sendo a média das percentagens do limite inferior e superior da Faixa C, conforme mostrado na Figura 4.1.

Tabela 4.1 – Composição granulométrica da mistura MCG – Adaptado de Silva (2017)

Peneiras		% Passante		
n°/pol.	(mm)	Limite inferior	Limite superior	Faixa de Projeto
3/4"	19,1	100	100	100
1/2"	12,7	80	100	90
3/8"	9,5	70	90	80
n° 4	4,8	44	72	58
n° 10	2	22	50	36
n° 40	0,42	8	26	17
n° 80	0,18	4	16	10
n° 200	0,074	2	10	6

Figura 4.1 – Curva granulométrica da mistura MCG



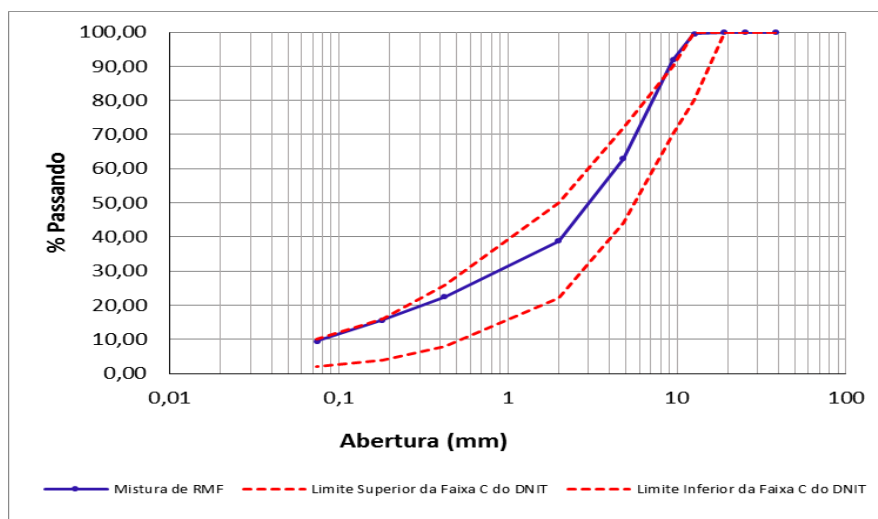
4.3 Mistura Contendo Resíduo de Minério de Ferro da Mina de Anglo American

Considerando a massa total dos agregados que compõem essa mistura asfáltica, o projeto de mistura dos agregados resultou em uma proporção de 48% de brita 0, 46% de pó de pedra e 6% de resíduo de minério de ferro, coletado pelo engenheiro responsável da empresa. Essa mistura foi definida como RMF (Concreto Asfáltico contendo o resíduo de minério de ferro da mina de Anglo American de Conceição de Mato Dentro). A Tabela 4.2 apresenta os valores usados para determinar a curva de projeto e a Figura 4.2 mostra a curva granulométrica enquadrada nos limites especificados para a Faixa C do DNIT.

Tabela 4.2 – Composição granulométrica da mistura asfáltica de RMF

Peneiras		% Passante			
		48% de Brita 0	46% de Pó de Pedra	6% de RMF	Faixa de Projeto
nº/poleg.	Mm				
3/4"	19,1	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,7	99,01	100,00	100,00	99,52
3/8"	9,5	83,27	100,00	100,00	91,97
4	4,8	23,44	99,51	100,00	63,02
10	2	2,60	68,52	100,00	38,77
40	0,42	2,20	33,47	99,86	22,44
80	0,2	1,92	19,75	93,30	15,61
200	0,075	1,24	10,49	68,10	9,51

Figura 4.2 – Curva granulométrica da mistura RMF



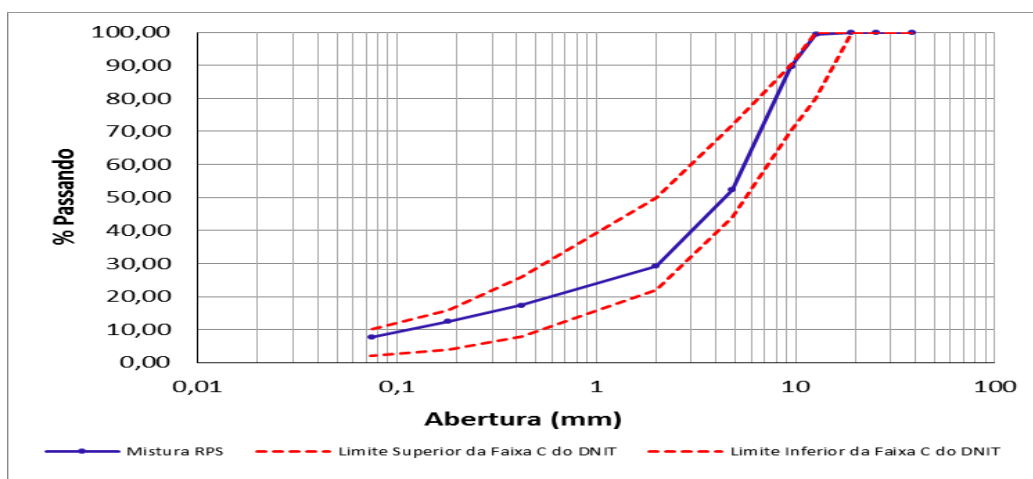
4.4 Mistura Contendo Resíduo de Minério de Serpentinó (Pedra-Sabão) da Empresa Indústria e Comércio São José Ltda.

Considerando a massa total dos agregados que compõem essa mistura asfáltica, o projeto de mistura dos agregados resultou em uma proporção de 62% de brita 0, 33% de pó de pedra e 5% de resíduo de minério de serpentinó (pedra-sabão), provenientes da empresa Indústria e Comércio São José Ltda. (Talcos e Painelas), coletados por equipe do laboratório de ferrovias e asfalto da UFOP, juntamente com o responsável técnico da empresa. Essa mistura foi definida como RPS (Concreto Asfáltico contendo o resíduo de pedra-sabão). A Tabela 4.3 apresenta os valores usados para determinar a curva de projeto e a Figura 4.3 mostra a curva granulométrica enquadrada nos limites especificados para a Faixa C do DNIT.

Tabela 4.3 – Composição granulométrica da mistura asfáltica de RPS

Peneiras		% Passante			
nº/poleg.	Mm	62% de Brita 0	33% de Pó de Pedra	5% de RPS	Faixa de Projeto
3/4"	19,1	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,7	99,01	100,00	100,00	99,39
3/8"	9,5	83,27	100,00	100,00	89,63
4	4,8	23,44	99,51	100,00	52,37
10	2	2,60	68,52	100,00	29,22
40	0,42	2,20	33,47	99,86	17,40
80	0,2	1,92	19,75	96,10	12,51
200	0,075	1,24	10,49	69,40	7,70

Figura 4.3 – Curva granulométrica da mistura RPS



4.5 Preparação dos Corpos de Prova

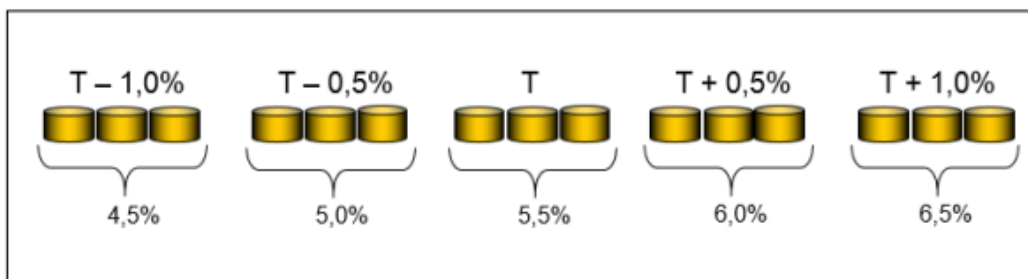
Para a preparação de corpos de prova foi utilizada a metodologia adotada por Silva (2017), quando foi possível definir as temperaturas de aquecimento do ligante, do agregado, das misturas e de compactação. Para as misturas, a temperatura adotada para o agregado foi $163 \pm 2^\circ\text{C}$, para o ligante $150 \pm 2^\circ\text{C}$ e para a compactação com $140 \pm 2^\circ\text{C}$. Para obter os valores estipulados pelo projeto, o controle da temperatura do ligante e dos agregados foi efetuado com a utilização dos termômetros a laser e de haste.

De acordo com Silva (2017), com o objetivo de simular o efeito do envelhecimento a curto prazo do ligante asfáltico (fenômeno de alteração das suas propriedades físico-químicas) e que ocorre durante as etapas de usinagem e espalhamento na pista e compactação, as misturas foram condicionadas durante 2 horas dentro de uma estufa à temperatura de 139°C , antes de serem compactadas, procedimento esse adotado pela metodologia Superpave. Durante a compactação por impacto foram aplicados 75 golpes por face do corpo de prova.

4.6 Teor de Projeto (TP)

Para este estudo foi utilizado o procedimento indicado por BERNUCCI et al. (2008), em que se estimou um teor de projeto “T” para cada mistura. Para o desenvolvimento desta pesquisa foi previsto um teor de projeto igual a 5,5% para todas as misturas. Em seguida, foram confeccionados quinze corpos de prova, sendo três réplicas para cada grupo, conforme mostrado na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Representação esquemática dos corpos de prova para determinação do teor de projeto – Adaptado de Silva (2017).



Com os cinco valores médios de Vv e RBV, deve-se traçar um gráfico contendo, no eixo das ordenadas, os valores do teor de ligante e, no eixo das abscissas, os valores de Vv e RBV, conforme apresentado na Figura 4.5. Adicionam-se então linhas de tendência para os valores encontrados dos dois parâmetros. O gráfico deve conter também os limites específicos das duas variáveis, representados pelas linhas tracejadas no gráfico. A partir da interseção das linhas de tendência de Vv e RBV com os limites respectivos de cada um desses parâmetros, são determinados quatro teores de ligante (X1, X2, X3 e X4). Assim, o teor de projeto (TP), também denominado teor ótimo, é definido como a média dos dois teores centrais, ou seja, $TP = (X2 + X3)/2$. As Figuras 4.6 e 4.7 apresentam o gráfico dos teores de projeto para resíduo de minério de ferro e resíduo de minério de serpentinito (pedra-sabão).

