

BRUNA MINIKOWSKI

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS
FORMULADAS COM PÓ CALCÁRIO, CAL HIDRATADA E PÓ DE
PEDRA.**

**Trabalho apresentado como requisito para obtenção do
título de bacharel no Curso de Graduação em
Engenharia de Infraestrutura do Centro Tecnológico de
Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.**

**Joinville
2018**

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS
FORMULADAS COM PÓ CALCÁRIO, CAL HIDRATADA E PÓ DE
PEDRA.**

BRUNA MINIKOWSKI

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia de Infraestrutura da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Infraestrutura.

Curso: Engenharia de Infraestrutura

Orientador: Prof. Dr. Breno Salgado Barra

**Joinville - SC
2018**

Minikowski, Bruna

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS
FORMULADAS COM PÓ CALCÁRIO, CAL HIDRATADA E PÓ DE PEDRA. /
Bruna Minikowski ; orientador, Breno Salgado Barra, 2018.
80 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville,
Graduação em Engenharia de Infraestrutura, Joinville, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia de Infraestrutura. 2. Misturas
asfálticas. 3. Pó calcário. 4. Cal hidratada. 5. Mástique.
I. Salgado Barra, Breno . II. Universidade Federal de
Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Infraestrutura.
III. Título.

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE MISTURAS ASFÁLTICAS
DENSAS FORMULADAS COM PÓ CALCÁRIO, CAL HIDRATADA
E PÓ DE PEDRA.**

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado para a obtenção do título de BACHAREL EM ENGENHARIA DE INFRAESTRUTURA, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Graduação em Engenharia de Infraestrutura da Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof.^a Me. Valéria Bennack
Coordenadora do Curso de Engenharia de Infraestrutura
Centro Tecnológico de Joinville
UFSC

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Breno Salgado Barra
Orientador/Presidente
Centro Tecnológico de Joinville
UFSC

Prof. Dr. Yader Alfonso Guerrero Pérez
Centro Tecnológico de Joinville
UFSC

Prof. Dr. Leto Momm
Campus Trindade - UFSC
UFSC

Joinville - SC, 2018.

"Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível."(**Charles Chaplin**)

Dedicatória

Aos meus pais, Batista Minikowski, Fátima Minikowski e
minha irmã Patricia Jaszumbek.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por me guiar e dar forças. O caminho não foi fácil e foram grandes as adversidades.

Agradeço a todos de alguma forma contribuíram. Tudo foi alcançado devido o meu esforço, mas amparado pelo amor, ajuda e companheirismo das pessoas sem as quais eu não teria conseguido seguir em frente.

Agradeço a minha família por seu carinho incondicional e também por ser o meu maior exemplo, muito obrigada por tudo!

Também agradeço aos meus amigos e colegas que compartilharam conhecimento e apoio.

Agradeço imensamente ao professor Breno Salgado Barra por aceitar ser meu orientador e por toda atenção assim como o conhecimento compartilhado. Muito obrigada por tudo!

Agradeço imensamente aos meus amigos do laboratório, Marco, Claudia e Estéfani por toda a ajuda. Eles além de auxiliar no meu trabalho também me ensinaram grandes lições de produtividade e trabalho em equipe. Muito obrigada!

Agradeço ao Elvis pela amizade, apoio e ajuda no laboratório. Muito obrigada!

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIACÕES	1
LISTA DE FIGURAS	2
LISTA DE TABELAS	3
RESUMO	4
1 INTRODUÇÃO	6
1.2 OBJETIVOS	8
1.2.1 Objetivos gerais	8
1.2.2 Objetivos específicos.....	8
1.3 PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO	8
1.4 RELEVANCIA DO TEMA: JUSTIFICATIVAS	10
1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	12
2 NOÇÕES GERAIS SOBRE OS GRANULARES E FORMULAÇÃO	13
2.1 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO	13
2.1.1 Operação de britagem.....	14
2.2 MÉTODOS DE COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA	15
2.2.1 Método e gráfico (Rothfuchs).....	15
2.2.2 Método das tentativas	17
2.2.3 Método Bailey.....	19
2.2.4 Método teórico ou método de Füller-Talbot.....	21
2.2 METODOLOGIA FRANCESA DE FORMULAÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	23
2.2.1 Estimativa do teor de ligante inicial pelo método de Duriez.....	24
3 IMPORTÂNCIA DOS FINOS NAS MISTURAS ASFÁLTICAS	26
3.1 PROCESSAMENTO DAS ROCHAS CALCÁRIAS	29
3.2 PÓ CALCÁRIO E CAL HIDRATADA NAS MISTURAS ASFÁLTICAS.	30
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
4.1 ENSAIOS PARA OS AGREGADOS	32
4.1.1 Ensaio de índice de forma	32
4.1.2 Ensaio de desgaste por abrasão Lós Angeles.	33
4.2 MATERIAIS	34
4.2.1 Granulares.....	34
4.2.2 Cal hidratada	37
4.2.3 Calcário.....	40

4.2.4 Fíler de pó de pedra.....	41
4.2.5 Ligante asfáltico.....	42
4.2.5.1 Ensaio do anel e bola.....	43
4.2.5.2 Ensaio de penetração.....	43
4.2.5.3 Índice de penetração ou índice de susceptibilidade térmica.....	44
4.2.5.4 Viscosidade por meio do método Saybolt-Furol.....	44
4.3 ENSAIOS PARA AS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	45
4.3.1 Ensaio de adesividade.....	45
4.3.2 Metodogia Marshall.....	47
4.3.2.1 Estabilidade e a fluência dos corpos de prova.....	54
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
5.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	55
5.2 RESULTADOS DO ENSAIO MARSHALL.....	57
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	65
7 REFERÊNCIAS.....	67

LISTA DE ABREVIACOES

ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAP	-	Cimento Asfáltico de Petróleo
CTC	-	Curva convencional com filer de p de pedra
CTCH	-	Curva com cal hidratada
CTPC	-	Curva com p calcário
CTJ	-	Centro Tecnológico de Joinville
DNER	-	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	-	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
IP	-	ndice de Pfeiffer e Van Doormaal
LDTPav	-	Laboratório de desenvolvimento de Tecnologia em Pavimentaco
MRV	-	Densidade máxima real da mistura
NBR	-	Norma Brasileira
PETROBRAS	-	Petróleo Brasileiro
RBV	-	Relaco Betume Vazios
RTI	-	Resistência a Tração Indireta
UFSC	-	Universidade Federal de Santa Catarina
VAM	-	Vazios do agregado Mineral
VCB	-	Vazios com Betume

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Organização do trabalho	10
Figura 2 - Exemplo do método gráfico de RothFuchs	16
Figura 3 - Comparativo entre curvas granulométricas.....	22
Figura 4 - Ensaio da metodologia francesa.....	24
Figura 5 - Produção da cal e calcário	29
Figura 6 - Ensaio Lós Angeles	34
Figura 10 - Curva granulométrica utilizada no estudo.....	37
Figura 8 - Cal hidratada CHI.....	38
Figura 9 - Pó calcário.....	40
Figura 10 - Extração de calcário	41
Figura 11 - Fíler de pó de pedra.....	42
Figura 12- Curva de viscosidade	45
Figura 13 - Ensaio de adesividade	46
Figura 14 - Mistura asfáltica.....	48
Figura 15 - Compactação.....	49
Figura 16 - Corpos de prova.....	49
Figura 17 - Densidade aparente seca	50
Figura 18 - Ensaio de densidade máxima teórica.....	51
Figura 19 - Resultados curva CTCH (Cal hidratada).....	58
Figura 20 - Resultados curva CTPC (Pó calcário).....	59
Figura 21 - Resultados curva CTC (Curva convencional).....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixa de granulometria de pavimentos flexíveis - DNIT	18
Tabela 2 - Porcentagem de fíler passante.....	27
Tabela 3 - Quantidade de agregados.....	33
Tabela 4 - Caracterização mineralógica.....	35
Tabela 5 - Caracterização dos agregados.....	35
Tabela 6 - Composição da mistura asfáltica.....	36
Tabela 7 - Propriedades químicas da cal hidratada.....	38
Tabela 8 - Propriedades físicas da cal hidratada.....	38
Tabela 9 - Propriedades específicas da cal hidratada.....	39
Tabela 10 - Caracterização química do calcário.....	41
Tabela 11 - Caracterização química da cal hidratada	55
Tabela 12 - Análise do mástique	56
Tabela 13 - Referências de valores segundo a DNIT ES 031/06	57
Tabela 14 - Teores de trabalho	61
Tabela 15 - Superfície específica dos fíleres.....	61

RESUMO

Devido o predomínio do setor rodoviário para o transporte de cargas e passageiros, buscam-se materiais alternativos para melhorar a qualidade dos pavimentos construídos. O uso de materiais finos chamados de fíleres é uma tendência para melhorar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas. Quando esses materiais são misturados com o ligante asfáltico formam o mástique betuminoso, um material mais rígido devido ao poder de rigidificação dos fíleres em contato com o ligante. Em que, dependendo da carga elétrica do fíler utilizado pode conferir maior adesividade entre os granulares e o ligante betuminoso. Nesse trabalho foi feita uma análise comparativa entre a adição de diferentes fíleres, a saber: cal hidratada CHI, pó calcário e fíler de pó de pedra. A formulação da curva granulométrica foi realizada por meio do método teórico de Füller-Talbot, e o ligante foi dosado de acordo com a metodologia Marshall. Também foram feitos outros ensaios para caracterização das propriedades dos materiais. Como resultado foi encontrado que a cal hidratada CHI conferiu melhor desempenho as misturas asfálticas em comparação aos outros fíleres analisados. Melhorou a adesividade e tornou a mistura mais densificada, também proporcionou melhor estabilidade e menor fluência aos corpos de prova. Isso se deve a natureza química da cal hidratada e sua superfície específica. Já a mistura com pó calcário apresentou comportamento semelhante à mistura asfáltica com fíler de pó de pedra.

Palavras-chave: Misturas asfálticas. Pó calcário. Cal hidratada. Pó de brita. Mástique.

ABSTRACT

The predominance of the road sector for the transportation of loads and passengers, alternative materials are sought to improve the quality of the pavements constructed. The use of fine materials called filler is a tendency to improve the mechanical properties of asphalt mixtures. When these materials are mixed with the asphaltic binder they form the bituminous mastic, a more rigid material due to the stiffening power of the filler in contact with the binder. In that, depending on the electric charge of the used filler can give greater adhesiveness between the granular and the bituminous binder. In this work a comparative analysis was made between the addition of different fillers, namely: hydrated lime CHI, limestone powder and stone powder filler. The formulation of the granulometric curve was performed by the theoretical method of Fuller-Talbot, and the binder was dosed according to the Marshall methodology. Further tests were also made to characterize the properties of the materials. As a result it was found that the hydrated lime CHI gave better performance to the asphalt mixtures compared to the other analyzed materials. It improved the adhesiveness and made the mixture more densified, also provided better stability and less fluency to the asphalt mixtures. It depends of the chemical nature of hydrated lime and its specific surface. On the other hand, the mixture with limestone powder presented a similar behavior to the asphalt mixture with the stone powder filler.

Keywords: Asphalt mixtures. Limestone powder. Hydrated lime. Limestone. Mastic.

1 INTRODUÇÃO

O setor de transportes está diretamente ligado ao crescimento econômico de um país, portanto, para manter a qualidade e um custo viável dos produtos que chegam aos consumidores é preciso que não haja grandes entraves ao longo do caminho do transportador.

No Brasil há um predomínio do setor rodoviário como meio de transporte de cargas, deixa-se de explorar o grande potencial que possui para desenvolver outros modais. Isso faz com que o custo de transporte aumente muito devido a péssima qualidade das rodovias, congestionamentos, tempo de espera para carga e descarga e também questões burocráticas.

De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Pesquisa e Estatística (IBGE) Portal Brasil (2014), o uso do transporte rodoviário é de aproximadamente 60% em comparação aos outros meios de transporte. Desta forma ressalta-se a importância das rodovias serem de boa qualidade.

Entretanto, a malha rodoviária do Brasil não apresenta o estado adequado, de acordo o site do Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil (BRASIL, 2014) há 1,7 milhões de quilômetros de estradas, mas apenas 12,7% (221.820 km) estão pavimentadas. E entre estas, há muitos problemas com relação à conservação dos pavimentos. Somente o investimento em infraestrutura viária e de terminais, em conjunto com um bom planejamento logístico, podem melhorar o tempo e custo de transporte.

Em 2016 a Confederação Nacional dos transportes (CNT, 2016) analisou 103.259km de rodovias e 58,2% destas apresentaram deficiências em relação ao pavimento, sinalização ou geometria da via. As causas da baixa qualidade atual dos pavimentos podem ser associadas ao excesso de cargas transportadas pelos caminhões em conjunto com o emprego de técnicas de construção inadequadas.

O excesso de carga reduz a vida útil do pavimento, acelerando sua deterioração. Os principais problemas associados à sobrecarga são trincas por fadiga e afundamento por trilha de rodas. Entretanto, os defeitos dos pavimentos também estão associados a sua formulação. O tráfego provoca deformações que cessam após a retirada da carga devido ao comportamento viscoelástico do pavimento. A magnitude das

deformações provocadas depende do material empregado nas camadas, geometria do carregamento e pressão dos pneus (FONTENELE, 2011).

Levando em conta que os pavimentos estão cada vez mais solicitados, com cargas acima do permitido e continuo aumento do trafego, são necessários estudos de técnicas que possam melhorar os pavimentos construídos. A qualidade e vida útil dos mesmos dependem dos materiais empregados para as camadas e da formulação da mistura asfáltica.

A longevidade de um pavimento depende da formulação adequada da curva granulométrica que compõem a matriz dos granulares, pois, os agregados, compõem a maior porcentagem em massa da mistura. E também da dosagem correta de ligante betuminoso, pois o mesmo proporciona consistência à mistura, e seu teor ótimo induz a um bom comportamento mecânico (BÚRIGO, 2015).

A falta de investimentos do país no setor de infraestrutura faz com que as estradas nem sempre sejam construídas com os materiais mais adequados. Quanto à manutenção, dificilmente ocorre restauração completa das rodovias. Na maioria dos casos são aplicadas soluções pontuais que não garantem que o pavimento dure por muito tempo.

Este trabalho procura contribuir para a melhoria da qualidade dos pavimentos asfálticos, por isso, pretende realizar uma avaliação comparativa da formulação de misturas asfálticas densas, com emprego de fíleres na forma de pó calcário e cal hidratada, em comparação com misturas asfálticas convencionais.

De acordo com Barra (2005), apesar de uma mistura asfáltica conter agregados miúdos, sempre há existência de vazios, e que, para preencher este espaço, são utilizados materiais na forma de pó, também chamados de fíleres.

O uso de fíler nas misturas asfálticas possibilita melhor preenchimento dos vazios, e desta forma, proporciona maior resistência mecânica ao pavimento (KLINSKY e FERNANDES JR, 2015).

De acordo com o Departamento Nacional de Estradas e Rodagens DNER-ME 367-97 (1997), fíler é o material que passa 65% na peneira nº 200 (0,075 mm). São exemplos de fíleres o pó calcário, o cimento Portland, a cal e a cinza volante. As partículas de maior dimensão, maiores que 40µm, compõem o fíler que é inserido no esqueleto mineral da mistura, enquanto as de menor dimensão, menores que 20µm, atuam no aumento da espessura da película de ligante, em suspensão, formando o

mástique asfáltico (MOTTA *et. al.* 2000 *apud* BARRA, 2005).

Neste trabalho, a adição de cal hidratada, pó calcário e pó de brita nas misturas asfálticas, sob a forma de fíleres na composição dos esqueletos minerais, visa avaliar de forma comparativa o efeito destas adições nas propriedades físico-químicas e na dosagem das misturas asfálticas.

1.2 OBJETIVOS

Para resolver a problemática de melhorar a qualidade dos pavimentos asfálticos com a utilização de fíleres, são propostos neste trabalho os seguintes objetivos.

1.2.1 Objetivos gerais

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar comparativamente, em âmbito laboratorial, misturas asfálticas densas formuladas com pó calcário, cal hidratada e fíler de pó de pedra, sob a forma de fíleres na composição de esqueletos minerais de misturas asfálticas densas.

1.2.2 Objetivos específicos

Para alcançar os objetivos da pesquisa, os seguintes procedimentos foram estabelecidos:

- Caracterizar os materiais e formular a matriz dos granulares pelo método de Füller-Talbot.
- Analisar as propriedades físico-químicas e mineralógicas dos fíleres empregados e como influenciam na dosagem das misturas asfálticas.
- Determinar o teor de trabalho do ligante betuminoso que será empregada em cada formulação, estabelecendo um comparativo com os indicadores de desempenho obtidos com o método Marshall.