Figura 4.5 – Exemplo gráfico para determinação do teor de projeto baseado nos parâmetros Vv e RBV, conforme especificações do DNIT ES 031/2006 para camada de rolamento - Adaptado de Silva (2017).

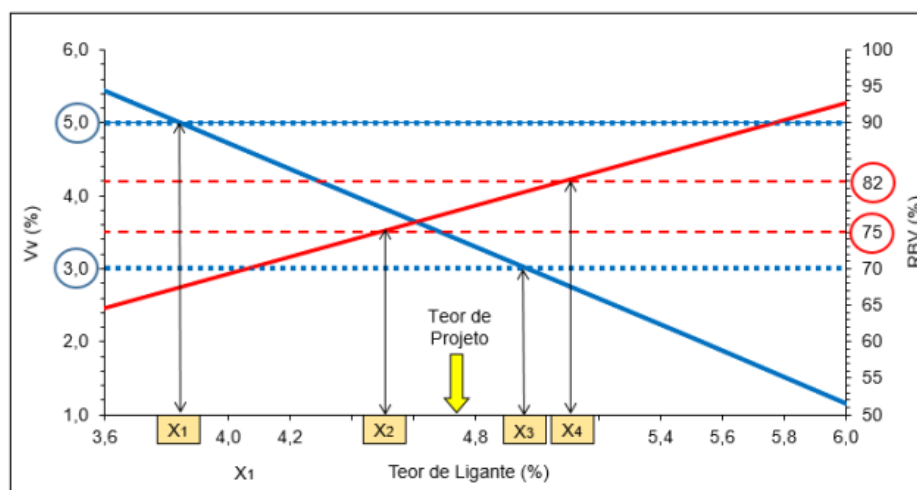


Figura 4.6 – Gráfico obtido para determinação do teor de projeto de resíduo de minério de ferro baseado nos parâmetros Vv e RBV, conforme especificações do DNIT ES 031/2006 para camada de rolamento.

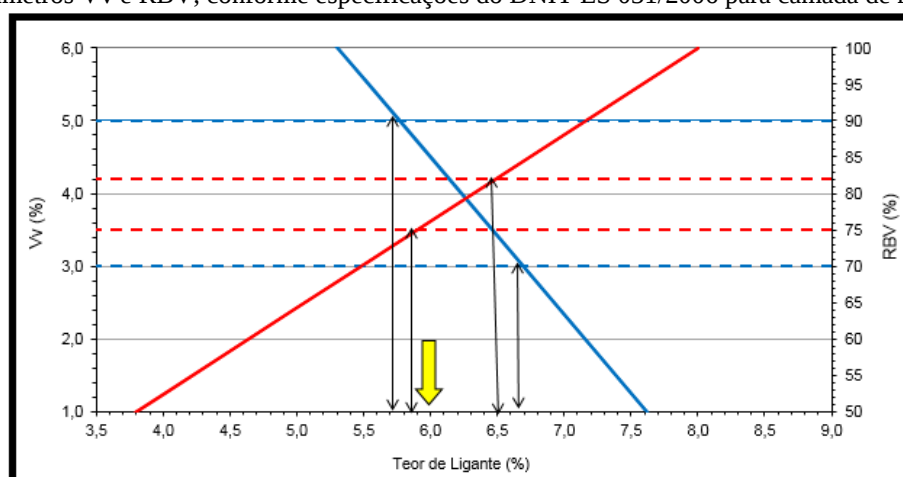
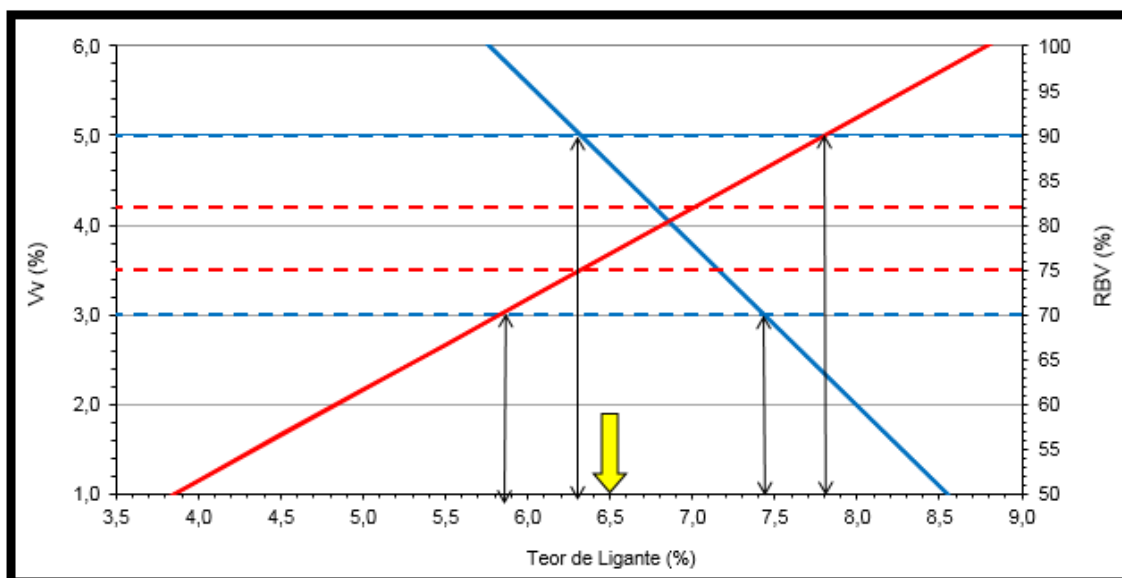


Figura 4.7 – Gráfico obtido para determinação do teor de projeto de resíduo de minério de serpentinito (pedra-sabão) baseado nos parâmetros V_v e RBV, conforme especificações do DNIT ES 031/2006 para camada de rolamento.



4.7 Resultados dos Parâmetros Volumétricos

Os resultados dos parâmetros volumétricos obtidos para as misturas avaliadas nesta pesquisa estão apresentados na Tabela 4.4. Nela constam o teor de ligante, a densidade máxima teórica (DMT), a densidade aparente (D_a), o volume de vazios (V_v), os vazios cheios com ligante asfáltico (VCB), os vazios no agregado mineral (VAM) e a relação betume/vazios (RBV). Os valores obtidos são referentes à média aritmética de três corpos de prova.

Tabela 4.4 – Valores médios dos parâmetros volumétricos obtidos para as misturas asfálticas

Mistura	Teor de Ligante (%)	DMT	Da	Vv (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)
RMF	4,5	2,61	2,4	7,87	10,71	18,64	57,45
	5,0	2,59	2,41	6,74	11,95	18,71	63,93
	5,5	2,56	2,43	5,25	13,25	18,53	71,52
	6,0	2,54	2,44	4,12	14,51	18,63	77,9
	6,5	2,52	2,42	3,87	15,54	19,47	80,29
RPS	4,5	2,606	2,382	8,606	10,63	19,22	55,34
	5,0	2,585	2,395	7,366	11,87	19,27	61,62
	5,5	2,564	2,409	6,036	13,15	19,13	68,74
	6,0	2,543	2,407	5,344	14,13	19,67	72,85
	6,5	2,522	2,393	5,132	15,43	20,55	75,08
MCG	4,5	2,487	2,368	4,78	10,57	15,37	68,78
	5,0	2,468	2,378	3,65	11,79	15,46	76,29
	5,5	2,45	2,406	1,8	13,13	14,91	88,04
	6,0	2,431	2,412	0,78	14,36	15,14	94,82
	6,5	2,413	2,395	0,75	15,44	16,21	95,27

Com base nos resultados obtidos dos experimentos, foi constatado que os maiores valores de densidade aparente das misturas foram encontrados para um teor de ligante igual a 6,0%, exceto para a mistura RPS, cujo valor da densidade aparente máxima refere-se à mistura com 5,5% de teor de ligante.

A sequência de Figuras 4.8, 4.9 e 4.10 é referente à representação gráfica dos parâmetros volumétricos obtidos para as misturas MCG, RMF e RPS, respectivamente.

Figura 4.8 – Propriedades volumétricas da mistura padrão MCG

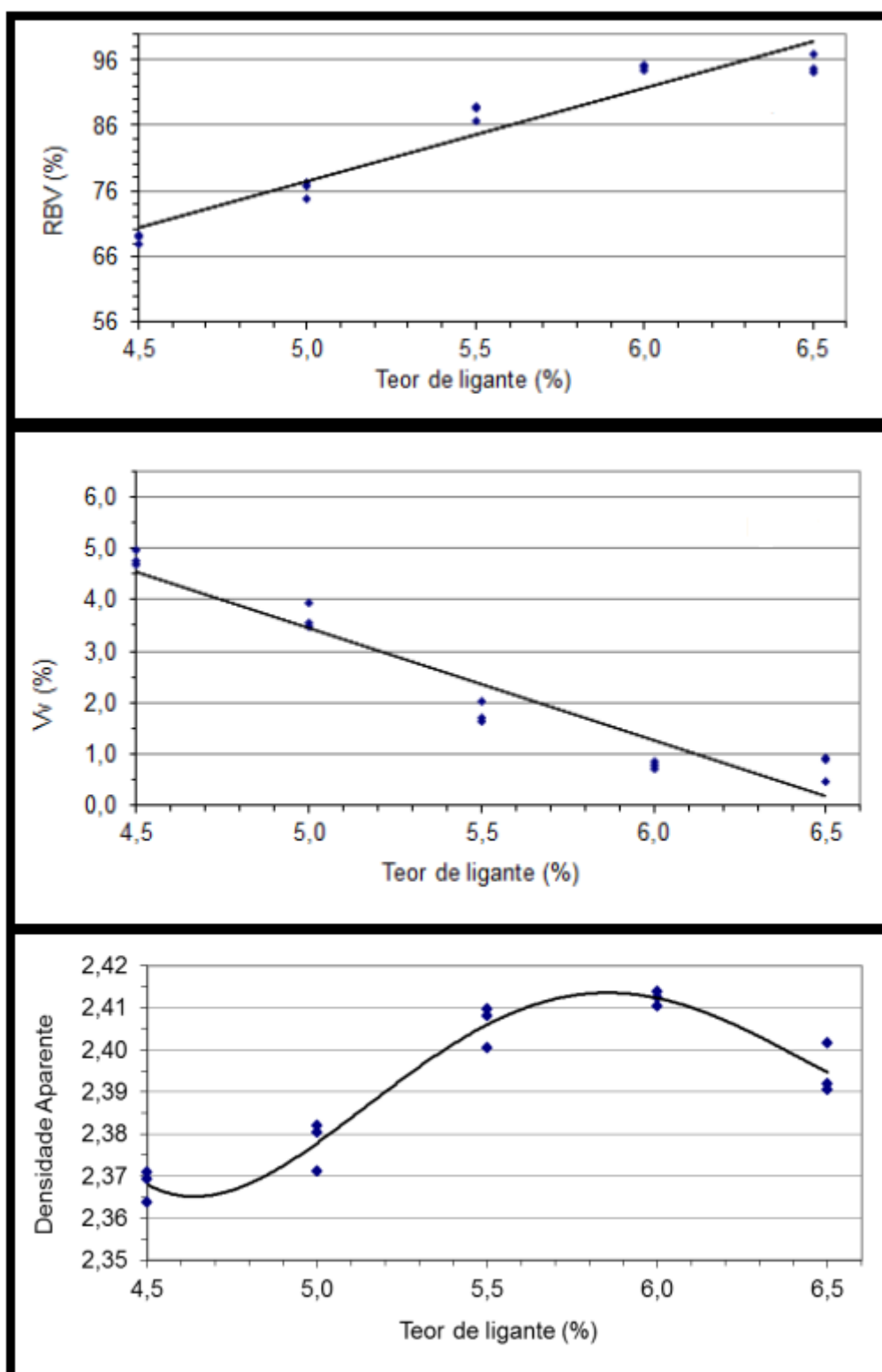


Figura 4.9 – Propriedades volumétricas da mistura RMF: composta com resíduo de minério de ferro proveniente da Mina de Anglo American, do município de Conceição do Mato Dentro

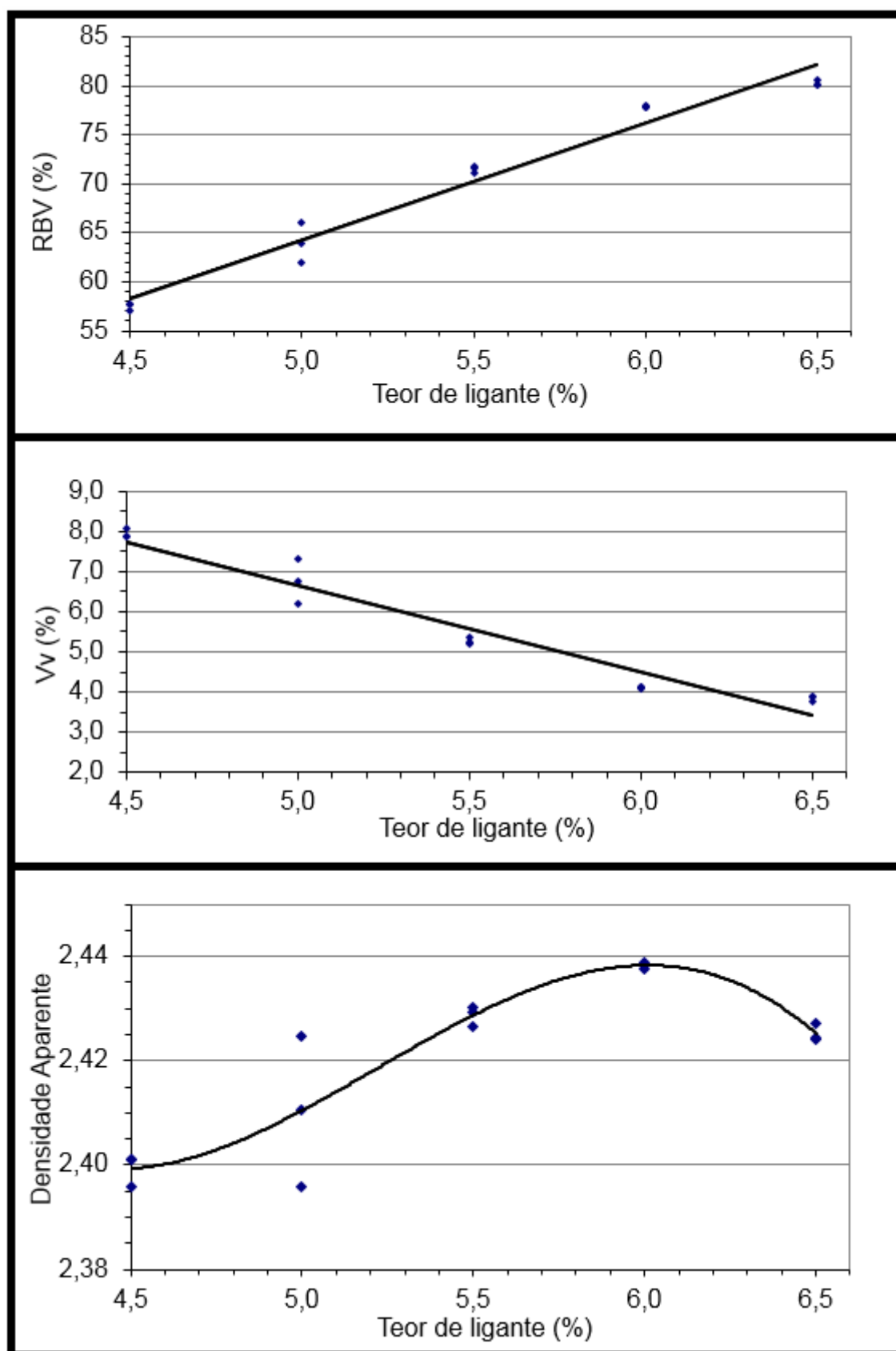
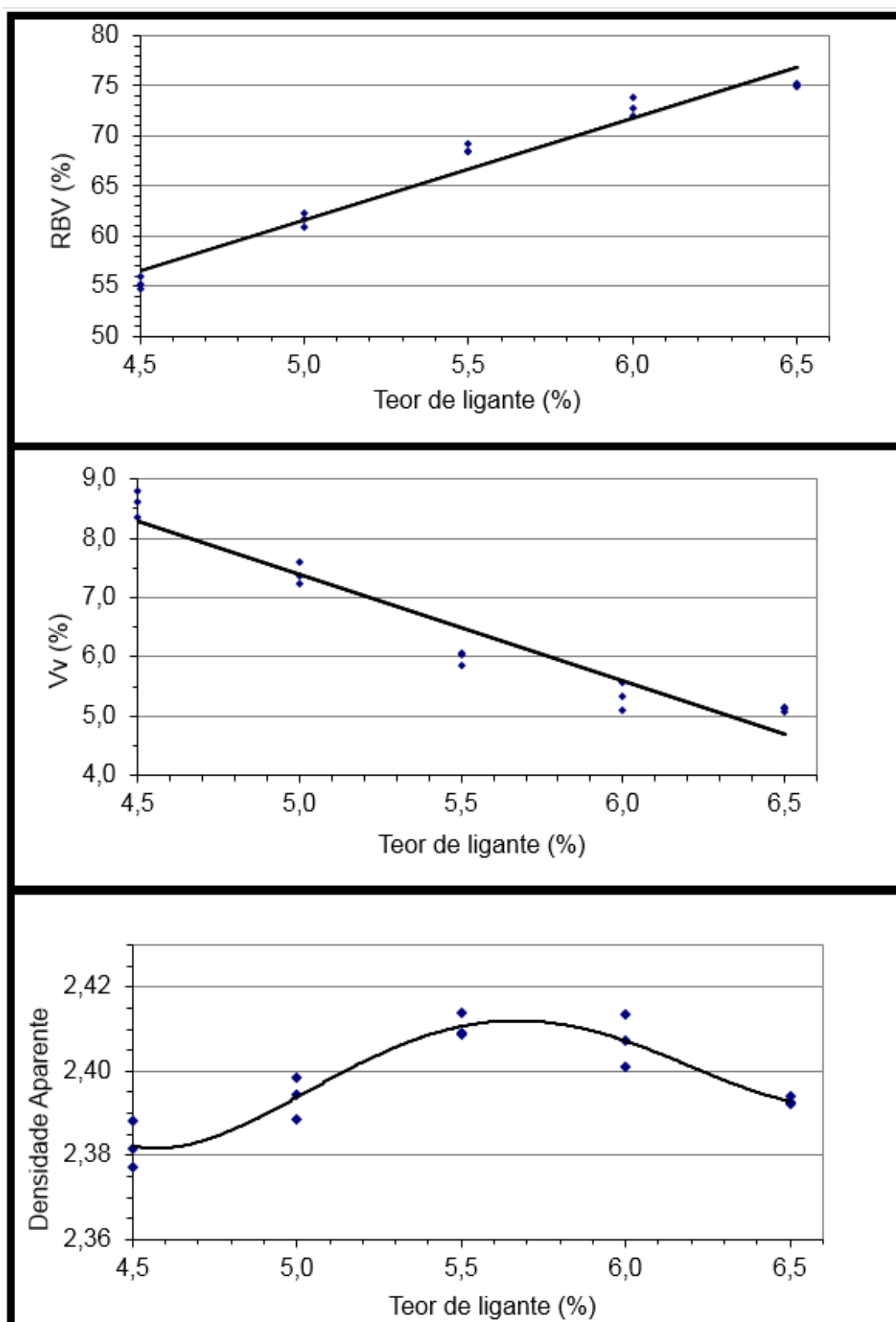
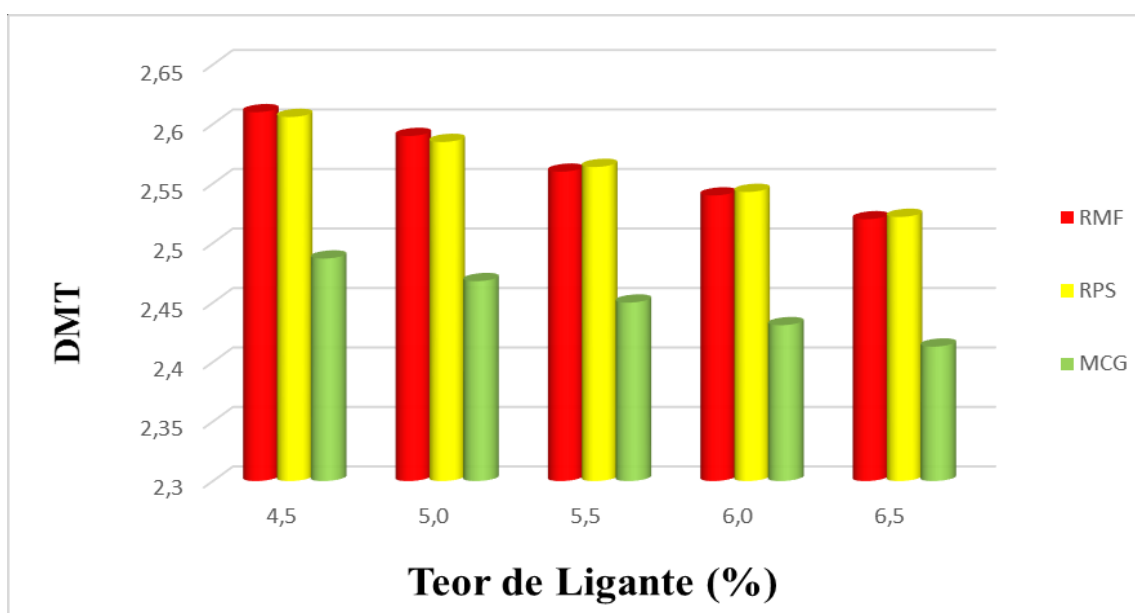