1.3 PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO

Foram escolhidas empresas e jazidas próximas a Joinville/SC, a fim de que fossem utilizados recursos de fácil obtenção e com a menor distância média de transporte para formular as misturas asfálticas.

Os granulares foram fornecidos pela empresa Rudnick Minérios Ltda., o calcário pela empresa Mineração Rio do Ouro, denominada jazida Calcário Botuverá, e a cal hidratada foi fornecida pela empresa Cal CEM localizada em Colombo/PR. No que diz respeito ao ligante betuminoso, este é proveniente da refinaria Getúlio Vargas (REPAR) da Petrobrás, localizada em Araucária/PR.

Foram realizados estudos prévios de caracterização dos materiais, incluindo a morfologia dos granulares pelos ensaios de índice de forma e microscopia ótica. E as propriedades do ligante betuminoso que foram caracterizadas a partir dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento anel e bola e viscosidade de Saybolt-Furol, seja tanto na forma pura quanto na formação do mástique betuminoso, com as adições dos fíleres. As análises de adesividade verificarão o poder de reação do ligante betuminoso com os fíleres supracitados.

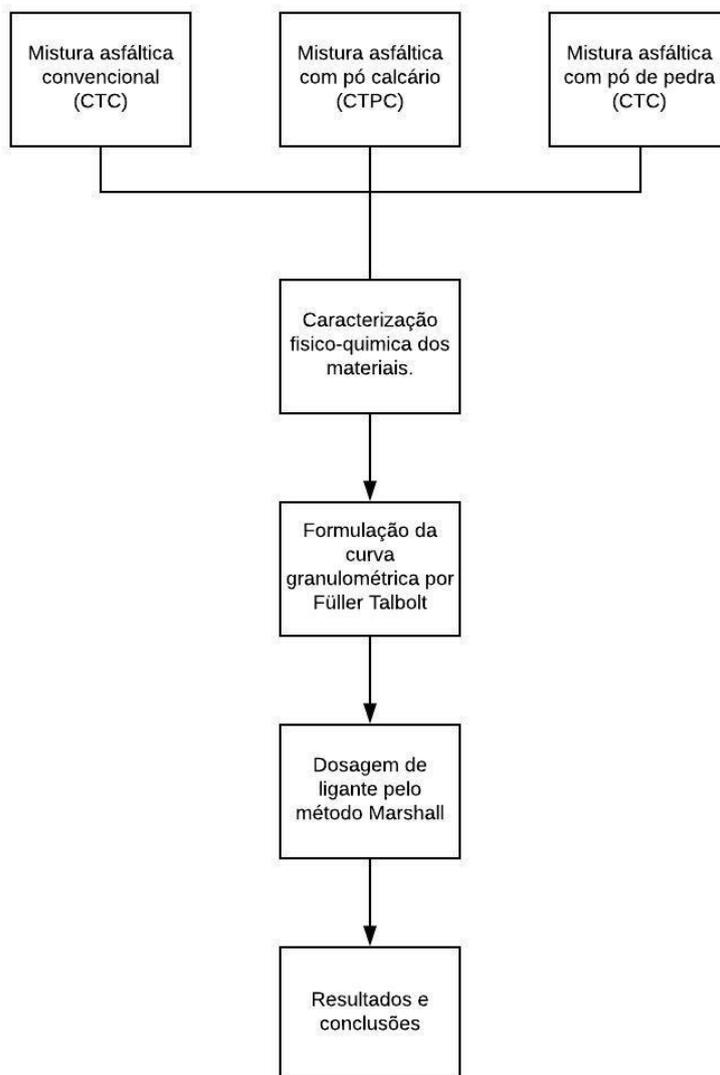
A curva granulométrica que compõem a matriz dos granulares das mistura asfálticas foi determinada pelo método de Fuller-Talbot.

O teor de trabalho do ligante betuminoso foi determinado pela metodologia Marshall (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER-ME 043/95), em razão de ser o procedimento homologado oficialmente no Brasil pelo DNIT.

Foram moldados 25 corpos de provas para cada mistura asfáltica estudada.

A seguir, na Figura 1 será apresentado um esquema que resume o trabalho que foi executado para a obtenção dos resultados.

Figura 1 - Organização do trabalho



Fonte: Autor (2018)

Para identificar de forma mais simples as misturas asfálticas no transcurso do trabalho, serão adotadas as seguintes nomenclaturas: CTC (mistura convencional – somente com agregados graníticos britados), CTPC (mistura com pó calcário na fração de fíler), e CTCH (mistura com cal hidratada na fração de fíler).

1.4 RELEVANCIA DO TEMA: JUSTIFICATIVAS

A metodologia vigente no Brasil utilizada para avaliação da qualidade dos pavimentos asfálticos e para determinação do teor de trabalho é a Metodologia Marshall. Entretanto, esta metodologia apresenta problemas com relação ao

distanciamento entre a forma que os ensaios laboratoriais são executados do que realmente acontece em campo com as cargas dinâmicas do tráfego de veículos.

Segundo Araldi (2017) apesar de a metodologia Marshall ser majoritariamente utilizada no Brasil existem muitas críticas com relação a sua forma de execução. Pois, algumas etapas da execução das amostras e ensaios em laboratório divergem do comportamento em campo. Por exemplo, a compactação das amostras no laboratório é feita por impacto e em campo é realizada por amassamento podendo acarretar a quebra dos granulares, o que modifica a curva granulométrica do material e conseqüentemente altera seu comportamento mecânico. Outro ponto citado pelo autor é divergência do ensaio de tração indireta com relação às condições reais de campo. No ensaio a carga é aplicada de forma gradual até ocorrer a ruptura e em campo as cargas são dinâmicas variando muito o comportamento.

Segundo Petrobras (2014) a indústria do petróleo possui um sistema de fracionamento da matéria prima em que destina a cada indústria o material de interesse, abrangendo grande parte das indústrias químicas e petroquímicas. Alguns dos produtos fornecidos pela indústria do petróleo são embalagens, tecidos, combustíveis, cosméticos e ligantes betuminosos. O fracionamento do petróleo tem modificado as propriedades desse material na produção de ligante betuminoso. Por isso, há a necessidade de sempre serem feitos ensaios que caracterizem a qualidade os materiais que estão sendo utilizados. E se necessário sejam empregados materiais que auxiliem a melhorar a qualidade das misturas asfálticas.

O intuito desta pesquisa é analisar materiais que possam melhorar as propriedades físico-químicas que das misturas asfálticas independente da metodologia empregada. Contribuindo, desta forma, com futuras pesquisas que possam melhorar a qualidade das rodovias brasileiras.

Esse estudo faz uma análise comparativa entre a adição de fíleres, como o pó calcário, a cal hidratada e o fíler de pó de pedra empregados em misturas asfálticas. Esse fíleres quando reagem com o ligante betuminoso formam o mástique betuminoso.

O mástique betuminoso é a junção do ligante com os fíleres que forma uma espécie de argamassa, em que a fração que fica em suspensão no ligante que forma o mástique betuminoso que aumenta o poder de rigidificação do ligante.

A qualidade do mástique betuminoso está diretamente relacionada às propriedades mecânicas e à trabalhabilidade das misturas asfálticas (BARDINI et al., 2009).

Se tiverem um potencial elétrico atrativo entre ligante e agregado, os fíleres atuam no que diz respeito à resistência à ação deletérea da água na interface do conjunto ligante-agregado ou mástique agregado. E dependendo do poder de rigidificação do ligante melhoram a resistência a fadiga do material (BARRA, 2009).

Os fíleres citados serão comparados com a mistura asfáltica convencional contendo fíler de pó de pedra granítico, na mesma fração proporcional e dimensional.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho será apresentado em seis capítulos, contendo: Introdução, revisão da bibliografia, metodologia, resultado e conclusões.

O Capítulo 1 apresenta uma introdução e contextualização do tema, deixando o leitor integrado aos objetivos propostos.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre a aplicação dos materiais granulares nas misturas asfálticas. Em seguida serão apresentados vários métodos de composição granulométrica como o Método por tentativas e Método Teórico. Apresenta também uma breve introdução sobre a metodologia francesa de formulação de pavimentos.

O Capítulo 3 contextualiza a importância da inserção de materiais finos nas misturas asfálticas, as propriedades alcançadas, reatividade e um comparativo entre os fíleres estudados.

O Capítulo 4 apresenta os materiais e métodos utilizados. Serão apresentadas as propriedades dos materiais que irão ser usados nos ensaios, bem como os parâmetros de dosagem das misturas asfálticas. Serão descritas também as metodologias dos ensaios a serem executados para o cumprimento dos objetivos propostos.

O Capítulo 5 descreve os resultados encontrados na pesquisa.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões para o estudo comparativo e recomendações para trabalhos futuros.

2 NOÇÕES GERAIS SOBRE OS GRANULARES E FORMULAÇÃO

A seguir será feita uma revisão sobre as propriedades dos materiais granulares, sua classificação e importância nas misturas asfálticas. Em seguida, serão explicados alguns métodos de composição de curvas granulométricas. E também uma introdução sobre a metodologia francesa.

2.1 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO

A maior porcentagem em massa que compõem a estrutura da camada de rolamento de um pavimento asfáltico é dada pelos materiais granulares. São esses materiais que dão capacidade estrutural para a mistura asfáltica suportar os esforços de tráfego, enquanto o ligante aglutina as partículas.

Agregados são areias, britas, pedregulhos, materiais inertes utilizados para formar a argamassa, concreto ou pavimento asfáltico. São escolhidos de forma a suportar as tensões impostas na superfície e no interior do pavimento (BERNUCCI et al., 2007).

De acordo com Senço (2007), algumas aplicações comuns de materiais granulares são na mistura de concreto cimentício, pavimentos asfálticos ou preenchimento de camadas de lastro e sub-lastro de ferrovias. Os granulares podem ser classificados quanto a sua origem, forma e tamanho. Quanto à origem podem ser classificados como naturais ou artificiais. Os grãos artificiais são os que são processados, passam pela britagem e classificação, como exemplos podem ser citados a pedra britada, fíler de pó de pedra e pedregulho britado. Apesar de terem passado por diversos processos carregam consigo as propriedades da rocha mãe que influenciam na sua qualidade quanto à dureza e durabilidade.

Segundo Bernucci et. al. (2007) um pavimento asfáltico é uma estrutura constituída por várias camadas projetadas para resistir aos carregamentos impostos pelo tráfego de veículos. Um pavimento de qualidade deve proporcionar conforto, segurança e economia. O revestimento asfáltico é constituído por uma mistura de materiais granulares com ligante asfáltico. As principais camadas do pavimento são o revestimento, base, sub-base e reforço do sub-leito. A camada superior ou de rolamento, atua diretamente no suporte as cargas geradas pelo trafego de veículos e transmite as

camadas inferiores que dão suporte ao pavimento. Os principais defeitos que aparecem na camada de rolamento são as trincas por fadiga devido às tensões e deformações ou devido o envelhecimento do ligante.

O comportamento dos agregados pode ser avaliado por meio de curvas de granulometria contínua e descontínua. A principal característica da granulometria contínua é o bom entrosamento entre as partículas.

- Granulometria contínua: Possui grande uniformidade na distribuição dos grãos proporcionando um bom índice de preenchimento dos vazios. É utilizada geralmente em misturas asfálticas densas;
- Granulometria descontínua: A distribuição dos grãos não é uniforme, as frações não se completam.

O estudo da forma é feito por meio da análise da granulometria. A forma do grão e sua resistência à quebra influenciam na qualidade da mistura asfáltica. Grãos mais angulosos, com pontas, melhoram o intertravamento do pavimento. A formulação adequada da curva granulométrica produz um bom encaixe das partículas, diminuindo os vazios que poderiam levar a deformações permanentes.

Segundo Senço (2007) os agregados podem ser classificados como:

- Agregado graúdo: fração retida na peneira n°10 (2,00 mm);
- Agregado fino: fração que passa na peneira n°10 e é retida na peneira n°200 (0,074 mm);
- Fíler ou material de enchimento: é a fração que passante na peneira n°200 (0,0075mm).

2.1.1 Operação de britagem

Segundo Bernucci et. al. (2007) nas pedreiras as rochas são desmontadas por meio de explosivos, e depois são levadas a uma série de britadores para reduzir o tamanho dos pedaços de rochas. Os fragmentos maiores são levados inicialmente para o britador primário ou de mandíbula, esse material depois é separado por peneiramento.

O Material maior que 25,4 mm é transportado para o britador de cone, para britagem adicional. O material menor 19mm pode ser estocado, levado para um segundo peneirador para uma separação futura ou retorna para o britador de cone para nova

britagem. Este material é separado em três pilhas, de acordo com a granulometria material entre 19mm e 9,5mm, entre 9,5mm e 4,8mm e material menor que 4,8mm.

Esses materiais que são produzidos no processo de britagem são separados em faixas granulométricas abrangendo um intervalo de tamanhos de grãos, sendo esses segundo Rudnick (2018):

- Pó de pedra: 2,2mm a 0,075mm;
- Pedrisco: Entre 4,8mm a 2,2mm;
- Brita n° 0: Entre 12,00mm a 9,5mm;
- Brita n°1: Entre 19mm a 12mm;
- Brita n° 2: Entre 25mm a 19mm.

Como foi demonstrado o material que vem da pedreira para a execução de pavimentos asfálticos abrange uma faixa granulométrica, não sendo separado em granulométricas individuais. Esta forma de comercialização restringe a aplicação de curvas teóricas de formulação de misturas asfálticas como a curva de Fuller-Talbot, pois no método teórico as quantidades são determinadas por frações de peneiras.

Esse tipo de comercialização dos granulares pétreos incentiva o predomínio da aplicação do método das tentativas. Apesar de o material comercializado ser amplamente heterogêneo, o método das tentativas facilita a sua aplicação, pois a faixa utilizada é ampla. Pelo método das tentativas é possível encaixar as faixas dos grãos comercializados. Entretanto, este método não favorece a execução de misturas bem densificadas.

Algumas empresas atribuem faixas de trabalho com granulometrias menos heterogêneas dos que as normativas do DNIT para favorecer a qualidade dos pavimentos construídos (SIROMA, 2016).

2.2 MÉTODOS DE COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

A seguir serão descritos alguns métodos normalmente utilizados para compor curvas granulométricas de misturas asfálticas.

2.2.1 Método e gráfico (Rothfuchs)

De acordo com Senço (2007), esse método determina a composição granulométrica de forma gráfica, o gráfico é encontrado traçando-se retas utilizando

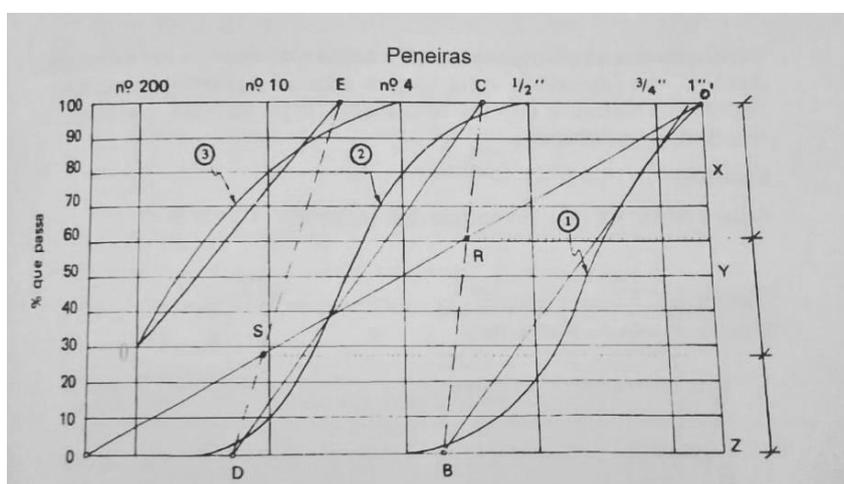
papel milimetrado. O eixo vertical do gráfico marca as porcentagens passantes de 0% á 100% e o eixo horizontal demonstra a granulometria das peneiras. Observando a Figura 2 e utilizando o passo a passo a seguir é possível compreender como são determinadas as curvas granulométricas pelo método de Ruthfuchs.

Traça-se uma diagonal oo' que representa uma curva média para a granulometria requerida para a mistura. A intersecção das retas que irão vir das pontas curvas partindo do eixo das peneiras com a diagonal oo' representarão a porcentagem passante do material;

- Traçam-se as curvas de distribuição granulométrica dos materiais disponíveis;
- São feitas retas sobre as curvas de modo que a área para cada um dos lados seja igual;
- Ligam-se as retas com os pontos extremos das outras retas, CB e ED.