Figura 4.10 – Propriedades volumétricas da mistura RPS: composta com resíduo de minério de serpentinito (pedra-sabão) proveniente da Indústria e Comércio São José Ltda. (Talcos e Painelas), no distrito de Santa Rita, município de Ouro Preto/MG.



Ao comparar os resultados obtidos com a mistura MCG do trabalho desenvolvido por Silva (2017), as misturas de resíduos de minério de ferro e de pedra-sabão apresentaram um teor de projeto mais elevado. Os resultados apresentados na Figura 4.11 indicam que a substituição parcial do agregado convencional pelos resíduos de mineração (minério de ferro e minério de serpentinito (pedra-sabão)) aumentaram os valores de DMT das misturas. A alteração nos valores de DMT decorre devido aos elevados valores de densidade real dos resíduos de minério de ferro e resíduo de minério de serpentinito (pedra-sabão) em relação ao agregado gnáissico.

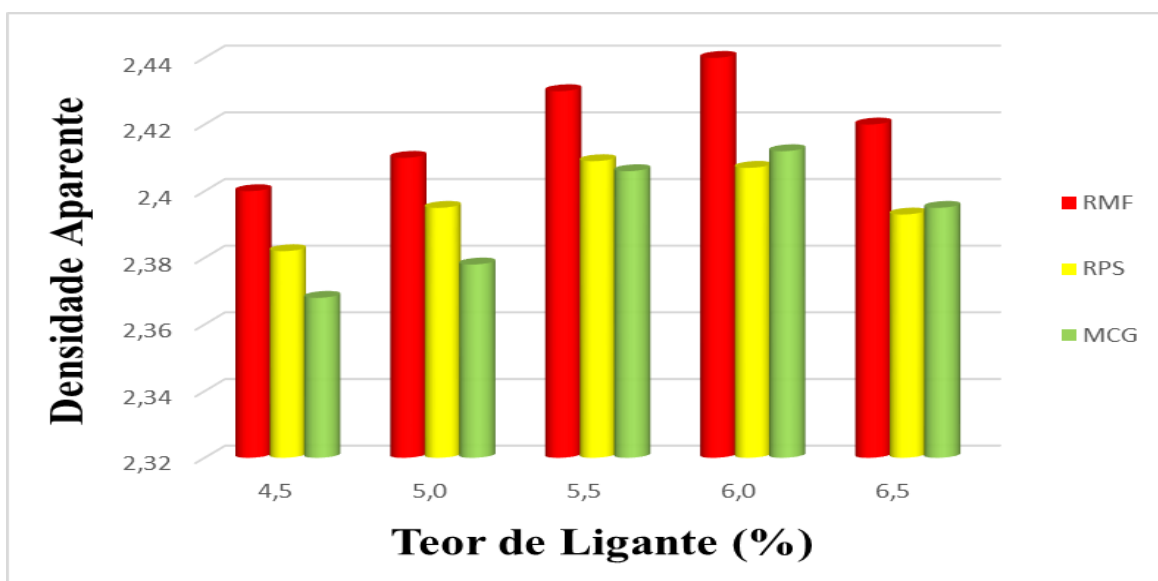
Figura 4.11 – Valores de DMT das misturas asfálticas em função do teor de ligante



A mistura RMF, composta com resíduo da mina da Anglo American, apresentou os maiores valores de DMT, por possuir alguns elementos de ferro na sua composição. Por coincidência, a mistura RPS obteve o segundo maior valor de DMT e a mistura com agregado convencional de gnaiss MCG obteve os menores valores de DMT.

Como antevisto, as misturas contendo resíduo de minério de ferro possuem densidade mais elevada em relação às aquelas contendo resíduos de minério de serpentinito (pedra-sabão) e a convencional de agregado gnaiss, por possuir os elementos ferro em sua composição. A Figura 4.12 apresenta uma relação entre os valores da densidade aparente e o teor de ligante, agrupado por misturas.

Figura 4.12 – Densidade aparente das misturas asfálticas em função do teor de ligante.



Com base nos resultados de densidade aparente apresentada na Figura 4.12 acima, a mistura RMF obteve os maiores valores de densidade aparente em todos os teores; a mistura MCG obteve segundos maiores valores nos teores de 6,0% e 6,5%; enquanto que a mistura RPS obteve os segundos maiores valores nos teores de 4,5%, 5,0% e 5,5%. Considerando a média geral de todas as misturas, foi possível verificar que a mistura contendo RMF obteve maiores valores da densidade aparente, a mistura RPS obteve o segundo maior valor e a mistura MCG apresentou o menor valor médio considerando todos os teores.

Fazendo a comparação das misturas contendo resíduos de minério de ferro (RMF) e minério de serpentinito ‘pedra-sabão’ (RPS), a mistura RMF apresentou maiores valores da densidade aparente em todos os teores, enquanto que a mistura RPS obteve menor valor devido à sua baixa densidade. De acordo com os resultados obtidos na caracterização dos agregados, verificou-se que o resíduo de minério de ferro obteve maior valor da densidade real comparando-o com todos os materiais estudados nesta pesquisa. Com isso, é possível afirmar que os valores da densidade aparente da mistura RMF tende a ser maior comparando-a com a mistura RPS, devido à presença de pequenas partículas de ferro no resíduo de minério de ferro.

A mistura RPS (composto com resíduo de minério de serpentinito ‘pedra-sabão’) apresentou os maiores valores de volume de vazios (V_v) em relação às outras misturas asfálticas, se comparados por um mesmo teor de ligante, conforme mostrado na Figura 4.13. Os valores de VAM encontrados para as misturas analisadas ficaram entre 15,14% a 20,55%, sendo que os maiores valores de VAM são referentes ao teor de 6,5% de asfalto, como mostra a Figura 4.14.

Durante a dosagem Marshall dos corpos de prova, constatou-se visualmente excesso superficial de ligante asfáltico para as misturas com os teores variando de 6,0 a 6,5% de CAP, com aparência brilhante e pegajosa ao toque. Enquanto que as misturas contendo os teores 4,5%, 5,0% e 5,5% de ligante asfáltico exibiram uma aparência com pouco brilho e as superfícies ficaram menos pegajosas comparando-as com os teores de 6,0% e 6,5%. Esses por sua vez ficaram fáceis de manejar nos ensaios de caracterização mecânica, facilitando, assim, para o operador no decorrer dos experimentos.