Os pontos de intersecção destas retas com a diagonal oo' determinam a porcentagem de cada fração que deve entrar na mistura.

Figura 2 - Exemplo do método gráfico de RothFuchs



Fonte: Senço (2007)

Os valores dos pontos de intersecção das retas (% passantes) são aplicados na Equação 1, que determina as quantidades dos materiais de empréstimo para produzir um novo material. Se os resultados atenderem as especificações, as quantidades de granulares determinadas pelo método podem ser utilizadas na dosagem da mistura.

$$\#p_i = a_iX + b_iY + c_iZ \quad (1)$$

Os coeficientes a_i , b_i , c_i são as porcentagens passantes na peneira p_i e X , Y , Z são as porcentagens dos materiais 1, 2 e 3 ensaiados.

O método é um ponto de partida para quando não há as informações necessárias sobre os materiais, não sendo possível aplicar diretamente o método das tentativas. Então esse método faz uma estimativa inicial das porcentagens de cada material, determinando uma faixa da granulometria dos agregados que irão compor a mistura.

2.2.2 Método das tentativas

O método das tentativas é normatizado pelo documento (especificação de serviço de pavimentos flexíveis – concreto asfáltico) DNIT-ES 031/2006. Este método por ser normatizado pelo DNIT é o método mais utilizado nas obras rodoviárias no Brasil.

Segundo Senço (2007), o método das tentativas é um método iterativo onde são feitas tentativas para determinar a porcentagem de cada material. Os valores iniciais das dosagens (X , Y e Z) dos materiais são escolhidos de acordo com a experiência do operador. São traçadas sobre as curvas granulométricas, duas curvas limites que atendem as especificações normativas. Calcula-se a porcentagem que passa (a , b e c), por meio da Equação (2), de acordo com as quantidades dos materiais (X , Y e Z).

$$\%P_i = a_iX + b_iX + c_iX \quad (2)$$

A seguir é apresentada a Tabela 1 retirada da norma DNIT-ES 031/2006, que apresenta a tolerância para as granulometrias presentes nos pavimentos asfálticos. Se a curva obtida estiver dentro da faixa de granulométricas estabelecidas nesta norma a dosagem atende as especificações.

Tabela 1 - Faixa de granulometria de pavimentos flexíveis - DNIT

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,8	100	-	-	-
1 1/2"	38,1	95-100	100	-	+/- 7%
1"	25,4	75-100	95 - 100	-	+/- 7%
3/4"	19,1	60-90	80 - 100	100	+/- 7%
1/2"	12,7	-	-	80 - 100	+/- 7%
3/8"	9,5	35 - 65	45-80	70 - 90	+/- 7%
n° 4	4,8	25 - 50	28 - 60	44 - 72	+/- 5%
n° 10	2	20 - 40	20 - 45	22 - 50	+/- 5%
n° 40	0,42	10 - 30	10 - 32	8 - 26	+/- 5%
n° 80	0,18	5 - 20	8 - 20	4 - 16	+/- 3%
n° 200	0,075	1 - 8	3 - 8	2 - 10	+/- 2%
Asfalto solúvel no CS2 (+) (%)		4,0- 7,0 Camada de ligação (Blinder)	4,5 - 7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5-9,0 Camada de rolamento	+/- 0,3%

Fonte: DNIT ES 031 (2006)

Esse método nem sempre proporciona a melhor composição, pois se torna muito empírico por utilizar tentativas. E a faixa normatizada de tamanhos dos granulares que atende as especificações, abrange um intervalo muito grande, estando dessa forma mais susceptível a erros.

Segundo Araldi (2017) o método é muito empírico por ser baseado em tentativa e erro, neste método é necessário definir as frações que compõem as misturas e as quantidades. Para isso, o responsável deve ter amplo conhecimento sobre a granulometria das frações, para que, as que forem empregadas estejam dentro dos limites normativos. Outra razão que torna o método falho é que não há controle no peneiramento das frações comercializadas no Brasil, fazendo que com hajam partículas com o mesmo diâmetro em diferentes frações.

Segundo Siroma (2016), apesar da metodologia não apresentar grande confiabilidade nos resultados, ainda é amplamente utilizada no Brasil. Isso se deve comercialização de materiais pétreos produzidos sem grandes exigências e apresentando grande heterogeneidade em sua granulometria.

2.2.3 Método Bailey

Este método leva em conta o intertravamento dos agregados, prioriza construir um forte esqueleto mineral para a mistura. Relaciona os vazios no agregado mineral com os vazios na mistura, o entrosamento entre os grãos é um dado de entrada para o cálculo das dosagens (CUNHA, 2004).

De acordo com Mendes (2011) o método de Bailey é baseado na distribuição granulométrica, o grau de intertravamento é determinado de modo a evitar deformações permanentes. A quantidade de ligante exata é determinada modificando as quantidades de agregados miúdos e graúdos e os conseqüentemente os Vazios no Agregado Mineral (VAM). Geralmente os granulares graúdos podem ser classificados como o material retido na peneira 4,75 mm e os granulares que passam determinam a quantidade de material fino. Entretanto, o método de Bailey classifica os granulares graúdos e finos por meio do tamanho máximo nominal da mistura. O material de granulometria fina preenche os vazios formados pelos granulares graúdos.

Para classificar os agregados desta forma, utiliza-se a fórmula da Peneira de Controle Primário (PCP), dada por:

$$PCP = TMN \times 0,22 \quad (3)$$

Onde:

PCP: Peneira de controle primário;

TMN: Tamanho máximo de controle da mistura.

É necessário quantificar o volume de vazios contido na amostra, então determinam-se as massas específicas dos granulares graúdos e finos. A seguir, será descrita a formulação para o cálculo das massas específicas, baseados no trabalho de Vavrik et al. (2002).

Para encontrar todas as massas específicas divide-se a massa de agregado pelo volume conhecido do recipiente. As Equações 4 e 5 mostram como é calculada a massa específica e o volume de vazios.

a) Massa específica:

$$m = \frac{G-T}{V} \quad (4)$$

Onde:

m: Massa específica solta do agregado, (kg/m³);

G: É a massa do agregado somada a massa do recipiente, (kg);

T: Massa do recipiente, (kg);

V: Volume do recipiente, (m³).

b) Volume de vazios:

$$\% \text{ Vazios} = \frac{100 \cdot [(S.W) - M]}{S.W} \quad (5)$$

M : Massa específica solta do agregado graúdo, (kg/m³);

S: Densidade aparente do agregado, (kg/m³);

W: Densidade da água, 998 kg/m³.

As massas específicas que devem ser calculadas com a Equação 4 são:

Massa específica solta dos agregados graúdos:

Preenche-se um recipiente com agregado graúdo, sem que ocorra a compactação.

Massa específica compactada dos agregados graúdos:

O material graúdo é inserido no recipiente em três camadas, compactando-se cada uma com 25 golpes a aproximadamente 50mm do chão, em cada lado da amostra. Divide-se essa massa pelo volume do recipiente.

Massa específica compactada dos agregados finos.

O material fino é inserido no recipiente em três camadas, compactando-se cada uma com 25 golpes a aproximadamente 50mm do chão, em cada lado da amostra.

Divide-se essa massa pelo volume do recipiente.

Utilizando a formulação descrita nos itens anteriores determina-se a massa específica solta dos agregados graúdos, kg/m^3 , e com esse valor realiza-se o cálculo do volume de vazios nos agregados graúdos.

Com a massa específica compacta dos agregados finos determina-se a quantidade de agregados finos para preencherem os vazios do esqueleto mineral.

Encontrando-se as massas de agregados graúdos e finos calcula-se as porcentagens desses materiais em relação ao peso total, e com um comparativo entre esses valores é possível analisar se o intertravamento esta adequado.

Em misturas asfálticas densas com intertravamento entre os agregados graúdos utiliza-se massa específica do agregado graúdo como sendo 95% a 100% da massa específica solta. Valores entre 90 e 95% não são adequados porque podem variar o grau de intertravamento. E para os granulares finos a massa específica escolhida deve ser menor do que 90% da massa específica solta.

2.2.4 Método teórico ou método de Füller-Talbot

Segundo Siroma (2016) esse método formula uma curva granulométrica bem definida, utiliza como base o maior e menor diâmetro dos grãos que deverão compor a mistura. As peneiras intermediárias são definidas entre esses diâmetros. O maior diâmetro é definido pela peneira com malha onde que passam 100% dos grãos e o menor diâmetro pela malha que retém no máximo 10% de material. Os diferentes diâmetros proporcionam um melhor preenchimento dos vazios da mistura asfáltica.

$$\%p = a. \left(\frac{d}{D} \right)^n \quad (6)$$

Onde:

%p= Porcentagem passante na peneira de diâmetro d (menor diâmetro);

a= Constante igual a 100;

D= Tamanho máximo da abertura que passa 100% (mm);

d= Abertura de uma dada peneira (mm);

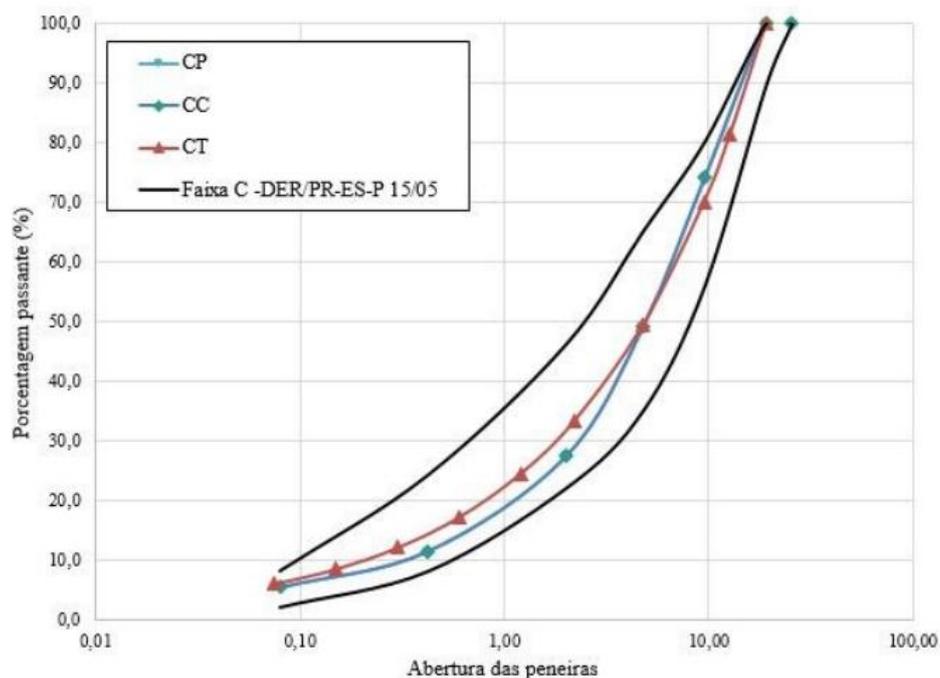
n= Expoente.

O expoente n depende do tipo da curva que pode ser de graduação:

- Densa: $0,35 < n < 0,55$;
- Aberta: $0,55 < n < 0,75$;
- Tipo macadame: $D = 2d$; $n = 1,0$.

O trabalho de Araldi (2017) comparou uma curva prática (CP) referente ao método das tentativas, uma curva controlada (CC) utilizando a normativa do órgão regulamentador DER/PR que restringe os limites do método das tentativas. E uma curva teórica (CT) referente ao método teórico de Fuller-Talbot. A curva é mostrada na Figura 3 abaixo:

Figura 3 - Comparativo entre curvas granulométricas.



Fonte: Araldi (2017)

A curva teórica (CT) apresentou o maior preenchimento gradual da mistura, desta forma, proporciona maior entrosamento e estabilidade entre as partículas.

De acordo Siroma (2016) a utilização de da curva teórica possibilita a formulação de uma curva densa, com grãos mais estáveis. O uso da curva também

favorece a montagem de corpos de provas mais homogêneos, evitando diferentes granulometrias entre os corpos de provas analisados.

O método teórico de Fuller-Talbot foi escolhido para compor a curva granulométrica deste trabalho, pois, procura-se formular uma mistura asfáltica densa. As misturas asfálticas densas possuem uma curva granulométrica contínua, ou seja, os grãos de diferentes diâmetros se encaixam preenchendo os vazios. O método de Fuller-Talbot é ideal para formulação desse tipo de mistura, pois proporciona esse adequado preenchimento da matriz dos granulares dentro de um intervalo de diâmetros definidos.

Apesar das vantagens evidentes do método teórico de Fuller-Talbot, o mesmo só poderá ser aplicado em obras de pavimentação no Brasil quando o material britado nas pedreiras for fracionado peneira por peneira e não em frações heterogêneas comerciais.

2.2 METODOLOGIA FRANCESA DE FORMULAÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

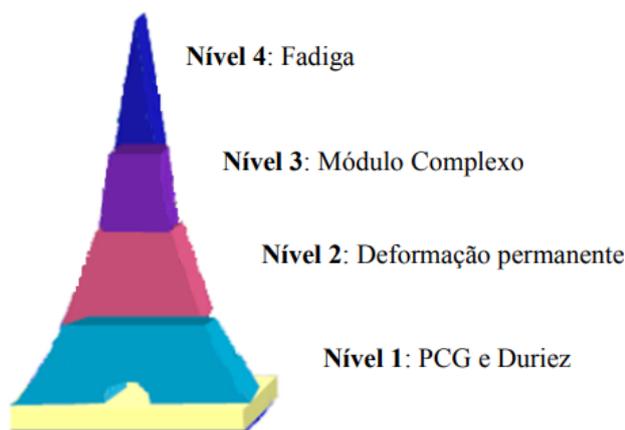
As estradas francesas são famosas pela durabilidade e conforto proporcionado aos usuários. Por trás dessa excelência em pavimentos asfálticos há uma técnica de dimensionamento eficaz, baseada em ensaios com forte relação entre campo e laboratório, assim como um estudo minucioso de todos os materiais empregados nas camadas dos pavimentos.

Segundo Quintero (2011) a formulação do método é definida por ensaios fundamentais em cada nível de formulação. Inicialmente é feito um ensaio na prensa de compactação giratória que direciona a formulação de misturas usinadas a quente.

De acordo com o tipo de mistura asfáltica, tráfego previsto, espessura das camadas, posição das camadas são determinados ensaios do nível 1 ao 4 e alguns ensaios complementares. Experimentalmente são medidas a rigidez no ensaio de módulo complexo e a deformação admissível é calculada através dos resultados do ensaio de fadiga para o número de eixos equivalentes, esses dados são utilizados para o dimensionamento do pavimento. A metodologia francesa leva em conta as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos constituintes das misturas asfálticas, propriedades volumétricas e valores admissíveis utilizados no dimensionamento, de acordo com as propriedades requeridas. Os ensaios da metodologia francesa são apresentados na

Figura 4.

Figura 4 - Ensaio da metodologia francesa.



Fonte: Quintero (2011)

2.2.1 Estimativa do teor de ligante inicial pelo método de Duriez.

Na metodologia francesa o teor de ligante inicial pode ser estimado por meio do Duriez, este método leva em conta o módulo de riqueza para mistura, superfície específica, e massa volumétrica real.

$$T_{\text{lig, int}} = \frac{100 \times K \times \alpha \cdot \sqrt[5]{\Sigma}}{100 + (K \times \alpha \cdot \sqrt[5]{\Sigma})} \quad (7)$$

$$100 \times \Sigma = 0,25 \times G + 2,3S + 12S + 135f \quad (8)$$

Onde:

G: Material maior do que 6,3mm;

S: Material entre 6,3mm e 0,315mm;

S: Material entre 0,315mm e 0,08mm;

F: Material inferior a 0,08mm;

α : $2,65/\rho_g$ massa volumétrica dos granulares.

O teor de ligante interno é definido por:

$$TL, \text{int} = \frac{\text{Massa do ligante}}{\text{Massa dos granulares} + \text{massa do ligante}} \times 100 \quad (9)$$

O teor de ligante externo é definido conceitualmente por:

$$Tlig, \text{ext} = \frac{\text{massa do ligante}}{\text{massa dos granulares}} \times 100 \quad (10)$$

E para ser calculado depende do módulo de riqueza, superfície específica dos granulares e massa volumétrica dos granulares.

$$Tlig, \text{ext} = Kxax\sqrt[5]{\Sigma} \quad (11)$$

A relação entre o Tlig, ext e o Tlig,int é dada pelas equações 12 e 13:

$$Tlig, \text{ext} = \frac{100 \cdot Tlig, \text{int}}{100 - Tlig, \text{int}} \quad (12)$$

$$Tlig, \text{int} = \frac{100 \cdot Tlig, \text{ext}}{100 + Tlig, \text{int}} \quad (13)$$

O módulo de riqueza estima o teor de ligante mínimo com base na quantidade para cobrir os granulares em função da espessura do filme de ligante. Busca formular uma mistura que satisfaça parâmetros de compactidade, resistência na presença de água, deformação permanente, módulo complexo e fadiga (QUINTERO, 2011).

3 IMPORTÂNCIA DOS FINOS NAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Devido à demanda por melhoras nas condições dos pavimentos que estão cada vez mais solicitados, buscam-se novas tecnologias que proporcionem mais resistência aos materiais empregados.

Os agregados dão consistência à mistura asfáltica, para que o pavimento asfáltico tenha uma boa resistência mecânica, para isso, a malha dos granulares deve estar bem preenchida. O ligante asfáltico atua como um aglutinador das partículas, e suas propriedades viscoelásticas lineares devem ser levadas em conta no estudo do comportamento do pavimento.

Quanto aos agregados, o tamanho máximo dos granulares é a menor malha da peneira que passam 100% dos grãos. De forma geral, se a mistura conter granulares de tamanho máximo muito pequeno pode se tornar instável e diminuir a trabalhabilidade da mistura. Caso o tamanho máximo dos granulares seja muito grande pode ocorrer à segregação do pavimento devido à alta porcentagem de vazios.

Como já explicado (DNER – EM 367/97) fíler é o material onde mais de 65% das partículas são passantes na peneira n° 200 com malha de 0,075mm, serão utilizados nesse trabalho a cal hidratada, pó calcário e fíler de pó de pedra. Partículas do fíler com granulometrias maiores que 0,040mm são usadas para preencher os vazios do esqueleto mineral, já as menores que 0,020mm formam uma película em suspensão ao redor dos agregados, esta película é denominada mástique (BERNUCCI et. al., 2008).

Os fíleres podem ser classificados de duas maneiras, como um fíler agregado que é um material fino e inerte que atua no preenchimento dos vazios da mistura asfáltica. Ou como fíler ativo fica em suspensão caracterizando o mástique, sendo esse o que proporciona a capacidade de alterar a viscoelasticidade do ligante asfáltico (BARRA, 2005).

A Tabela 2 ilustra a definição de fíler, pois demonstra como os fíleres se comportam mediante as peneiras 0,42mm, 0,18mm e 0,075mm.

Tabela 2 - Porcentagem de fíler passante.

Abertura da malha (mm)	%, em peso, passando
0,42	100
0,18	95-100
0,075	65-100

Fonte: DNIT-ME 367 (1997)

Segundo Bardini (2013) a adição de materiais finos chamados de fíleres no ligante asfáltico melhora o comportamento mecânico, reológico e também a susceptibilidade da mistura à água.

Fíleres melhoram a adesividade da mistura asfáltica. E a cal hidratada além de melhorar a adesividade também aumenta a rigidez do pavimento. No estudo do autor o emprego de apenas 1% de cal hidratada melhorou significativamente a resistência à tração e módulo de resistência da mistura asfáltica (LUZZI *et. al.*, 2017).

Entretanto, apesar de, os fíleres melhorarem significativamente as propriedades das misturas asfálticas precisam ser dosados adequadamente para não ocorrer o enrijecimento excessivo do pavimento.

Segundo Ferrão e Moizinho (2017) a concentração de fíleres aproxima as partículas do ligante e diminui os poros tornando a mistura mais rígida. Quando a concentração é maior que um valor crítico compromete a vida de fadiga do pavimento. É recomendado um valor 10% a 20% menor que o valor crítico. A concentração é dada pela Equação 14 a seguir:

$$C = \frac{1}{\frac{\%b \cdot Df}{\%f \cdot Db + 1}} \quad (14)$$

Onde:

%b: Porcentagem de asfalto na amostra, em peso;

Df: Densidade do fíler;

%f: Porcentagem do fíler na amostra, em peso;

Db: Densidade do asfalto.

A concentração crítica é encontrada por meio de um ensaio de sedimentação em querosene e é calculada por meio da seguinte Equação 8:

$$Cr = \frac{P}{V \cdot \delta f} \quad (15)$$

Sendo:

P: Peso seco do fíler após 24h;

V: Volume de fíler condicionado em querosene de anidro;

δf : Peso específico do fíler.

Materiais finos empregados no mástique alteram a viscosidade e atuam como agente rigidificador. Segundo Barra (2009) o trabalho de Al-Suhaibani et. al. (1992), apresenta que o emprego de pó calcário e cal hidratada tiveram maior efeito rigidificador que o cimento Portland.

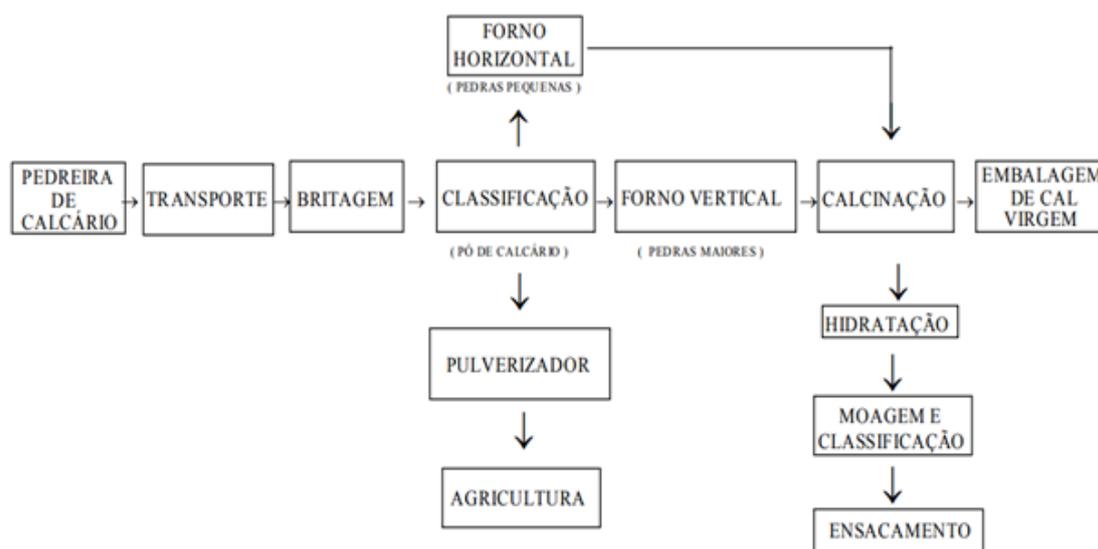
Materiais eletropositivos tem maior afinidade com o ligante betuminoso, essa melhor atração com o uso da cal hidratada e do pó calcário é uma das justificativas para o aumento da rigidez da mistura. Outros fatores estão associados ao aumento do volume na dosagem do mástique, finura das partículas e reações químicas. Comparando fíler de pó de pedra e pó calcário, analisando o comportamento o poder de rigidificação é semelhante, isso pode ser associado às características dos grãos de ambos que são de forma (subangular com arestas vivas) e textura (rugosa). Entretanto, quando analisados de forma química a adesividade proveniente da adição de pó calcário quando comparado ao fíler de pó de pedra é maior, devido sua natureza eletropositiva, que contrapõem a característica química do pó de brita, e aumenta afinidade com o ligante betuminoso (BARRA, 2009).

3.1 PROCESSAMENTO DAS ROCHAS CALCÁRIAS

O processo de fabricação da cal hidratada pode ser resumida em extração, britagem, queima, hidratação, armazenamento e transporte.

Na Figura 5 é apresentado um fluxograma do processo produtivo da cal e do calcário.

Figura 5 - Produção da cal e calcário



Fonte: Fonte: Medeiros (2011)

O processo inicia com a perfuração da jazida para a extração de rochas calcárias, que posteriormente são transportadas até o britador. No processo de britagem as rochas são classificadas de acordo com sua granulometria e então são divididas para ir para o britador primário ou secundário. Após a separação os materiais vão para o forno, nessa etapa ocorre a calcinação que é a queima do carbonato de cálcio a aproximadamente 900°C liberando CO₂. A decomposição do calcário (CaO + CO₂), forma a cal virgem que é um óxido de cálcio, produto bastante reativo. A cal virgem é levada novamente para o britador onde é reduzido seu diâmetro, o passo seguinte é o processo de hidratação onde em contato com água, a cal virgem se transforma no hidróxido de cálcio ou cal hidratada (CaO + H₂O). Após o processamento os materiais já podem ser embalados para venda, sobre a forma de pó calcário, cal virgem ou cal hidratada (MEDEIROS, 2011).

3.2 PÓ CALCÁRIO E CAL HIDRATADA NAS MISTURAS ASFÁLTICAS.

Segundo Guimarães (2002), na época de 1900 a 1930 foram feitas experiências adicionando entre 1% e 2% (em peso) de cal hidratada em pavimentos asfálticos. A experiência obteve sucesso e até foi patenteado em 1910 pela Warren B.C de Boston. A cal foi aplicada com o objetivo de diminuir os vazios e aumentar a adesividade. Em 1958 foi utilizado em misturas asfálticas pelo Colorado High-way Dept. dos Estados Unidos, obtendo resultados melhores do que os obtidos com o emprego de calcário pulverizado, cimento Portland e agentes anti-degradantes nas misturas asfálticas. No Brasil começou sendo aplicado pelo DNER em 1940, em uma rodovia do Rio Grande do Sul.

É importante ressaltar que maneira geral o fíleres de pó calcário e cal hidratada melhoram as condições de adesividade e reduzem o teor de vazios das misturas asfálticas, entretanto é necessário caracterizar de forma física e química o material empregado. Os resultados de afinidade com o ligante betuminoso variam significativamente de acordo com tipo de cal e o tipo de calcário que está sendo empregado.

Misturas asfálticas em contato com a água podem sofrer perda da adesividade e da coesão entre o agregado e ligante. Segundo Barra (2005), de maneira geral o pó calcário auxilia na melhora a adesividade das misturas asfálticas, pois possui natureza eletropositiva e em conjunto com o ligante asfáltico forma o Naftanato de cálcio que é um sal não é solúvel em água fazendo com que as ligações entre o concreto asfáltico e os agregados também não sejam, esse conceito pode ser chamado de adesividade ativa. Entretanto, a reatividade química do calcário depende do tipo de calcário que está sendo usado, e dos materiais que o compõem. De forma geral, o pó calcário tem poder cimentante na mistura asfáltica, altera a viscosidade ao formar o mástique asfáltico. Melhora a resistência mecânica, pois aumenta o ponto de amolecimento, diminui a penetração e susceptibilidade térmica.

O uso de cal torna essas misturas mais rígidas e desta forma resistem melhor a deformações permanentes, retardando trincas e oxidação do concreto asfáltico (BUDNY, 2009).

A cal aumenta a durabilidade e qualidade dos pavimentos asfálticos. Esse material faz com que o ligante asfáltico tenha uma maior viscosidade e também com

que seja mais impermeável. Tornando, desta forma, o pavimento menos susceptível a temperatura e ação da água. A cal atual no preenchimento dos vazios, tornando a mistura mais resistente. E a alcalinidade deste material retarda a oxidação do asfalto (GUIMARÃES, 2002).

A baixa adesividade da mistura asfáltica causa o descolamento entre ligante e partículas dos agregados, na presença de água, levando o pavimento a ter trincas e deformações permanentes. Desta forma, diminuir a influência da ação da umidade sobre a mistura que compõe o pavimento asfáltico melhora a sua durabilidade. O aumento da afinidade entre os componentes das misturas asfálticas pode ser feita pela adição de fíleres ativos como a cal hidratada CH I e cimento Portland, ou aditivos orgânicos (PEREIRA, 2012).

O descolamento da película de ligante é chamada de stripping, ocorre na parte inferior da camada de rolamento se propagando até a superfície, devido aos esforços de tração. A perda de adesão ocorre logo no início da utilização do pavimento, e se deve principalmente ao baixo intertravamento ou falta de afinidade entre as superfícies do ligante e do agregado. O ligante asfáltico (hidrocarbonetos aromáticos) possui maior afinidade com os grupos polares (água) do que com a superfície dos agregados (GRANDE, 2011).

A cal hidratada é utilizada para reduzir à susceptibilidade da mistura asfáltica à umidade (stripping). A adição de cal trás muitos benefícios ao pavimento como resistir a fraturas em baixas temperaturas, diminuir os efeitos da oxidação, alterar as propriedades plásticas aumentando a durabilidade do pavimento (LITTLE, 2001 *apud* GRANDE, 2011).

O pó calcário apresenta menor poder reativo do que a cal hidratada porque em sua composição química, possui partículas a base de carbono que são eletronegativas o que gera certa repelência ao reagir com o ligante betuminoso. Após a reação exotérmica no forno perde calor e expulsa CO₂, transforma-se na cal virgem que é extremamente eletropositiva. Desta forma, a cal proporciona maior adesividade com o ligante betuminoso do que o pó calcário. Ao adicionar água formando a cal hidratada, aumenta o poder cimentício deste material.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a caracterização dos materiais que foram utilizados nas misturas asfálticas e os ensaios que foram utilizados para obter os resultados da pesquisa.

4.1 ENSAIOS PARA OS AGREGADOS

Para caracterizar os granulares foi feito o ensaio de índice de forma, de abrasão (Lós Angeles) e microscopia. Os ensaios de índice de forma e Lós Angeles foram fornecidos por laudo fornecido pela empresa parceira.

4.1.1 Ensaio de índice de forma

A forma dos agregados que compõem o esqueleto mineral influem na resistência ao cisalhamento e na trabalhabilidade da mistura asfáltica, partículas mais angulares proporcionam maior intertravamento da mistura (BERNUCCI et. al., 2007).

O formato das partículas dos agregados é determinado pelo normatizado pela DNER-ME 086/94, na qual os agregados são classificados com f variando entre 0 e 1, sendo de $f=0$ um agregado lamelar e com $f=1,0$ possui ótima cubicidade. Essa norma específica como calcular o índice de forma “ f ” do material, em que, crivo I e crivo II denominam uma série de peneiras e uma série de peneiras com redutor respectivamente. O índice de forma é calculado por meio da Equação 16:

$$f = \frac{P1 + 0,5P2}{100n} \quad (16)$$

Em que:

f = Índice de forma;

$P1$ = Soma de todas as graduações que compõem o crivo I;

$P2$ = Soma de todas as graduações que compõem o crivo II;

n = Número de graduações que compõem a mistura.

Segundo Bernucci et. al. (2007) outra forma que classifica se os agregados tem forma mais lamelar ou cúbica é por meio do ensaio em que os agregados são medidos com um paquímetro em três dimensões: (a) comprimento, (b) largura e (c) espessura. Para classificar a amostra são feitas as seguintes razões b/a e c/a . As faixas de classificação são as seguintes:

- $b/a > 0,5$ e $c/b > 0,5$ – Cúbica;
- $b/a < 0,5$ e $c/b > 0,5$ – Alongada;
- $b/a > 0,5$ e $c/b < 0,5$ – Lamelar.
- $b/a < 0,5$ e $c/b < 0,5$ - Alongada – lamelar

4.1.2 Ensaio de desgaste por abrasão Lós Angeles.

O ensaio de abrasão ou Lós Angeles é normatizado pela DNER-ME 035/98 e determina o desgaste sofrido pelo agregado quando submetido a uma carga abrasiva.

Uma quantidade de material especificado pela normativa, demonstrado na Tabela 3, é inserido em um tambor giratório junto com esferas de aço, e esses materiais são submetidos a rotação para que ocorra o choque entre as partículas.