Figura 4.13 – Relação entre o V_v e o teor de ligante para cada mistura asfáltica

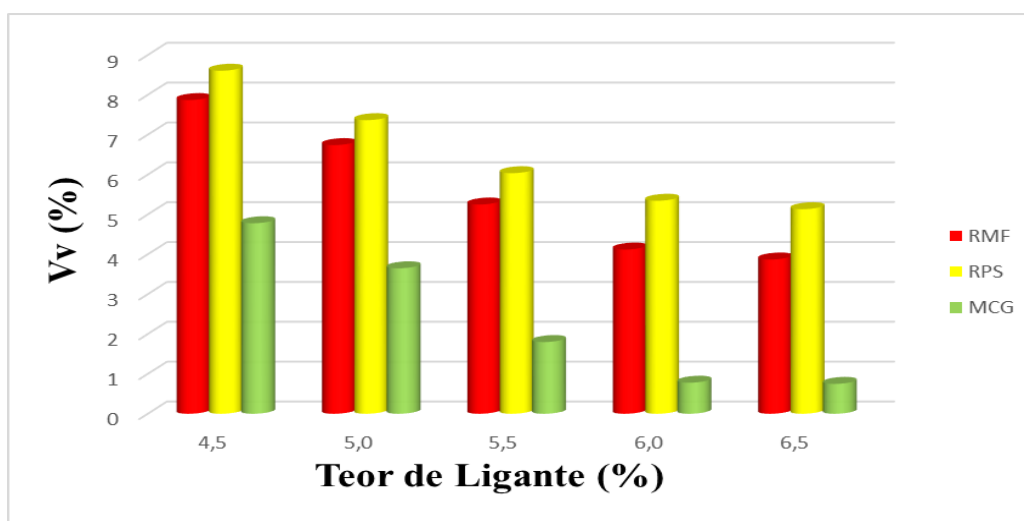
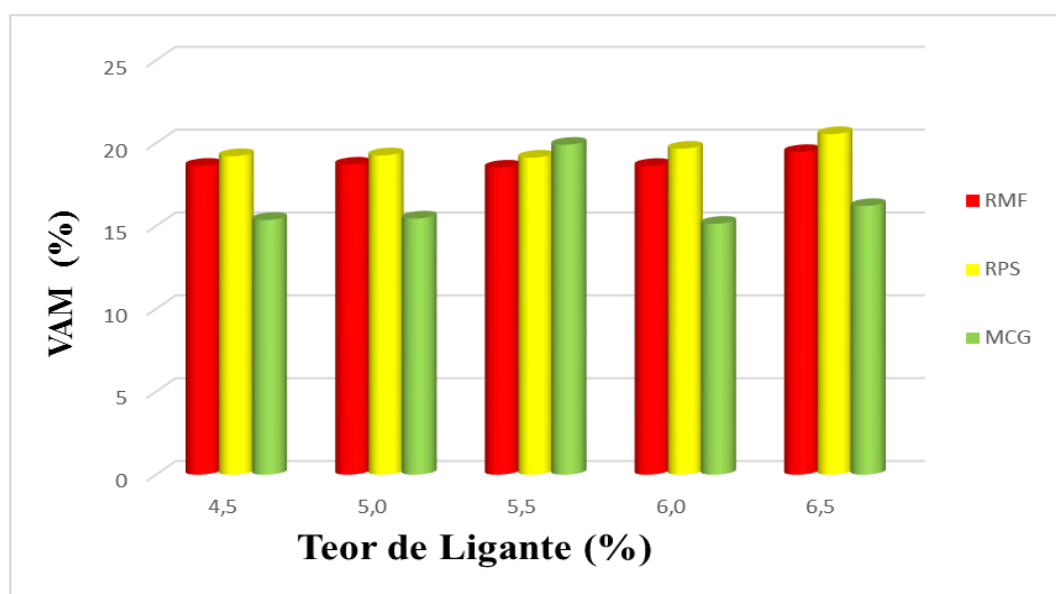


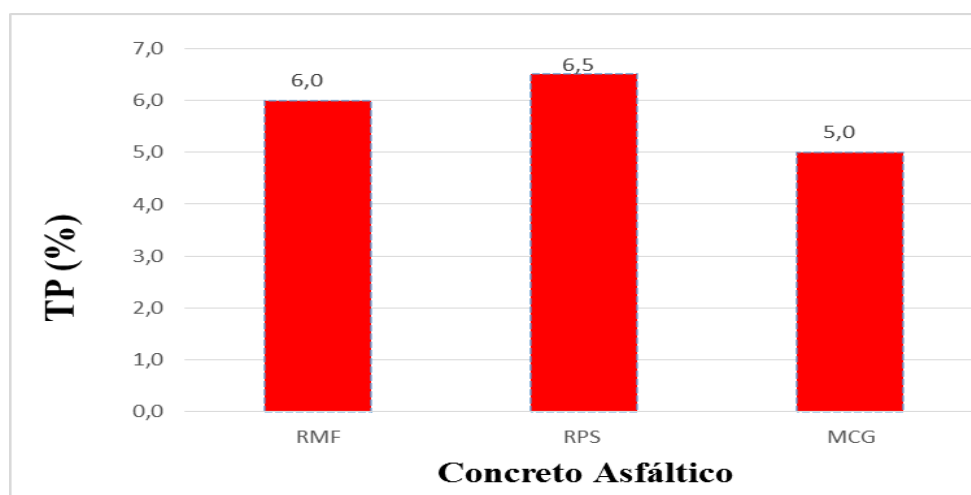
Figura 4.14 – Relação entre o VAM e o teor de ligante



4.8 Determinação e Avaliação dos Teores de Projeto

De acordo com os parâmetros volumétricos descritos na Tabela 4.4, foi possível determinar o teor de ligante de projeto para cada mistura, conforme exposto no tópico do seu teor. A Figura 4.15 indica o teor de projeto (TP) obtido para cada mistura.

Figura 4.15 – Resultado dos teores de projeto (TP) determinados para cada mistura



A mistura RMF apresentou TP igual a 6,0%, enquanto a mistura RPS obteve TP igual a 6,5%. Consequentemente, as misturas comparativas apresentaram um aumento no valor do teor de projeto (TP) se comparadas à mistura MCG. Os valores médios dos parâmetros volumétricos das misturas asfálticas dosadas com seus respectivos teores de projeto estão apresentados de acordo com a Tabela 4.5 abaixo.

Tabela 4.5 – Resultado dos parâmetros volumétricos das misturas asfálticas no teor de projeto

Mistura	Teor de Projeto (%)	DMT	Da	Vv (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)
RMF	6,0	2,54	2,44	4,12	14,51	18,63	77,9
RPS	6,5	2,52	2,39	5,13	15,43	20,55	75,08
MCG	5,0	2,47	2,38	3,5	11,79	15,46	76,29

De acordo com os resultados dos parâmetros volumétricos das misturas asfálticas para os teores de projetos encontrados e apresentados na Tabela 4.5, foi possível avaliar e comparar a mistura padrão (MCG) com as misturas alternativas contendo resíduos (RMF e RPS). Em face disso, foi constatada uma pequena alteração na quantidade de ligante asfáltico e uma elevada alteração nos finos de agregado convencional para as misturas alternativas contendo resíduos (RMF e RPS). Dessa forma, foi sugerida a substituição parcial dos finos do agregado convencional por resíduos estudados neste trabalho.

Observou-se que, quanto menor for o valor do teor de projeto das misturas, menores serão os valores de VAM, como consta nos resultados mostrados na Tabela 4.5. Segundo a literatura, Gouveia (2006) e Silva (2017) destacaram que, quando o valor do VAM é alto, o teor de asfalto adicionado à mistura também é alto, para satisfazer a condição de Vv em torno de 4%. Ainda que a análise correta deva ser feita levando em consideração o teor de ligante efetivo da mistura (descontando a parcela de ligante absorvida pelos poros dos agregados), podemos inferir que, para agregados com baixa absorção de água (como é o caso do gnaiss utilizado neste trabalho), os valores de densidades reais e efetivas de agregados com baixa absorção são teoricamente iguais.

Na composição do concreto asfáltico usinado a quente, o ligante asfáltico é considerado como o material mais nobre na mistura, devido a seu preço no mercado que é bem caro, comparado com agregados pétreos convencionais. Com a inclusão de resíduos de minério de ferro e de pedra-sabão nas misturas, observou-se um aumento significativo no valor do TP das misturas, o que provoca um aumento no consumo de ligante asfáltico.

4.9 Resultados dos Ensaios Mecânicos

4.9.1 Resultados do Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT)

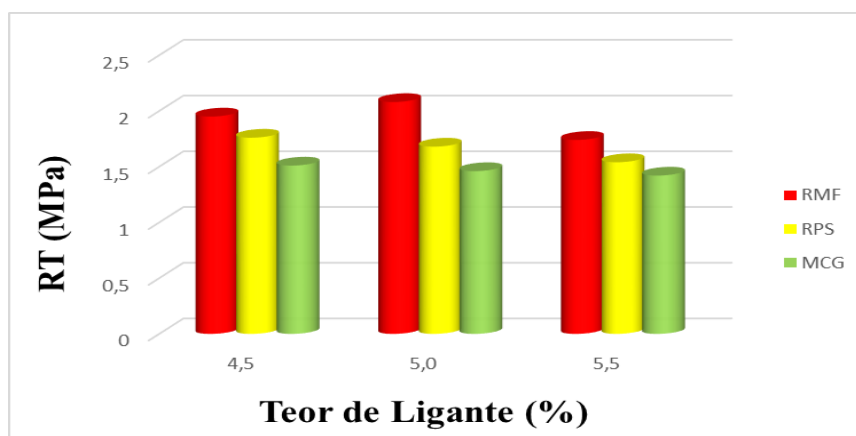
De acordo com Silva (2017), entre os principais defeitos verificados nos pavimentos flexíveis do Brasil, o trincamento resultante do fenômeno da fadiga tem sido apontado como predominante. A resistência à tração do revestimento asfáltico é um dos parâmetros mecânicos que procura limitar esse dano, ou seja, procura-se obter computacionalmente uma tensão de tração na fibra inferior do revestimento que seja suficientemente menor do que a resistência à tração do corpo de prova submetido ao ensaio de compressão diametral.