Tabela 3 - Quantidade de agregados

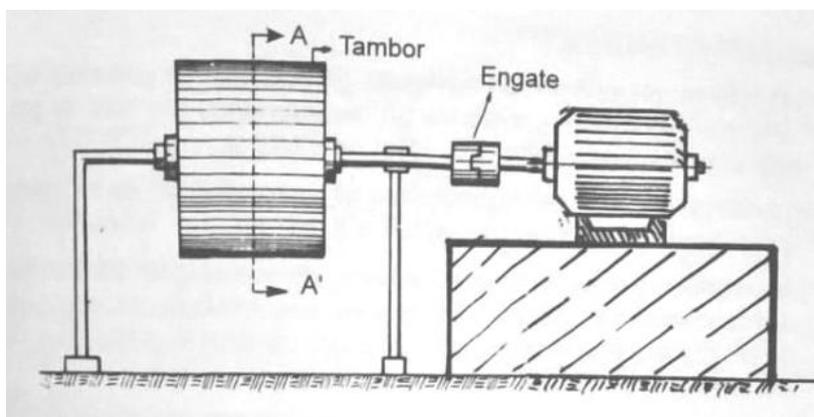
PENEIRAS ABERTURA EM mm		AMOSTRA – MASSA PARCIAL EM GRAMAS						
Passando em	Retido em	Grad. A	Grad. B	Grad. C	Grad. D	Grad. E	Grad. F	Grad. G
76	63	-	-	-	-	2500 ± 50	-	-
63	50	-	-	-	-	2500 ± 50	-	-
50	38	-	-	-	-	5000 ± 50	5000 ± 50	-
38	25	1250 ± 25	-	-	-	-	5000 ± 25	5000 ± 25
25	19	1250 ± 25	-	-	-	-	-	5000 ± 25
19	12,5	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-	-	-	-
12,5	9,5	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-	-	-	-
9,5	6,3	-	-	2500 ± 10	-	-	-	-
6,3	4,8	-	-	2500 ± 10	-	-	-	-
4,8	2,4	-	-	-	5000 ± 10	-	-	-
Massas totais em gramas		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	10000 ± 100	10000 ± 75	10000 ± 50
Nº de rotações do tambor		500	500	500	500	1000	1000	1000

Fonte: DNER-ME 035/98

Segundo Senço (2007) é um ensaio misto de abrasão e impacto que simula o

efeito do comportamento dos agregados diante do tráfego de veículos na pista. O equipamento utilizado para executar o ensaio de Lós Angeles está demonstrado na Figura 6.

Figura 6 - Ensaio Lós Angeles



Fonte: Senço (2007)

4.2 MATERIAIS

Os materiais que compõem a mistura asfáltica são os granulares que são os materiais pétreos, ligante asfáltico CAP 30/45 e alguns fileres.

4.2.1 Granulares

A morfologia dos agregados foi determinada pelos ensaios de Índice de Forma, Lós Angeles e microscopia ótica. As características mineralógicas dos granulares foram retiradas do trabalho de Meurer (2015), que caracterizou os materiais pétreos da jazida da empresa Rudnick Minérios, onde se origina os granulares utilizados nesse trabalho.

De acordo com Meurer (2015) a jazida da empresa Rudnick Minérios está localizada em um complexo rochoso de transição entre o Granito Piraí e o complexo granulítico de Santa Catarina. O material proveniente desta jazida pode ser classificado como gnaisse.

. O ensaio de microscopia ótica dos agregados indicou a seguinte caracterização mineralógica para o material, como mostrado na Tabela 4:

Tabela 4 - Caracterização mineralógica

Minerais	Composição
Quartzo	36%
Plagioclásio	29%
Ortoclásio	-
Anfibólito	22%
Granda	-
Piroxênio	7%
Biotita	4%
Muscovita	-
Clorita	-
Sericita	-
Apatita	-
Zircão	-
Opacos	2%

Fonte: Meurer (2015)

A caracterização quanto às características físicas do material empregado são apresentadas na Tabela 5. Os dados foram fornecidos por laudo fornecido pela empresa produtora.

Tabela 5 - Caracterização dos agregados.

Ensaio	Resultado Obtido em Laboratório	Limite Normativo	Norma
Desgaste por Abrasão Los Angeles	17,5%	≤ 50%	DNER-ME 35/98 e DNER-EM 37/97
Durabilidade ao Sulfato de Sódio	5,3%	≤ 12%	DNER-ME 89/94 e DNER-EM 37/97
Índice de Forma (Lamelaridade)	0,6	≥ 0,5	ABNT NBR 7809/2006
Adesividade ao Agregado Graúdo	Má*	-	DNER-ME 78/94
Equivalente de Areia	78%	-	DNER-ME 54/97
Teor de Material Pulverulento	0,4%	≤ 1,0%	DNER-ME 266/97 e DNER-EM 37/97

Fonte: Autor (2018)

Apesar de a literatura colocar que cubicidade significa boa condição de intertravamento, o ideal é que as amostras sejam subangulares. Por que o excesso de cubicidade, não é adequado para o intertravamento, pois significa que o agregado possui

arestas muito planas. De acordo com os ensaios de caracterização os granulares utilizados na pesquisa são subangulares em todas as frações mostrando adequados para o uso em obras de pavimentação.

Entretanto, o material apresentou adesividade inadequada, fora dos limites normativos. Nesse caso é recomendado que seja utilizada a dopagem ou adições que melhorem esta condição dos granulares em misturas asfálticas.

A curva granulométrica foi obtida pelo método teórico Füller-Talbot, utilizando a curva de Barra (2009). A separação das frações granulométricas será feita com o uso das peneiras com as seguintes aberturas da malha: 12,70mm; 9,50mm; 4,76mm; 2,20mm; 1,20mm, 0,60mm; 0,30mm; 0,15mm; 0,075mm e fundo.

O fundo é material passante na peneira 0,075mm também é chamado de fíler e essa foi a fração substituída nas misturas com CTC, CTCH e CTPC. Na Tabela 6 apresentada a seguir é demonstrada a quantidade dos materiais que compõe a mistura asfáltica em porcentagem com relação a massa total do corpo de prova que é de aproximadamente 1200g.

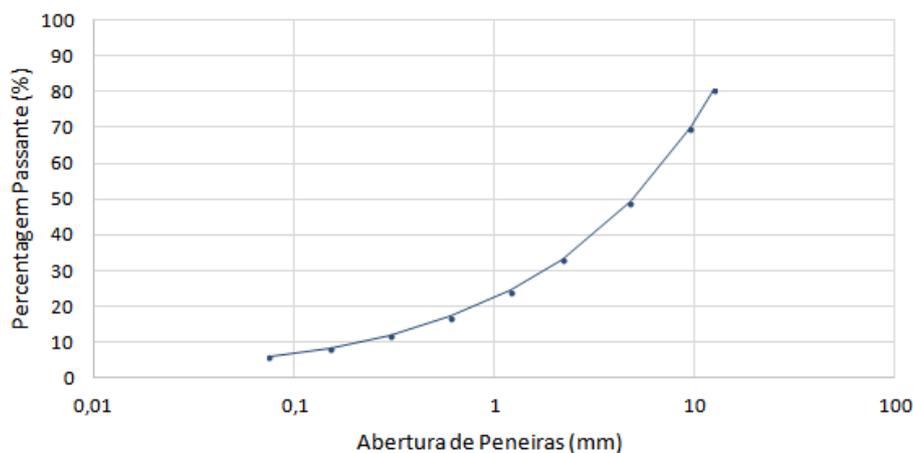
Tabela 6 - Composição da mistura asfáltica.

Componentes da mistura asfáltica (%)					
Quant. Ligante (%)	4,22	4,54	4,7	4,86	5,18
	0,96	0,95	0,95	0,95	0,95
Abertura peneira (mm)	Quant. Agregados (%)				
12,7	18,62	18,56	18,53	18,50	18,44
9,5	10,08	10,04	10,03	10,01	9,98
4,76	19,92	19,86	19,82	19,79	19,72
2,2	15,34	15,29	15,27	15,24	15,19
1,2	8,46	8,43	8,42	8,40	8,37
0,6	6,95	6,93	6,92	6,91	6,88
0,3	4,88	4,87	4,86	4,85	4,83
0,15	3,43	3,42	3,41	3,41	3,39
0,075	2,41	2,40	2,40	2,39	2,38
FUNDO	5,68	5,66	5,65	5,64	5,62
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total de gran.	95,78	95,46	95,3	95,14	94,82
Gran + Ligante	100	100	100	100	100

Fonte: Autor (2018)

A curva teórica Füller-Talbot utilizada no trabalho esta apresentada a seguir na Figura 10. A curva foi retirada do trabalho de Barra (2009).

Figura 7 - Curva granulométrica utilizada no estudo.



Fonte: (Barra 2009, p. 157)

A curva teórica de Füller-Talbot formula uma mistura asfáltica bem densificada, em que as frações mais finas preenchem gradualmente os vazios deixados pelos granulares maiores.

4.2.2 Cal hidratada

De acordo Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT (NBR 7175-2003) a cal hidratada é obtida pela hidratação da cal virgem, sendo encontrada como uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio ou também com óxido de magnésio. Pode ser estar na forma CH I, CH II ou CH III, que diferem no teor de carbono, grau de impurezas e granulometria. A CHI é considerada a cal hidratada mais pura porque atende aos limites normativos melhor do que os outros dois tipos de cal, e também porque é o tipo de cal que possui os teores mais altos de CaO e MgO, por isso foi a cal utilizada nesse trabalho. Nas Tabelas 7 e 8 são apresentadas as propriedades físicas e químicas que a cal hidratada deve apresentar para ser considerada de boa qualidade de acordo com as normativas da ABNT.

Tabela 7 - Propriedades químicas da cal hidratada

Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Anidrido Carbônico (CO ₂)	Na fábrica	≤ 5%	≤ 5%	≤ 13%
	No depósito	≤ 7%	≤ 7%	≤ 15%
Óxido de cálcio e magnésio não hidratado calculado (CaO + MgO)		≤ 10%	≤ 15%	≤ 15%
Óxidos totais na base de não-voláteis (CaO _t + MgO _t) ²		≥ 90%	≥ 88%	≥ 88%

Fonte: NBR 7175 (ABNT, 2003)

Tabela 8 - Propriedades físicas da cal hidratada.

Compostos		Limites		
		CH - I	CH - II	CH - III
Finura (% retida acumulada)	Peneira 0,600 mm	-0,50%	-0,50%	-0,50%
	Peneira 0,075 mm	-10%	-15%	-15%
Retenção de água		≥75%	≥75%	≥70%
Incorporação de areia		≥ 3,0	≥ 2,5	≥ 2,2
Estabilidade		Ausência de cavidade ou protuberâncias		
Plasticidade		≥ 110	≥ 110	≥ 110

Fonte: NBR 7175 (ABNT, 2003)

A cal passa por um processo de calcinação que dá origem a seis diferentes produtos. Devido a grande aplicabilidade da cal, podendo ser usada tanto como um reagente químico assim como um aglomerante-ligante, o material se aplica em diversos setores industriais. A cal está entre os dez produtos mais consumidos no mundo (GUIMARÃES, 2007).

A cal utilizada na pesquisa é apresentada a seguir, na Figura 8:

Figura 8 - Cal hidratada CHI.



Fonte: Autor (2018)

O material utilizado na pesquisa será fornecido pela empresa Cal Cem Indústria de Minérios LTDA de Colombo no estado do Paraná. As informações apresentadas na Tabela 9 foram retiradas do laudo fornecido pela empresa produtora.

Segundo Guimarães (2002) após as rochas calcárias passarem pelo processo de calcinação formam um produto que depende das características e impurezas da rocha mãe. A cal formada pode ser classificada da seguinte forma:

- Cal calcítica: Alto teor de cálcio
- Cal dolomítica: Quando possui a relação entre óxido de cálcio e magnésio a proporção molecular.
- Cal magnesianas: Possui teores de óxido de magnésio intermediários entre a cal cálcica e a cal dolomítica.

A cal pode ter alto teor de cálcio ou de magnésio. Sendo que a que possui alto teor de cálcio possui menos de 5% de MgO, caso apresente teor elevado de magnésio a cal e pode ser classificada como dolomítica (SAMPAIO; ALMEIDA, 2018).

Tabela 9 - Propriedades específicas da cal hidratada

Cal Hidratada CHI			
	Resultado (%)	Ensaio	Resultado (%)
Perda ao fogo (PF):	25,74	#30 (0,60mm)	0
Silica e Resíduo Insolúvel (SiO ₂ + RI):	5	#200 (0,075mm)	5,9
Óxido de Cálcio (CaO):	40,24	Densidade	0,55
Óxido de magnésio (MgO):	28,82	Umidade	0,5
Óxidos Totais (CaO + MgO) NV :	93		
Anidrido Carbônico (CO ₂):	3,31		
Óxidos totais não hidratados:	5,3		
Água combinada:	22,93		
CaO não hidratado:	0		
CaO + MgO:	69,06		

Fonte: Autor (2018)

Segundo Bock (2012) a cal pode ser classificada de acordo com a concentração de cálcio e magnésio, sendo da seguinte maneira:

- Calcíca ou calcítica: Possui porcentagem de CaO maior que 90% ;
- Magnesianas: Porcentagem de CaO entre 65 e 90% .
- Dolomítica: Porcentagem de CaO menor que 65% .

A cal hidratada foi classificada como um pó micropulverizado a base de cálcio

e óxido de magnésio, de natureza dolomítica.

A cal dolomítica é bastante utilizado em pavimentação, devido o hidróxido de cálcio Ca(OH)^2 presente no material melhorar a adesividade do ligante com o ligante (LUZ, 2016).

4.2.3 Calcário

O calcário provém de rochas carbonatadas, seu principal componente mineralógico é a calcita (CaCO_3). Varia da cor creme amarelada a tonalidades de cinza, sendo extraído em jazidas, normalmente provenientes de bacias sedimentares, podendo ser facilmente encontrado em todos os continentes. Tem idade geológica desde o Pré-cambriano até o Holoceno (SAMPAIO; ALMEIDA, 2017).

O calcário utilizado na pesquisa possui tonalidade cinza e é apresentado na Figura 9, a seguir:

Figura 9 - Pó calcário.



Fonte: Autor (2018)

Rocha carbonáticas calcário e dolomita são as rochas sedimentares mais abundantes na natureza. O calcário é formado de calcita (CaCO_3), a calcita dissolve-se facilmente em águas ácidas e pouco solúvel em água comum, essa dissolução pode ser revertida (WICANDER; MONROE, 2011).

O Calcário empregado no trabalho foi extraído da empresa Calcário Botuverá Mineração Rio do ouro LTDA que explora uma mina em Botuverá-SC, mesma explorada é mostrada na Figura 10, a seguir.

Figura 10 - Extração de calcário



Fonte: Botuverá, (2018)

O calcário foi empregado na forma de pó, possui cor acinzentada e origem calcítica. Quando a natureza química possui maior concentração de óxido de cálcio (CaO) e baixo teor de óxido de magnésio (MgO) (abaixo de 5%) (BOTUVERÁ, 2018).

O laudo fornecido pela empresa parceira indicou as características químicas apresentadas na Tabela 10 para o calcário calcítico utilizado.

Tabela 10 - Caracterização química do calcário.

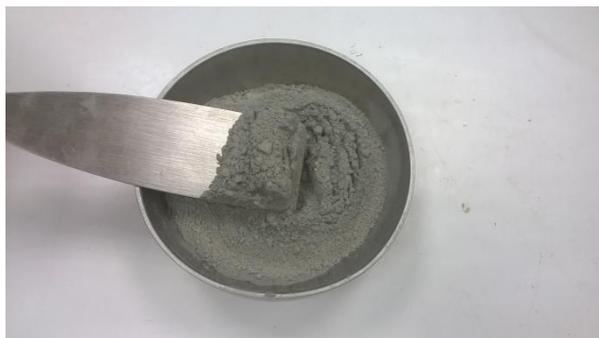
Material	Quantidade (%)
PN	86,65
PRNT	79,64
CaO	44,48
MgO	4,89
Ca	-
S	-

Fonte: Autor (2018)

4.2.4 Fíler de pó de pedra

O fíler de pó de pedra utilizado na pesquisa foi fornecido pela empresa Rudnick Minérios Ltda. A análise química deste material segue a mesma característica do outros granulares pétreos fornecidos pela empresa parceira, e está demonstrada na Tabela 4 da página 35. O material utilizado está demonstrado na Figura 11 a seguir:

Figura 11 - Fíler de pó de pedra.



Fonte: Autor (2018)

O fíler de pó de pedra é também chamado de areia artificial por se encaixar na mesma faixa granulométrica, (dimensão nominal máxima inferior a 0,075mm), segundo a NBR 7225 (ABNT, 1993). Entretanto, possui maior angulosidade dos grãos do que a areia, desta forma produz um melhor intertravamento.

Esse fíler é originado da britagem de rochas gnáissicas e graníticas e apresenta boa dureza. Quando produzida por rochas de granito, que é a mesma matéria prima do agregado brita, apresenta a desvantagem de não ser um material muito abundante, pois após a britagem dos materiais pétreos geralmente sobra pouco fíler como resíduo desse processo. Por isso, torna-se interessante estudar a aplicabilidade de fíleres comerciais como o pó calcário e a cal hidratada. Além da fácil obtenção as rochas calcárias também apresentam como vantagem quanto a dureza, que é menor do que as das rochas de graníticas, facilitando a sua extração, e tornando esse processo mais econômico (BARRA, 2005).

4.2.5 Ligante asfáltico

O ligante asfáltico que será utilizado no trabalho será o Concreto Asfáltico de Petróleo CAP 30/45, proveniente da Refinaria Presidente Getulio Vargas (REPAR), na cidade Araucária, estado do Paraná.

Segundo Fraenkel (1980) ligante asfáltico pode ser encontrado na natureza em conjunto com impurezas ou por meio da destilação do petróleo bruto, mas a destilação é a principal fonte dos ligantes empregados na pavimentação. O processo ocorre em uma torre de fracionamento a vácuo, onde são separadas as frações leves (gasolina, querosene e gásóleo) por vaporização, fracionamento e condensação. O que resta no fundo da torre é o ligante asfáltico, que é semi-sólido em temperatura ambiente.

De acordo com Bernucci et. al. (2007) o revestimento asfáltico é a forma mais utilizada no Brasil para a pavimentação de estradas, trás como vantagem a flexibilidade, impermeabilização e resistência a álcalis, ácido e sais. O ligante asfáltico é produzido através da destilação do petróleo e pode ser considerado um adesivo viscoelástico linear. O ligante é semi-sólido a baixas temperaturas, sólido a temperatura ambiente e liquido a altas temperaturas, ou seja, a temperatura influencia diretamente no comportamento mecânico do mesmo. O ligante sofre envelhecimento por oxidação com o tempo devido o contato com água e ar, e varia seu comportamento de acordo com a velocidade, tempo e intensidade do carregamento. As propriedades dos ligantes asfálticos também são influenciadas pelas fases de refinamento do petróleo, como a produção, estocagem, manuseio.

Para a adequada caracterização do ligante asfáltico são feitos ensaios de ponto de amolecimento anel e bola, penetração, viscosidade Saybolt-Furol e índice Pfeiffer e Van Doormaal (IP). Os resultados desses ensaios para o ligante utilizado nessa pesquisa foram retirados do laudo fornecido pela empresa parceira.

4.2.5.1 Ensaio do anel e bola

Este ensaio é normatizado pela DNIT-ME 131/2010, e sua execução permite determinar o ponto de amolecimento do ligante asfáltico na faixa de temperatura entre 30°C e 157°C.

De acordo com Bernucci et. al. (2007), o ensaio correlaciona a temperatura e a condição de escoamento do ligante asfáltico e, desta forma apresenta um resultado para susceptibilidade térmica do ligante asfáltico. Uma esfera bola de aço e colocada sobre uma amostra de asfalto no centro de um anel metálico, o conjunto é colocado em banho de água aquecida a 5°C/minuto em um béquer. Quando o ligante amolece, a amostra e a bola vão para o fundo do béquer, a temperatura neste instante é anotada.

4.2.5.2 Ensaio de penetração

O ensaio de penetração é normatizado pela normal DNIT-ME 155/2010. Segundo o Bernucci et. al. (2007) a penetração é a profundidade em mm que uma agulha de massa (100g) penetra em uma amostra de ligante asfáltico a 25°C por 5 segundos. O ensaio mensura a consistência do ligante, que é maior quando menor for a

penetração.

4.2.5.3 Índice de penetração ou índice de susceptibilidade térmica.

É importante analisar a susceptibilidade térmica dos ligantes asfálticos, pois se forem muito susceptíveis podem sofrer grande variação nas propriedades mecânicas com a temperatura ambiente, e dessa forma não são desejáveis para construção de pavimentos. Para analisar esta propriedade é calculado o índice de susceptibilidade térmica por meio do método de Pfeiffer e Van Doormaal. (BERNUCCI *et al.*, 2007)

$$IP = \frac{500 \cdot \log(P) + 20 \cdot PA - 1951}{120 - 50 \cdot \log(P) + PA} \quad (17)$$

IP: Índice de penetração por Pfeiffer e Van Doormaal;

P: Penetração no ligante asfáltico em (mm) a 25°C;

PA: Temperatura (°C) do ponto de amolecimento do ligante, obtido no ensaio anel e bola.

A faixa que classifica os valores de acordo com o IP varia entre (-1,5) e (+0,7). Valores maiores que (+1) caracterizam asfaltos pouco susceptíveis a temperaturas elevadas e quebradiços a temperaturas mais baixas. Valores menores que (-1,5) indicam asfaltos muito sensíveis á temperatura, nesse caso amolecem rapidamente (BERNUCCI *et al.*, 2007).

A consistência do ligante é utilizada para prever uma faixa de temperaturas na qual irá ter-se uma melhor trabalhabilidade da mistura asfáltica.

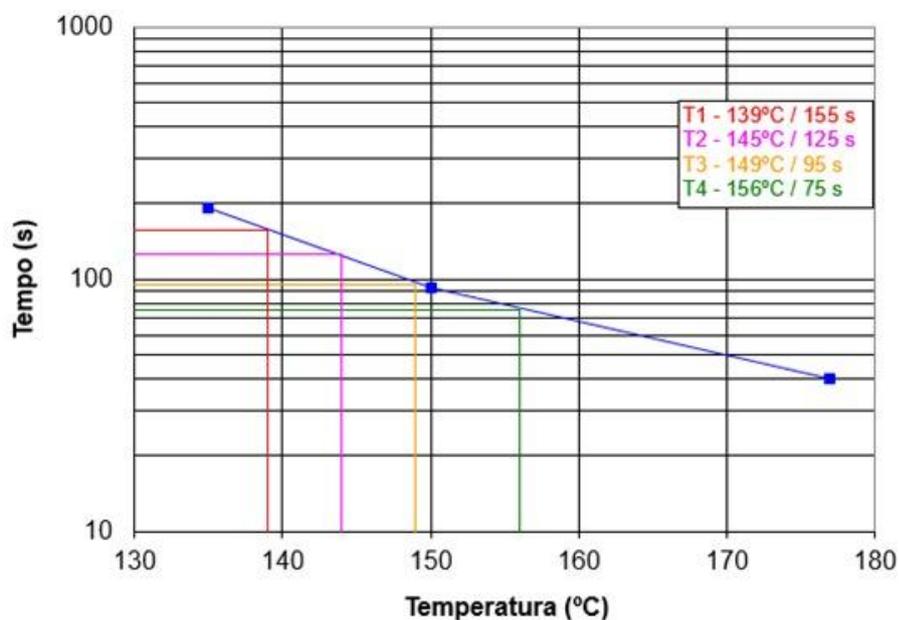
4.2.5.4 Viscosidade por meio do método Saybolt-Furol

A viscosidade é a medida da resistência ao escoamento do ligante asfáltico. Essa medida de consistência pode ser determinada pelo ensaio de Saybolt-Furol normatizado pela ABNT NBR 14756/2001. O ensaio determina uma curva de viscosidade-temperatura que é importante para determinar em que consistência o ligante consegue cobrir os granulares. O valor da viscosidade é dada em segundos de Saybot-Furol.

O ensaio é constituído por um equipamento com dois tubos, o tubo com óleo é aquecido até estabilizar em uma temperatura, entre (25 e 170°), a qual depende do material. No ensaio um orifício é aberto e o material escoo para outro tubo. É contado o tempo de escoamento do ligante desde abertura do orifício até atingir a marca dos 60ml no tubo receptor.

A partir dos resultados do ensaio de viscosidade de Saybolt-Furol é possível construir o gráfico, apresentado Figura 12, mostrada a seguir:

Figura 12- Curva de viscosidade



Fonte: Autor (2018)

Os resultados obtidos na curva de viscosidade podem fornecer as temperaturas que são utilizadas para a fabricação dos corpos de prova pela metodologia Marshall. De acordo com a interpretação do gráfico a temperatura de compactação encontrada foi de 145°C, a de usinagem 153°C e a temperatura. E a temperatura dos agregados é a temperatura de usinagem mais 13°C, sendo o valor encontrado igual a 166°C.

4.3 ENSAIOS PARA AS MISTURAS ASFÁLTICAS

4.3.1 Ensaio de adesividade

Segundo a (DNER-ME 078/1994) a adesividade é a propriedade que determina o envolvimento entre a película de ligante e o agregado. No ensaio a mistura é imersa em água destilada durante 72 horas, é verificado se não ocorre o descolamento da película gerada pelo ligante.

Agregados silicosos, quartezitos e granito possuem baixa adesividade com o ligante asfáltico (BERNUCCI et. al., 2007).

Segundo o Manual de Pavimentação (2006) do DNER uma boa adesividade da mistura asfáltica é caracterizada pelo não descolamento da película de ligante na presença de água. Os granulares ácidos e hidrofílicos (calcários, basaltos) aderem melhor ao ligante do que granulares básicos e hidrofóbicos, como granito e gnaiss. A adesividade pode ser melhorada aplicando substâncias que melhorem essas propriedades, os melhoradores de adesividade podem ser sólidos (cal, calcário, cimento Portland) ou líquidos (alcatrão e dopes).

O ensaio de adesividade foi executado para estabelecer um comparativo entre a reatividade dos fíleres utilizados com o ligante. A Figura 13 a seguir demonstra o ensaio com os diferentes fíleres.

Figura 13 - Ensaio de adesividade



Fonte: Autor (2018)

A mistura CTCH não apresentou o descolamento da película de ligante, demonstrando-se adequada para o uso em obras de pavimentação sem que haja

necessidade de dopagem. Entretanto, as misturas CTC e a CTPC não apresentaram uma adesividade adequada, o ligante descolou-se do agregado. O descolamento pode ser explicado pela repulsão entre as cargas negativas do ligante e os fíleres pó calcário e fíler de pó de pedra.

O pó calcário diferentemente da cal não passa pelo processo de calcinação então apresenta muito dióxido de carbono em sua composição. O dióxido de carbono é um material eletronegativo que gera repelência em contato com o ligante betuminoso. Entretanto, ainda que o pó calcário não tenha apresentado as condições ideais de adesividade, apresentou melhores condições de adesividade do que o fíler de pó de brita. Isto se deve a presença de MgO e CaO em sua composição, que são materiais eletropositivos.

O fíler de pó de pedra, assim como os agregados pétreos, caracterizados na Tabela 4 da página 35 apresentam muito quartzo, plagioclásio e anfíbrito em sua composição que são materiais extremamente eletronegativos, gerando repelência com o ligante asfáltico. Essa caracterização química explica a péssima adesividade encontrada na mistura CTC.

Para as misturas CTC e CTPC sugere-se que seja feito o emprego de melhoradores de adesividade. Entretanto, nesta pesquisa não foi utilizado nenhum aditivo químico melhorador de adesividade para ser possível verificar o real efeito dos fíleres estudados.

4.3.2 Metodologia Marshall

Segundo a norma DNER-ME 043/95 o ensaio de Marshall determina a estabilidade e fluência das misturas asfálticas usinadas a quente. Na qual estabilidade é a medida da resistência à compressão diametral do corpo de prova expressa em (N). E a fluência é a deformação total expressa em (mm) devido à aplicação de uma carga que varia de zero até um valor máximo.

Nesse ensaio também são medidos vários parâmetros volumétricos dos corpos de prova como volume de vazios, volume de vazios com betume, volume de vazios do agregado mineral, relação betume/vazios. Com essas propriedades são construídos gráficos em função do teor de betume que podem ser usadas para determinar o teor de ligante a ser usado na mistura asfáltica (BERNUCCI *et. al.*, 2007).

Para execução da metodologia Marshall foram fabricados corpos de prova para

cinco diferentes teores de ligante, sendo esse (4,54%, 4,70%, 4,86%, 5,18% e 5,5%). Os teores iniciais de ligante foram escolhidos de acordo com outras pesquisas do LDTPav (laboratório de pesquisa em pavimentação) da UFSC Joinville (ARALDI (2017); BÚRIGO (2015); SIROMA (2016); BARRA (2009); BARRA (2005)).

O estudo totalizou 75 corpos de prova com aproximadamente 1200g, sendo feitas as seguintes misturas: CTC (mistura convencional – somente com agregados graníticos britados), CTPC (mistura com pó calcário na fração de fíler), e CTCH (mistura com cal hidratada na fração de fíler).

O ligante é aquecido a temperatura de 153°C até atingir a viscosidade desejada, os agregados são aquecidos separadamente na temperatura de 13°acima da temperatura de usinagem, sendo igual 166 °C. Ao atingirem a temperatura adequada primeiro é adicionada a fração graúda dos granulares e misturada durante (2 a 3min) com o ligante betuminoso em um recipiente aquecido. Em seguida é adicionada a fração fina dos granulares, que auxilia no preenchimento dos vazios da mistura. A Figura 14 mostra o ligante asfáltico sendo misturado com os granulares.

Figura 14 - Mistura asfáltica.



Fonte: Autor (2018)

A mistura pronta é levada para estufa na temperatura de 145°C por aproximadamente 2h, que é a temperatura de compactação. Após esse tempo os corpos de prova podem ser compactados. A mistura é colocada em um molde pré-aquecido e acomodada com 15 golpes, sendo 10 no centro de massa. A Figura 15 apresenta o molde e a máquina de compactação de Marshall utilizada na confecção dos corpos de prova.

Figura 15 - Compactação.



a) Molde de compactação

b) Compactador de Marshall

Fonte: Autor (2018)

Utilizando a máquina de compactação de Marshall são aplicados 75 golpes do soquete em cada lado do corpo de prova, caindo de 45,72cm de altura. Após a compactação, espera-se alguns minutos e o corpo de prova já pode ser retirado do molde. Após esse processo os corpos de prova já estão prontos para serem ensaiados segundo a metodologia Marshall. A Figura 16 mostra os corpos de prova confeccionados para esta pesquisa.

Figura 16 - Corpos de prova.



Fonte: Autor (2018)

Os ensaios executados segundo a metodologia Marshall proporcionam

parâmetros para determinar o teor de trabalho do ligante betuminoso e viabilizar a análise do desempenho das misturas asfálticas. Os resultados finais são representados de maneira gráfica, e são obtidos por diversas formulações.

Com os corpos de prova prontos, são retiradas as respectivas medidas para a verificação da densidade aparente seca (volumétrica). Também é executado o ensaio de densidade á vácuo para verificar a densidade real, e por último são rompidos os corpos de prova para verificar a estabilidade e fluência das misturas estudadas.

A Figura 17 apresenta a medição das propriedades do corpo de prova para determinar a densidade aparente seca.

Figura 17 - Densidade aparente seca



Fonte: Autor (2018)

a) Densidade aparente seca:

Para determinar a densidade aparente da mistura asfáltica foi realizada a pesagem seca dos corpos de prova. Também foram retiradas 3 medidas das alturas das amostras compactadas e calculada uma média aritmética entre esses valores. Com esses valores é possível determinar a densidade aparente volumétrica por meio da seguinte formulação:

$$Dap (s) = \frac{Ms}{Vcp} \quad (18)$$

Onde:

M_s = Massa seca do corpo de prova (g);

M_i = Massa imersa do corpo de prova (g);

V_{cp} = Volume do corpo de prova calculado com a altura média (cm^3).

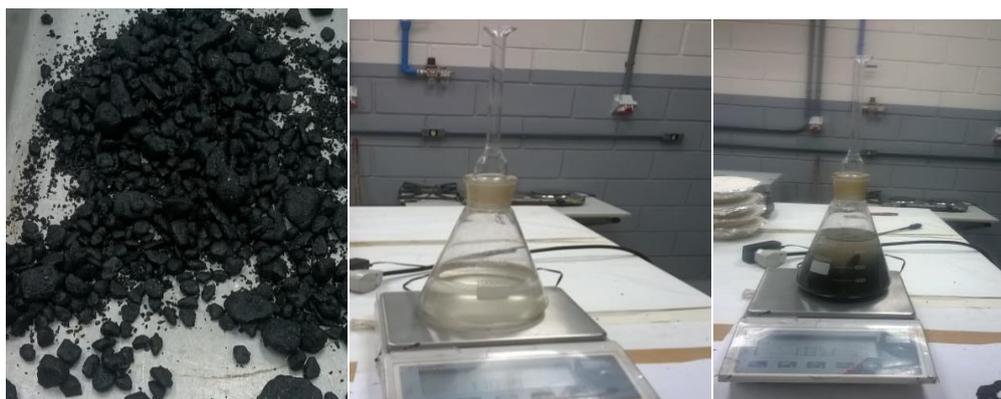
b) Ensaio de densidade máxima teórica real da mistura (MVR):

O ensaio de densidade máxima teórica real da mistura é normatizado pela ABNT (NBR 15619/2016). Esse ensaio é utilizado para projetar a dosagem da mistura asfáltica e também para avaliar a qualidade da mesma. Seja ela produzida em laboratório, usina ou extraída em campo.