Na Tabela 5.1 encontram-se apresentados todos os resultados dos valores médios de RT obtidos para as misturas. A Figura 5.1 apresenta os resultados do ensaio de RT agrupados por teor de ligante. Foram utilizados os resultados de RT da mistura comparativa MGC referentes à média aritmética de três teores de ligante e os demais resultados de RT das misturas alternativas são referentes à média aritmética de cinco teores das amostras. Com isso, foi constatado o menor valor de desvio padrão para a mistura RMF, com o teor de ligante de 6,0%, e a maior variação nos resultados de RT observados foi para a mistura RPS com o teor de ligante de 4,5%. Com os resultados de RT encontrados, verificou-se que a mistura RMF com o teor de ligante de 5,0% possui o maior valor e a mistura RPS com o teor de ligante de 6,5% obteve o menor valor. Nota-se, pelos baixos valores dos desvios padrão em relação aos valores da média, a indicação de uma boa reprodução dos valores dos ensaios.

Tabela 5.1 – Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral a 25°C

Mistura	Teor de Ligante (%)	RT (MPa)	Desvio Padrão
RMF	4,5	1,95	0,095
	5,0	2,08	0,013
	5,5	1,74	0,023
	6,0	1,45	0,008
	6,5	1,26	0,046
RPS	4,5	1,76	0,166
	5,0	1,68	0,138
	5,5	1,54	0,093
	6,0	1,43	0,025
	6,5	1,21	0,030
MCG	4,5	1,51	0,046
	5,0	1,46	0,054
	5,5	1,42	0,097

Figura 5.1 – Representação gráfica dos valores médios de RT das misturas utilizadas nesta pesquisa



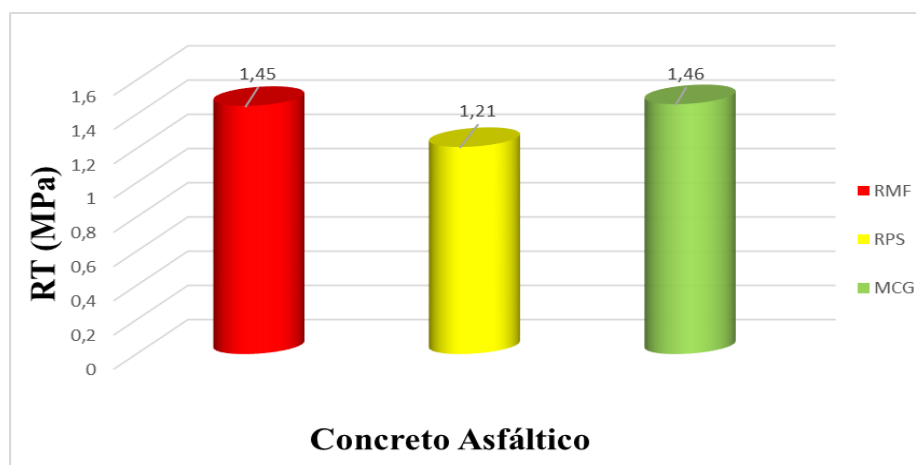
Todas as misturas estudadas no projeto apresentaram valores de resistência à tração superiores ao limite mínimo de 0,65 MPa, especificado pelo DNIT para revestimento asfáltico. Com os valores obtidos de RT como consta na Tabela 5.1, foi possível verificar que o aumento do teor de CAP 50/70 induziu a uma diminuição nos valores de RT para a mistura de referência (MCG) e para as misturas contendo resíduos (RMF e RPS).

Com a incorporação dos resíduos de minério de ferro e de pedra-sabão nas misturas asfálticas, incrementou-se a sua resistência à tração. O impulso nos valores de RT pode estar associado ao aumento dos pontos de contato intergranular das misturas asfálticas, provenientes da modificação da composição granulometria, mesmo que as

variações estejam dentro dos limites especificados pela Faixa C do DNIT. Os resíduos desses materiais, por serem mais finos do que o pó de pedra da brita gnaisse, preencheram os vazios e diminuíram as tensões de contato entre os grãos maiores. Vale ressaltar que a adição de material fino na mistura asfáltica não significa necessariamente em aumento da resistência mecânica. Poderá existir uma quantidade significativa a partir da qual a incorporação de resíduos causará uma diminuição da resistência mecânica devido à perda de contato intergranular dos grãos maiores, causada pelo excesso de material fino.

A Figura 5.2 apresenta os valores de RT das misturas asfálticas com seus respectivos teores de projeto, ou seja, o teor de ligante definido para a execução do revestimento asfáltico em campo. Comparando os valores de RT das misturas alternativas (RMF e RPS), nos teores de projeto, com os valores das misturas asfálticas convencional (MCG) feitas por Silva (2017), percebe-se que as misturas contendo resíduo de minério de ferro apresentou-se a segunda melhor resistência aos esforços de tração, a de pedrasabão apresentou o menor valor e a mistura convencional apresentou o maior valor de RT.

Figura 5.2 – Valores médios de RT das misturas no teor de projeto



4.9.2 Resultados do ensaio de Módulo de Resiliência (MR)

De acordo com Assis (2002), a temperatura de ensaio, o tipo de resíduo e o teor de ligante são as variáveis a serem utilizadas na avaliação do módulo de resiliência das misturas asfálticas. O valor do módulo de resiliência representativo a ser adotado foi baseado em análises estatísticas para pequenas amostras. Os resultados de todos os valores médios obtidos nos ensaios de módulo de resiliência (MR) das misturas realizadas

neste estudo estão demonstrados na Tabela 5.2, que apresenta os valores médios de MR dos ensaios a 25 e 30°C referentes a cada teor de ligante e a relação entre MR e RT referentes a 25°C. As Figuras 5.3 a 5.5 apresentam as médias dos resultados do ensaio de módulo de resiliência por compressão diametral cíclica das amostras, agrupadas por temperatura de ensaio e por tipo de mistura asfáltica, enquanto que a sequência de Figuras 5.6 a 5.7 faz um comparativo dos resultados de módulo de resiliência obtidos para todas as misturas agrupadas por temperatura de ensaio e teor de ligante.

Para cada corpo de prova foram determinados três valores de MR devido a três ciclos de aplicação da carga, tendo o software já calculado o valor médio de cada CP, que é a média aritmética dos três valores de Mr. Para cada teor de ligante foram moldadas três amostras da mistura MCG e cinco amostras para cada mistura alternativa (RMF e RPS). A avaliação estatística, para cada teor de ligante, corresponde aos resultados de nove valores para a mistura MCG e quinze valores de módulo de resiliência para as demais misturas, com nível de confiança de 95%. De posse do número de amostras, desvio padrão e nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$), é calculado o intervalo de confiança, adotando-se o valor médio correspondente ao intervalo de confiança, caso sejam obtidos valores fora do intervalo, ele deverá ser descartado.

Tabela 5.2 - Apresentação dos resultados dos ensaios de MR das misturas elaboradas com CAP 50/70 e os valores médios da relação MR/RT

Mistura	Teor de Ligante (%)	MR (MPa)		MR/RT (25°C)
		25°C	30°C	
RMF	4,5	12029	10658	3508
	5,0	11909	9465	3290
	5,5	10433	6574	3724
	6,0	6867	5799	3150
	6,5	8337	4614	5158
RPS	4,5	12550	8678	3884
	5,0	12273	11722	3859
	5,5	16198	8712	2966
	6,0	9650	7413	4776
	6,5	8910	5660	5373
MCG	4,5	6773	3367	4485
	5,0	6431	3121	4405
	5,5	4483	2723	3157

Figura 5.3 - Resultados do módulo de resiliência da mistura contendo resíduo de minério de ferro da mineração de Anglo American de Conceição de Mato Dentro em função do teor de ligante asfáltico e da temperatura de ensaio

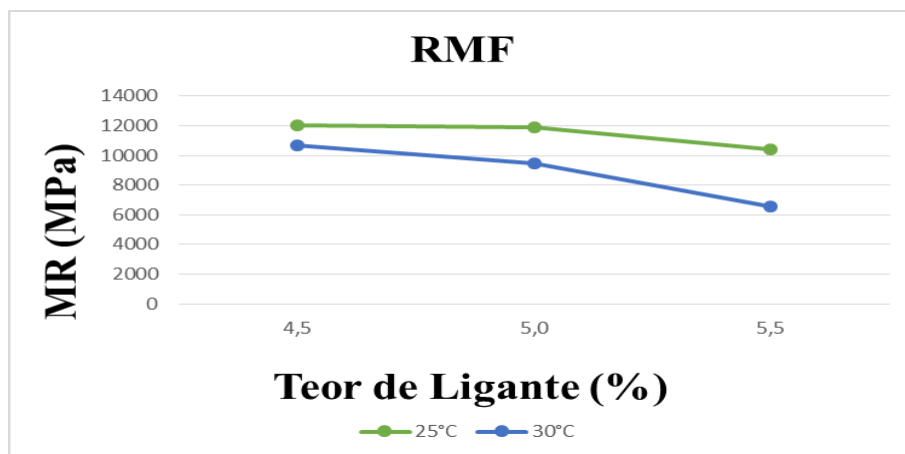


Figura 5.4 - Resultados do módulo de resiliência da mistura contendo resíduo de minério de serpentinito (pedra-sabão) da empresa Indústria e Comércio São José Ltda, no distrito de Santa Rita de Ouro Preto, em função do teor de ligante asfáltico e da temperatura de ensaio.

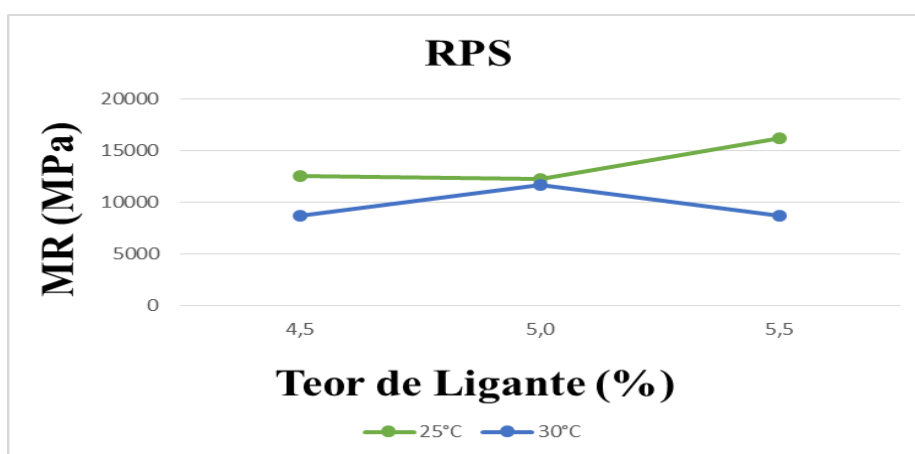


Figura 5.5 – Resultados do módulo de resiliência da mistura contendo agregado convencional de gnaiss da empresa Irmãos Machado, do distrito de Amarantina de Ouro Preto, em função do teor de ligante asfáltico e da temperatura de ensaio.