Neste ensaio são produzidas duas amostra para cada teor de ligante, e depois de executado o ensaio é feita a média aritmética entre os resultados das massas específicas reais das misturas para obter um valor final. As amostras são produzidas de forma semelhante aos corpos de prova fabricados para o ensaio Marshall, mas em menor quantidade, com apenas 635g, e neste caso a amostra ensaiada não é compactada. Os agregados são misturados com o ligante asfáltico e depois 24h em temperatura ambiente o material pode ser submetido ao ensaio.

O ensaio utiliza um picnômetro do qual é retirado diferentes pesos, como: Peso do picnômetro com água, peso do picnômetro com água mais amostra e peso do picnômetro com água mais amostra após ser submetida ao vácuo. Na Figura 18 são exibidas as imagens do ensaio MVR.

Figura 18 - Ensaio de densidade máxima teórica.



a) Amostra não compactada

b) Picnômetro com água

c) Picnômetro com água e a amostra

Fonte: Autor (2018)

Utiliza-se um picnômetro com rolha que é previamente calibrado para ter seu peso e volume conhecidos. O mesmo é preenchido com aproximadamente 800ml de

água e pesado.

A amostra de mistura asfáltica é esfarelada em uma bandeja para desfazer os grumos, essa amostra é pesada, depois é colocada no picnômetro com a água e rolha e pesada. Após as pesagens iniciais a amostra é colocada em aparelho de vácuo por cerca de 30 minutos, e é vibrada para facilitar a saída de ar da mistura. Após esse procedimento com o auxílio de uma haste a amostra é agitada para retirada das bolhas restante. Então o picnômetro é completado com água até o menisco da rolha, de forma cuidadosa para não introduzir ar na mistura, e o conjunto é novamente pesado.

Utilizam-se esses pesos retirados no ensaio para calcular as densidades das amostras.

Para calcular a densidade real da mistura não compactada (MRV) utilizou-se a seguinte formulação:

$$D_{real} = \frac{(m_3 - m_2)}{v - (m_4 - m_0 - \frac{m_1}{\rho_w})} \quad (19)$$

Onde:

m_0 = Massa da amostra seca (g);

m_1 = Peso do picnômetro vazio com rolha (calibrado) (g);

m_2 = Peso do picnômetro com rolha e água (g);

m_3 = Peso do picnômetro com rolha, água e a amostra (g);

m_4 = Peso do picnômetro com rolha, preenchido com água até o menisco e com a amostra (g);

v = Volume do picnômetro calibrado (cm³);

ρ_w = Densidade da água (g/cm³).

Utilizando a densidade real da mistura não compactada foram calculados outros parâmetros da metodologia Marshall. São esses: O volume de vazios, volume de vazios com betume, vazios do agregado mineral e a relação betumes vazios. As formulações são apresentadas a seguir.

c) Volume de vazios:

O volume de vazios da mistura é dado por:

$$V(\%) = \frac{(D_{real} - D_{ap}(h)) * 100}{D_{real}} \quad (20)$$

Sendo:

V (%)= Teor de vazios da mistura;

D_{real} = Massa específica real da amostra não compactada (g/cm³);

D_{ap}(h) = Massa específica aparente hidrostática da mistura compactada (g/cm³).

d) Volume de vazios com betume:

O volume de vazios com betume apresenta a seguinte formulação:

$$VCB(\%) = \frac{D_{ap}(h) * \%L}{DL} \quad (21)$$

Onde:

VCB(%)= Teor de vazios com betume;

D_{ap}(h) = Massa específica aparente hidrostática da mistura compactada (g/cm³);

%L= Teor de ligante na mistura;

DL= Densidade do ligante (g/cm³).

e) Vazios do agregado mineral:

A partir dos resultados do volume de vazios e volume de vazios com betume pode ser determinado o volume de vazios do agregado mineral:

$$VAM = V + VCB \quad (22)$$

Sendo:

VAM= Volume de vazios do agregado mineral;

V (%) = Teor de vazios da mistura;

VCB (%)= Teor de vazios com betume;

f) Relação betume vazios:

Por ultimo, calcula-se a RBV (Relação betume vazios), com a seguinte formulação:

$$RBV (\%) = \frac{VCB}{VAM} * 100 \quad (23)$$

Onde:

VCB(%)= Teor de vazios com betume;

VAM(%)=Volume de vazios do agregado mineral.

Os valores calculados são parâmetros determinados pela metodologia Marshall. Outros parâmetros que também mensurados por meio desta metodologia são a estabilidade e fluência dos corpos de prova, os mesmo determinam o comportamento mecânico dos corpos de prova ensaiados.

4.3.2.1 Estabilidade e a fluência dos corpos de prova.

Este ensaio é normatizado pela NBR 15785/2010. A prensa e os equipamentos de medição são calibrados antes do inicio do ensaio. Enquanto isso os corpos de provas permanecem banho Maria durante 30min, em uma temperatura de 60°C. Em seguida a amostra é inserida no molde de compressão. A prensa de Marshall avança de maneira constante até que ocorra a ruptura do corpo de prova. A tensão máxima lida pela célula de carga antes da quando ocorre a ruptura é a estabilidade (kgf) e o deslocamento (mm) pertinente a essa tensão é a fluência da mistura. Todos os resultados referentes aos ensaios executados serão apresentados no próximo capítulo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais e a comparação com a normativa vigente.

5.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Analisando-se a natureza química sabe-se que no processo produtivo de transformação das rochas calcárias, as reações no alto forno que transformam o pó calcário em cal hidratada liberam CO_2 tornando a cal virgem mais eletropositiva que na sua forma natural.

Misturas asfálticas produzidas com ligante betuminoso que possuem um grande teor de carbono quando misturado com materiais pétreos de características eletronegativas, como materiais graníticos, quando tem a adição de cal hidratada em alguma das frações, formam um dipolo elétrico que faz uma interação elétrica de atração química entre a mistura asfáltica e o fíler de cal hidratada. Na cal hidratada o maior percentual de CaO e MgO e a maior superfície específica deste material confere a um maior poder rigidificador do que o pó calcário. A hidratação das partículas de cal, também auxilia no aumento da rigidez conferida por esse fíler.

Retomando os resultados encontrados nos laudos da Cal hidratada e do pó calcário pode ser observada a Tabela 11:

Tabela 11 - Caracterização química da cal hidratada

	Cal hidratada	Pó calcário
	Quant. (%)	Quant. (%)
CaO	40,24	44,48
MgO	28,82	4,89
CaO + MgO	69,06	49,37

Fonte: Autor (2018)

Como observado na Tabela 11 a cal hidratada possui quase 70% de sua composição formada por CaO e MgO que são materiais eletropositivos, desta forma, é atraída pelo ligante, que é eletronegativo, formando fortes ligações químicas. Portanto a cal hidratada pode ser considerada mais reativa que o pó calcário, sendo que

aproximadamente 50% da composição do calcário não possui uma boa reatividade com o ligante. Por isso, as misturas CTCH possuem maior afinidade com o ligante betuminoso.

Quando a adesividade a cal hidratada apresentou uma boa adesividade com o ligante betuminoso não sendo necessário inserir melhorador de adesividade.

Entretanto, tanto o pó de brita e os agregados pétreos assim como as misturas contendo pó calcário apresentaram baixa adesividade, sendo necessário ser feita a dopagem da mistura para que a má adesividade não prejudique seu desempenho mecânico. Porém, nesta pesquisa optou-se por não utilizar nenhum melhorador de adesividade químico para que fosse verificado o real efeito do fíleres nas misturas estudadas.

O ensaio de penetração e o anel e bola apresentou os resultados demonstrados na Tabela 12.

Tabela 12 - Análise do mástique

Amostra	Ensaio	
	Penetração (0,1mm)	Ponto de Amolecimento (°C)
CAP Puro	35,0	54,2
CAP + 6% CH-I	19,7	58,0
CAP + 6% Pó Calcário	22,4	57,5
CAP + 6% Pó de Brita	23,2	57,2

Fonte: Autor (2018)

Analisando a Tabela 12 verifica-se que todos os fíleres empregados melhoraram o poder de rigidificação do ligante, aumentando o ponto de amolecimento e diminuindo a penetração. Sendo claro as condições melhores são proporcionadas pela Cal Hidratada, em função de ela possuir maior superfície específica e maior atração elétrica em função da sua maior eletropositividade em relação aos demais fíleres. Porém, foi verificado que ainda que haja proximidade entre a penetração e amolecimento do pó calcário e pó de brita em relação a cal hidratada. É necessário verificar que não é só porque há uma melhora na penetração e ponto de amolecimento que os fíleres podem ser classificados como de boa qualidade. Pois, apesar de apresentarem grande poder de rigidificação não apresentaram boa adesividade. Podem melhorar a rigidificação, mas não melhoram a interação elétrica do agregado com o

ligante, isso faz com que o ligante fique susceptível a ação deletérea da água.

5.2 RESULTADOS DO ENSAIO MARSHALL

A Tabela 13 apresenta os resultados de referência segundo a DNIT ES 031/06 recomenda para misturas asfáltica formuladas com a metodologia Marshall.

Tabela 13 - Referências de valores segundo a DNIT ES 031/06

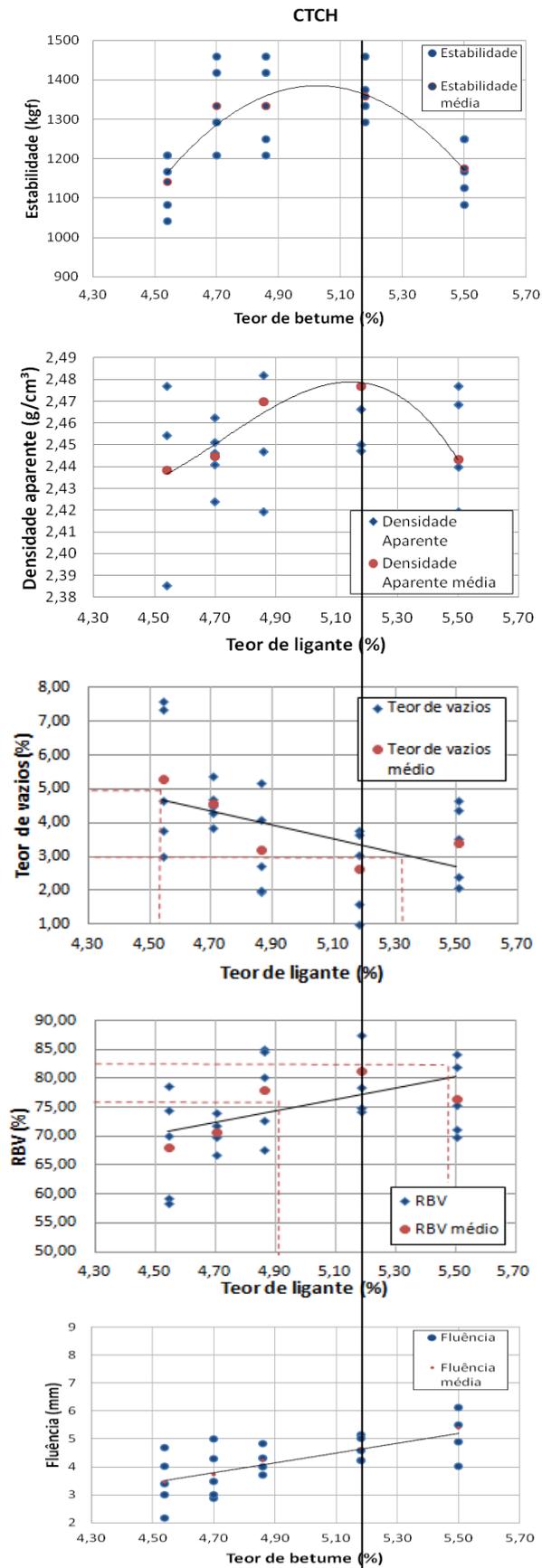
Referências de valores	
Teor de vazios(%)	3 a 5
VAM (%)	min. 16
RBV (%)	75 á 82
Estabilidade (kgf)	min. 500
Fluência (mm)	2 á 4,6

Fonte: Autor (2018)

Em seguida, as Figuras 19, 20, 21 apresentam os resultados de forma gráfica para as propriedades determinadas no ensaio, sendo essas: Densidade aparente (g/cm^3), Teor de vazios (%), VAM (%), RBV (%), Estabilidade (kgf) e Fluência (mm). Estão demonstrados os resultados obtidos para as misturas asfálticas densas com cal hidratada CHI (CTCH), pó calcário (CTPC) e com fíler de pó de pedra (CTC).

Os gráficos dos resultados do ensaio Marshall foram colocados em sequência para cada mistura estudada, o formato em que os gráficos foram apresentados é para a visualização da escolha dos teores de trabalho. O teor de trabalho é o teor que melhor atenda as especificações apresentadas na Tabela 13. Os limites normativos também estão representados nas figuras 19, 20, 21, a seguir por meio de linhas pontilhadas vermelhas, o teor de trabalho foi adotado dentro desses limites e está representado pela linha preta.

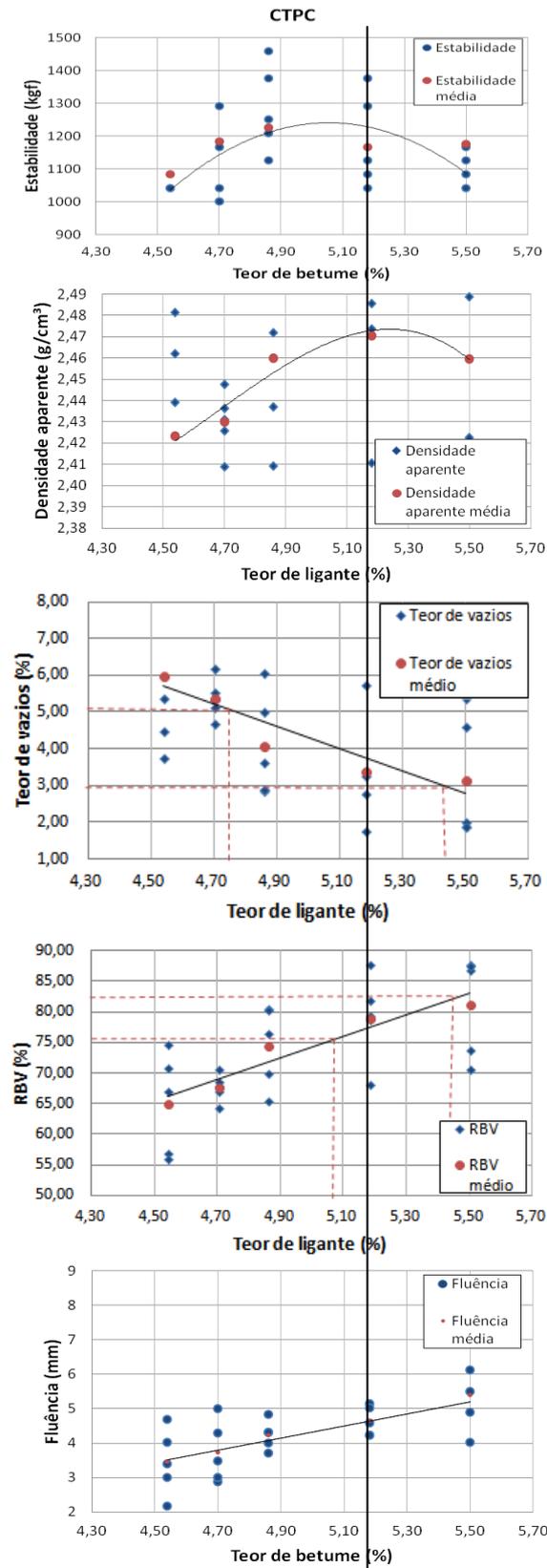
Figura 19 - Resultados curva CTCH (Cal hidratada).