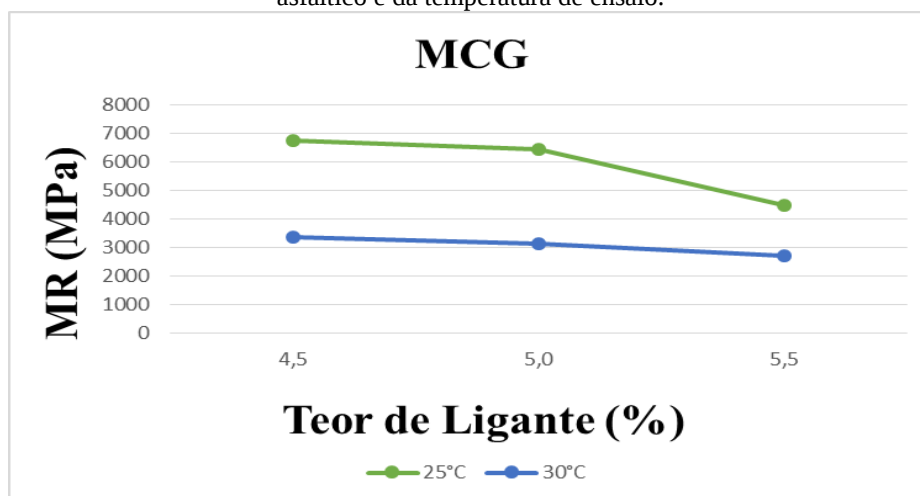


Figura 5.6 - Resultados dos ensaios de MR a 25° C agrupados por teor de ligante.

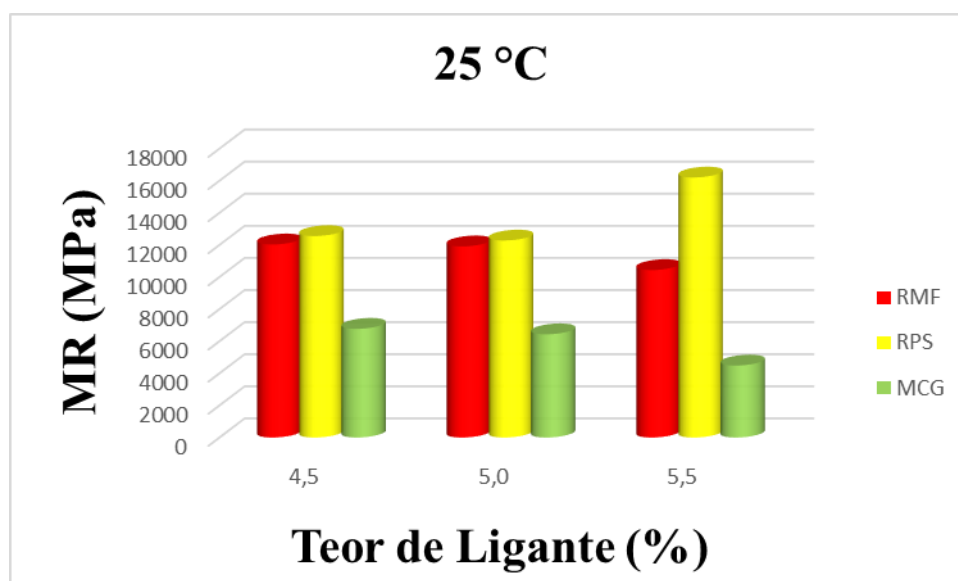
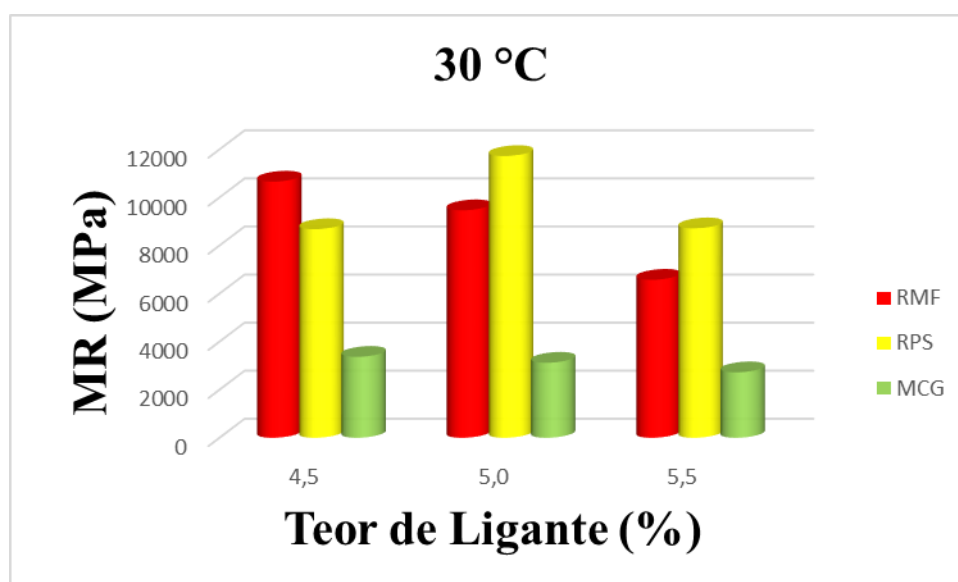


Figura 5.7 - Resultados dos ensaios de MR a 30° C agrupados por teor de ligante.



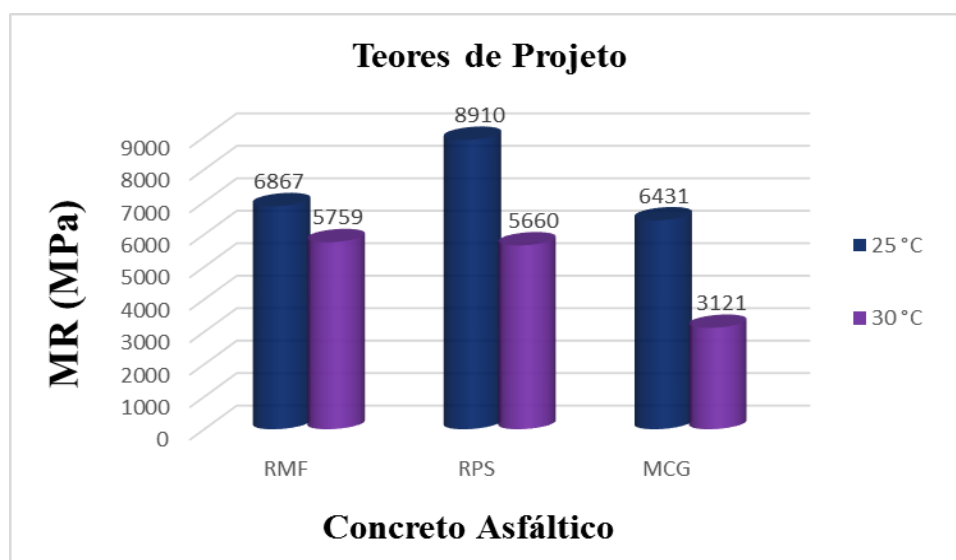
Baseado em resultados dos ensaios realizados a 25 e 30°C, mostrados nas Figuras 5.3 a 5.5, pode-se dizer que a variação no teor de ligante teve uma ligeira diminuição na rigidez das misturas. De acordo com Medina e Motta (2015) *apud* Silva (2017), os autores afirmam que o módulo de resiliência de misturas asfálticas é influenciado pelo tipo de ligante asfáltico e granulometria dos agregados, de forma acentuada, sendo menor a influência do teor de ligante. Também se pode concluir que a temperatura é um fator que atua de forma acentuada no valor do módulo de resiliência, pois altera a viscosidade do ligante asfáltico.

A Tabela 5.2 apresenta a relação entre os parâmetros módulo de resiliência e resistência à tração estática (MR/RT). Segundo Bernucci et al. (2008), a razão anteriormente citada vem sendo usada como indicador da vida de fadiga de misturas, uma vez que agrega informações de rigidez e resistência, sendo recomendado um valor pequeno, na ordem de 3.000 para que a mistura apresente um bom comportamento à fadiga. Desse modo, o revestimento asfáltico proporcionaria um bom desempenho estrutural, sendo flexível e com boa resistência à tração. Para as misturas analisadas neste estudo, essa relação variou entre 3.150 a 5.373. A mistura RMF, com teor de CAP igual a 6,0%, apresentou o menor valor de MR/RT, próximo de 3.000, e a mistura RPS com teor de 6,5% de ligante possui a maior relação MR/RT.

A substituição parcial do gnaíse por resíduos de minério de ferro e de pedra-sabão aumentou a rigidez da mistura asfáltica, quando analisado o comportamento mecânico para temperatura a 25°C, conforme mostrado na Figura 5.6. A mistura com resíduo de minério de serpentinito (pedra-sabão) apresentou os maiores valores médios de MR em relação às demais misturas, para todos os teores de ligante analisados. Foi possível verificar diminuição nos valores de MR com o aumento da temperatura e do teor de ligante, para os ensaios realizados.

O valor do MR dos corpos de prova ensaiados a 25°C foram maiores se comparados àqueles ensaiados a 30°C, conforme mostrado na Tabela 5.2 e na Figura 5.8.

Figura 5.8 – Comparação dos resultados de MR para as misturas no teor de projeto.



4.9.3 Resultados do ensaio de Estabilidade e fluência Marshall

Os resultados dos valores médios da estabilidade (E) e fluência (F) Marshall das misturas estão apresentados na Tabela 5.3. Constatou-se que o maior valor de estabilidade foi obtido para a mistura RMF, com o teor de ligante igual a 5,0%, e o menor valor para a mistura RPS, com o teor de ligante igual a 6,5%. Os valores obtidos para fluência Marshall indicam que, acima de 5,5% de teor de ligante, as misturas RPS apresentaram menores valores se comparadas às misturas RMF.

A Tabela 5.4 apresenta os resultados médios da estabilidade (E) e fluência (F) Marshall das misturas elaboradas nos teores de projeto. Todas as misturas desta pesquisa apresentaram valores de estabilidade Marshall acima do limite mínimo (5000 N) recomendado pela norma DNIT 031/2006-ES para revestimentos asfálticos.

Tabela 5.3 – Resultados médios da estabilidade (E) e fluência (F) Marshall dos resíduos.

Teores (%)	Estabilidade (N)		Fluência (0,1 mm)	
	RMF	RPS	RMF	RPS
4,5	20218	17114	5,0	5,0
5,0	20688	13919	5,0	5,0
5,5	18102	12677	5,5	4,5
6,0	12813	11181	6,0	5,0
6,5	10697	10040	7,0	6,0

Tabela 5.4 – Resultados médios da estabilidade (E) e fluência (F) Marshall.

Mistura	Estabilidade (N)	Fluência (0,1 mm)
RMF	12813	6
RPS	10040	7
MCG	15276	4,1

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos com os experimentos, foi possível verificar que a substituição parcial do agregado convencional pelos resíduos de minério de ferro e resíduo de minério de serpentinito (pedra-sabão) aumentou significativamente os valores de DMT e de densidade aparente das misturas asfálticas. Esse acréscimo é devido aos elevados valores de densidade real do resíduo de minério de ferro, pelo fato de possuir em sua composição o elemento ferro.

A alteração no teor de ligante não gerou variação expressiva nos valores de módulo de resiliência das misturas. Foi possível verificar que a variação de temperatura é um fator muito relevante e que atua de forma acentuada no valor do módulo de resiliência, uma vez que altera a viscosidade do ligante asfáltico. As inclusões dos resíduos de mineração não provocaram variações significativas na rigidez se comparadas com a mistura convencional. Esses resíduos por sua vez apresentaram maiores valores do módulo de resiliência.

Para o ensaio de RT, as misturas com resíduos de mineração apresentaram resistência à tração superior que a de uma mistura convencional. Verificou-se que o aumento do teor de CAP 50/70 levou a uma pequena diminuição na resistência à tração para todas as misturas (tanto convencional e quanto aos com resíduos). O maior valor de RT obtido nas misturas foi de RMF, referente ao teor de 5,0% de ligante asfáltico.

Todos os corpos de prova avaliados nesta pesquisa apresentaram desempenho mecânico satisfatório, podendo-se afirmar que os revestimentos alternativos contendo resíduos de minério de ferro e minério de serpentinito (pedra-sabão) exibiram bom comportamento quando submetidos aos ensaios mecânicos. Vale ressaltar também que, se os materiais granulares dos agregados convencionais utilizados na obra tenham características de rigidez semelhantes aos adotados nesta pesquisa, os resultados obtidos sugerem que o pavimento proposto pela empresa poderia ser executado adotando os revestimentos alternativos (RMF e RPS). Esse procedimento ocasionaria economia de material granular convencional e redução nos custos de implantação do pavimento, porque resultados predizem um bom desempenho mecânico das estruturas alternativas.

A elevação nos valores de DMT e de densidade aparente deve-se aos elevados valores de densidade real dos resíduos utilizados nesta pesquisa.

A variação no teor de ligante provocou uma leve alteração nos valores de módulo de resiliência das misturas. Salienta-se que a temperatura é um fator que influencia e atua

de forma muito acentuada no valor do módulo de resiliência, pois altera a viscosidade do ligante asfáltico. Foi possível verificar também que, quanto maior for a temperatura do ensaio, menor será o valor de módulo de resiliência. A adição dos resíduos de mineração nas dosagens provocou uma variação significativa na rigidez se comparada com a mistura padrão. O maior valor de MR obtido é referente ao teor de 5,5% de ligante asfáltico, para a temperatura de 25°C da mistura contendo resíduo de minério de serpentinito (pedra-sabão) (RPS) com 16.198 MPa. Os resultados dos experimentos de módulo de resiliência realizados neste projeto foram superiores se comparados ao valor mínimo sugerido pelo Bernucci et al. (2008) que é de 3000 MPa.

Os resultados do ensaio de resistência tração (RT) apresentaram uma pequena variação com acréscimo nos teores de CAP 50/70, induzindo, assim, a uma diminuição na resistência à tração para todas as misturas, expondo os seguintes resultados: quanto menor for o teor de ligante maior será a RT. Foram ainda observadas que as misturas contendo resíduos de mineração (RMF e RPS) apresentaram resistência à tração inferior à mistura padrão (MCG). O maior valor de RT obtido é referente ao teor de 5,0% de ligante asfáltico da mistura contendo resíduo de minério de ferro (RMF) com 2,08 MPa. Os resultados dos experimentos de resistência a tração realizados neste projeto foram todos satisfatórios, acima do valor mínimo estimado pelo DNIT, que é de 0,65 MPa para revestimentos asfálticos.

Em relação ao ensaio de estabilidade e fluência Marshall, todas as misturas apresentaram valores satisfatórios. O maior valor de estabilidade Marshall obtido é referente ao teor de 5,0 % de ligante asfáltico da mistura contendo resíduo de minério de ferro (RMF) com 20.688 N e o maior valor de fluência Marshall obtido é referente ao teor de 6,5% de ligante asfáltico da mistura, contendo resíduo de minério de ferro (RMF) com 7mm. Todas as misturas desta pesquisa apresentaram valores de estabilidade Marshall acima do limite mínimo (5000N) recomendado pela norma DNIT 031/2006-ES para revestimentos asfálticos.

Baseado em estudos feitos no laboratório, pode-se afirmar que os resíduos utilizados neste estudo mostraram-se aptos para utilização em revestimentos rodoviários, tendo enfoque a redução da destinação ambiental inadequada gerada por esse resíduo e a redução no consumo de agregados convencionais implicando a redução de custos. A utilização desses resíduos nos pavimentos pode propiciar a diminuição dos valores de aquisição dos agregados que irão compor a mistura asfáltica, tendo em conta que os

mesmos podem substituir parcialmente com segurança uma parte do agregado miúdo e o fíler convencionais utilizados, desde que caracterizados e dosados de forma correta.

Entretanto, vale ressaltar que a substituição parcial do agregado gnáissico pelos resíduos industriais utilizados nesta pesquisa aumentou o valor do teor de projeto da mistura asfáltico. Nesse caso, o aumento de ligante asfáltico na mistura poderá elevar o custo do revestimento alternativo. Com isso, será necessário para futuras aplicações adequar as dosagens dos resíduos industriais, a fim de minimizar o custo inicial e final da mistura devido ao aumento do teor de ligante asfáltico na mistura e tornar a mesma economicamente competitiva.

6. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Propor um estudo das misturas asfálticas com uso dos resíduos de minério de serpentinito e minério de ferro, construindo um trecho experimental do pavimento asfáltico.

Pesquisar detalhadamente o custo/benefício para o uso dos resíduos de minérios de ferro e de serpentinito, quando esses forem usados como materiais alternativos em pavimentos rodoviários.

Desenvolver o estudo laboratorial para a verificação do comportamento mecânico das misturas asfáltica contendo resíduos alternativos, realizando todos os possíveis ensaios sugeridos pela norma do DNIT.

7 REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4791**. Standard Test Methods for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate. Philadelphia, 1995.

BERNUCCI, L. B., MOTTA; L. M. G. da CERATTI; J. A. P., et al. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABEDAPETROBRAS, 2008.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de Rodovias 2017: relatório gerencial**. Brasília, 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 035: Agregados – Determinação da Abrasão Los Angeles**. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 043: Misturas Betuminosas a Quente - Ensaio Marshall**. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 054: Equivalente de Areia**. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 078: Agregado Graúdo – Adesividade a Ligante Betuminoso**. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 081: Agregados – Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado Graúdo**. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 084: Agregado miúdo – Determinação de Densidade Real**. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 085: Material Finamente Pulverizado – Determinação da Massa Específica Real**. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 086: Agregado – Determinação do índice de Forma**. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 089: Agregados – Avaliação da Durabilidade pelo Emprego de Soluções de Sulfato de Sódio ou de Magnésio**. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 133: Misturas Betuminosas - Determinação do módulo de resiliência**. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME 399:** Agregados – Determinação da Perda ao Choque no Aparelho Treton. Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT ES 031:** Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT ME 135:** Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT ME 136:** Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

GOUVEIA, L. T. **Contribuições ao estudo da influência de propriedades de agregados no comportamento de misturas asfálticas densas.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

NORMA BRASILEIRA. **NBR 7181:** Agregados – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

NORMA BRASILEIRA. **NBR 12891:** Dosagem de Misturas Betuminosas pelo Metodo Marshall. Rio de Janeiro, 1995.

Silva, R. G. O. **Caracterização de concreto asfáltico elaborado com rejeitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero.** Ouro Preto, 2017.

SOARES, J.B. **Curso em Tecnologia dos Pavimentos.** Lubnor/Petrobras, Fortaleza-CE, 2000.

VASCONCELOS, K. L. **Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Quente Dosadas pelas Metodologias Marshall e Superpave com Diferentes Granulometrias.** Fortaleza, 2004.