Fonte: Autor (2018)

5,18%

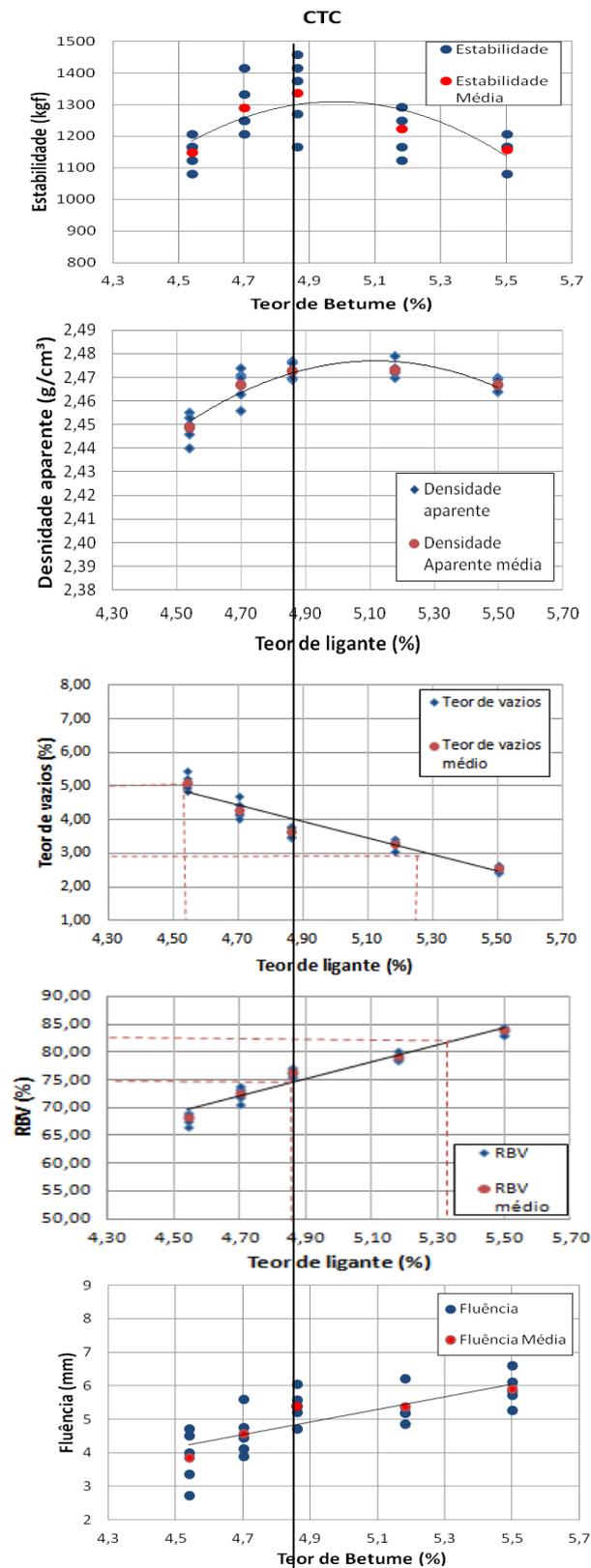
Figura 20 - Resultados curva CTPC (Pó calcário).



Fonte: Autor (2018)

5,18%

Figura 21 - Resultados curva CTC (Curva convencional).



Fonte: Autor (2018)

4,86%

Analisando os resultados expostos nas Figuras 19, 20, 21 em conjunto com os limites normativos da norma DNIT ES 031-06 é possível determinar os possíveis teores de trabalho para as misturas asfálticas estudadas. A Tabela 14 apresenta os teores encontrados.

Tabela 14 - Teores de trabalho

Curva	Teores de trabalho
CTCH	5,18%
CTPC	5,18%
CTC	4,86%

Fonte: Autor (2018)

Considerando que uma curva teórica muito densa trabalha com o princípio em que os grãos menores preenchem gradualmente os vazios deixados pelos agregados maiores. O preenchimento é tão significativo que sobra pouco espaço para a inserção de ligante, então normalmente essas curvas não apresentam teores de trabalho muito elevados, se comparada com curvas formuladas pelo método das tentativas. O que pode aumentar essa condição de densificação é a inserção de fíleres na composição granulométrica, como a cal hidratada, pó calcário e o próprio fíler de pó de pedra.

No caso da cal hidratada ela confere uma densificação ainda maior que as demais curvas porque possui uma superfície específica maior. Essa relação pode ser observada nas curvas de densidade aparente. Na Tabela 15 é possível verificar os valores de superfície específica para os fíleres citados:

Tabela 15 - Superfície específica dos fíleres.

	Superfície específica (cm²/g)
Cal hidratada	0,9885
Pó calcário	0,4900
Pó de pedra	0,1311

Fonte: Autor (2018)

A mistura CTCH se destacou apresentando menos vazios do que as outras misturas, em seguida a mistura CTPC também apresentou um bom resultado em relação à mistura convencional. Os resultados encontrados podem ser justificados pela

resistência dos grãos e pela natureza química dos materiais empregados.

Como o fíler de pó de pedra possui uma condição de maior dureza que o pó calcário e a cal hidratada ele costuma a provocar o intertravamento das partículas de maneira mais resistente, desta forma, gera mais vazios até mesmo nas frações mais finas.

Todavia, os grãos de pó calcário e de cal hidratada possuem uma resistência mecânica menor. Então quando é feita a mistura e compactação dos corpos de prova eles tendem a se aglomerar mais, se sobrepondo e não se embricando como ocorre com o pó de brita. Então a menor resistência os grãos de cal hidratada e pó calcário faz com que as partículas se empacotem mais tornando a densificação mais iminente. Por isso, a CTPC e CTCH possuem vazios menores no ponto designado para teor de trabalho, se comparada com a curva convencional.

Como a cal hidratada e o pó calcário possuem partículas menos resistentes que o pó de pedra, as misturas CTPC e CTCH precisam de um maior teor de ligante. Pois é necessário mais ligante para envolver o material particulado proveniente do impacto gerado pela compactação das misturas com cal hidratada e pó calcário.

Quanto à relação betume vazios justamente por se ter uma condição de curva granulométrica muito densificada, sobretudo quando se trata de materiais que tem uma condição de embrincamento mais favorável. A relação betume vazios no caso da mistura convencional CTC alcança o valor mínimo do intervalo especificado normativamente, exposto na Tabela 13. O mesmo não ocorre com as misturas CTPC e CTCH, isso se explica porque a superfície específica da cal CHI e do calcário é maior que do que a do fíler de pó de pedra. Então há a necessidade de ter mais ligante para poder envolver os agregados finos particulados de cal hidratada e pó calcário.

Apesar da superfície específica do pó calcário ser menor do que da cal hidratada e quase 4 vezes maior que do pó de brita o resultado do ensaio acaba indicando 5,18% pras duas curvas (CTPC e CTCH), isso se deve ao ensaio Marshall ter pouca sensibilidade. Todavia, muito provável que seria um pouco menos para o pó calcário, devido sua superfície específica ser menor que da cal hidratada, e até um pouco menor para o fíler de pó de pedra porque tem uma superfície específica ainda menor, e no ensaio o teor de trabalho resultante foi de 4,86%, apenas um teor abaixo do 5,18%.

No que diz respeito à fluência para a CTPC observa-se que a faixa de fluência está entre 4 a 7 mm, sendo em torno de 5,5 mm para o teor de trabalho de 5,18%.

Enquanto a CTCH tem em torno de 2 a 6 mm e em torno de 4,5 mm para o teor de 5,18%. O que mostra que a fluência na mistura CTCH é menor que na CTPC, o que se mostra dentro do esperado, pois, o poder de rigidificação da cal hidratada é maior. Essa condição foi verificada nos ensaios em que a cal CHI foi misturada com o ligante betuminoso e como resultado aumentou o ponto de amolecimento e diminuiu a penetração mais do que a mistura com pó calcário. As condições para essa grande adesividade e poder de rigidificação pode ser explicada pela natureza química da cal hidratada.

Considerando que a caracterização da cal hidratada demonstrou que a somatória da quantidade de óxido de cálcio para óxido de magnésio é maior do que no pó calcário, fazendo com que a mesma seja de natureza eletropositiva. Essa condição faz com que a reatividade na adesividade da cal hidratada seja melhor.

A fluência CTPC é maior porque não tem mesmo potencial de reatividade que a cal hidratada, por ainda ser um material virgem tem em sua composição muito dióxido de carbono. O que não existe na cal hidratada porque no processo de hidratação ela expulsa esse componente.

Comparando os resultados de fluência da CTPC e da CTCH com a CTC verifica-se que a CTC está com fluência em torno de 4 a 6 mm, sendo em torno de 5,5 mm em 4,86% o que faz com que se aproxime do CTPC. Isso ocorre porque o pó calcário tem uma boa parte de sua composição com dióxido de carbono, e a CTC tem muita sílica na composição do quartzo isso faz com que ambas as curvas tenham uma tendência mais eletronegativa. O fíler de pó de pedra é muito eletronegativo não apresentando quase nenhum material eletropositivo em sua composição, isso faz com que tenha pouca reatividade causando até certa repelência quando entra em contato com o ligante betuminoso. Por isso, pode ser explicada a semelhança nos resultados das curvas CTPC e CTC.

Com relação à adesividade o pó calcário também não apresentou grande aderência como à encontrada na cal hidratada. Sendo que nesse ensaio foi também semelhante a pó de brita, que apresentou pouca adesividade.

No caso da estabilidade, a curva CTPC apresentou em torno de 1250kgf para o teor de 5,18%, sendo a menor de todas as estabilidades em comparação com as outras curvas. Isso se deve ao baixo poder de reatividade desse material, devido sua composição acaba ficando quase inerte na mistura, e também porque suas partículas são menos resistentes do que as do fíler de pó de pedra. Analisando a mistura CTC a

estabilidade deu em torno de 1300kgf por ter uma resistência maior dos grãos, apesar de não apresentar a condição de adesividade mais adequada.

Apesar do pó de brita não ter nenhum componente químico que favorece a adesividade com o ligante ele possui uma boa rugosidade superficial e forma subangular o que favorece o travamento das partículas, porém a atração elétrica é muito frágil, não favorecendo a aderência ao longo do tempo. Já o pó calcário tem uma condição elétrica melhor que o pó de brita o que favorece a adesividade pela atração elétrica, mas ainda assim não é uma condição que atende a adesividade esperada para uma mistura asfáltica ter boa resistência ao longo do tempo.

E quando comparada as misturas CTPC e CTC com a CTCH verifica que a CTCH está em torno de 1380kgf a 1400kgf na curva de tendência para um teor de 5,18%, enquanto a CTC está em torno de 1300kgf para o teor 4,86%. Isso demonstra que a CTCH apresenta o maior valor de estabilidade entre as curvas analisadas, lembrando que isso se deve a melhor reatividade química com o ligante betuminoso por possuir em torno de 70% de óxidos de cálcio e magnésio em sua composição, sendo extremamente eletropositiva. E também por conferir maior rigidez ao ligante betuminoso, demonstrada pelos resultados do ensaio de penetração e ponto de amolecimento anel e bola. No caso do comparativo da cal hidratada com a CTC, observa-se o resultado de 1300kgf para CTC no teor de 4,86% em relação à 1400kgf para CTCH no teor de 5,18% por conta dessa melhor interação química que a cal hidratada possui em conjunto com as propriedades supracitadas que confere ao ligante betuminoso.

Em resumo a mistura asfáltica contendo cal hidratada apresentou os melhores valores para estabilidade e fluência, porque apesar de ter dureza menor que o pó de brita, possui uma maior interatividade química com o ligante betuminoso. Além de apresentar o maior poder de rigidificação do ligante, devido o aumento do ponto de amolecimento e a redução da penetração conferida ao mesmo. Que é uma condição importante para garantir a resistência química do material.

Apesar da mistura CTPC ter dado uma boa condição de adesividade em relação a mistura CTC não permite que seja usado apenas ele para melhorar a adesividade. Então, tanto para a CTPC como para a CTC é necessário inserir um melhorador de adesividade para compensar essa deficiência na interação elétrica desses materiais com o ligante. Enquanto a CTCH não há necessidade, pois, sozinha já confere as condições adequadas de adesividade.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

De forma geral o objetivo geral do trabalho foi alcançado, pois os fíleres melhoraram as propriedades físicas e mecânicas das misturas asfálticas, sobretudo a parte física. Com destaque da CTCH, que entre os fíleres analisados mistura obteve os melhores resultados em todos os ensaios que foram analisados. Conferiu maior rigidificação ao ligante e melhora significativa na adesividade. Assim como, menor fluência e maior estabilidade.

O CTPC apresentou condições de comportamento muito semelhantes à mistura convencional, devido à natureza química dos componentes desses materiais terem menor reatividade do que a cal hidratada, sobretudo pela presença de dióxido de carbono que confere pouca adesividade ao material. O pó calcário não melhorou significativamente a adesividade, mas aumentou o ponto de amolecimento, diminuiu a penetração e susceptibilidade térmica. Em conjunto com um melhorador de adesividade pode ser empregado em misturas asfálticas.

O fíler de pó de pedra apesar de não ser eletropositivo apresenta uma subangularidade satisfatória entre as partículas fazendo com que melhore o intertravamento da mistura, então na ausência de outro fíleres também é vantajoso ser empregado, desde que seja utilizado em conjunto com agente melhorador de adesividade.

A curva teórica de Füller-Talbot mostrou-se adequada para a formulação das misturas asfálticas por fazer um preenchimento gradual das frações granulométricas, tornando a mistura bem densificada. E demonstra que quando a curva é muito bem densificada torna-se difícil ter espaço suficiente para ligante ficar em suspensão, porque o próprio vazio deixado pelos grãos é muito pequeno, atingindo valores mínimos de RBV. Entretanto, não é um parâmetro relevante para comprovação da resistência para as misturas asfálticas estudada, pois as curvas teóricas já demonstraram que possuem resistências melhores do que outros tipos de formulações como a que é feita por tentativas, como já foi comprovado em outros trabalhos. A curva teórica foi estudada nos trabalhos de Araldi (2017), Burigo (2015), Siroma (2016).

O fíler cal hidratada proporcionou o maior poder cimentante entre os fíleres estudados. Desta forma, entende-se que faz com que o pavimento possa resistir melhor

deformações permanentes em campo. A cal hidratada mostrou-se eficiente na melhora da adesividade da mistura asfáltica, nesse caso pode ser uma opção para eliminar a necessidade de dopagem da mistura. Isso se deve ao envolvimento da película de ligante, que forma o mástique e a reatividade relacionada à natureza química positiva da cal. Desta forma, o pavimento torna-se menos susceptível a degradação na presença de água.

O ensaio Marshall apresentou valores iguais de teor de trabalho para as misturas CTPC e CTCH, o que demonstra sua baixa sensibilidade para determinar o teor de trabalho adequado. Como sugestão para trabalhos futuros sugere-se que sejam feitos ensaios mais aprofundados com uma relação campo/laboratório mais estreita para que se possa indicar um teor de trabalho mais acurado para as misturas asfálticas estudadas. Podem ser utilizadas fórmulas da metodologia francesa como a fórmula de Duriez.

7 REFERÊNCIAS

ARALDI, Gustavo Bressiani. **Impacto da formulação de diferentes matrizes granulométricas na dosagem de misturas asfálticas densas**. 2017. 61 f. Trabalho de conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia de Infraestrutura, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7225/1993**. Materiais de pedra e agregados naturais. Rio de Janeiro, 1993. 4 p. Disponível em: <<https://www.abntcolecao.com.br/pdfview/viewer.aspx?locale=pt-BR&Q=48BF4C9A7BCC9C65223E83253446D8CDA78CA959A66E7FFE&Req=>>. Acesso em: 06 nov.2017.

_____. **NBR 7175/2003**. Cal hidratada para argamassas - Requisitos. Rio de Janeiro, 2003, 3p. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABauIAC/abnt-nbr-7175-cal-hidratada-argamassas#>>. Acesso em: 20 abr. 2018.

_____. **NBR 14756/2001**. Materiais betuminosos –determinação da viscosidade cinemática. Rio de Janeiro, 2001, 11p. Disponível em: <<http://docs11.minhateca.com.br/593134321,BR,0,0,NBR-14756---Materiais-betuminosos---Determinacao-da-viscosidade-cinematica.pdf>>. Acesso em: 07 nov. 2017

_____. **NBR 15619/2012**. Misturas asfálticas - Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas. Rio de Janeiro,2012, 13p. Disponível em: <<https://www.abntcolecao.com.br/pdfview/viewer.aspx?locale=pt-BR&Q=A4F5FACCA08E9E96D5E73A4B24C4CA482D6FC89458272D1415FE5D2B69B57C5F&Req=>> Acesso em: 23 mai. 2018.

_____. **NBR 15785/2010**. Misturas asfálticas a quente – Utilização da aparelhagem Marshall para preparação dos corpos-de-prova com diferentes dimensões e aplicações. Rio de Janeiro, 2010, 7 p. Disponível em: <<http://www.abntcolecao.com.br/java/viewnormajava.aspx?Q=48BF4C9A7BCC9C65F15EF2E4EC97212A9EFC3ED977242E4E&Req=>> Acesso em: 23 maio 2018

BARRA Breno Salgado. **Avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas densas utilizando materiais do estado do Pará com emprego de pó calcário**. 2005. 202 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

BARRA, Breno Salgado. **Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas**. 2009. 363 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

BARDINI, Vivian Silveira dos Santos. **Influência do Fíler mineral em Propriedades de Misturas asfálticas densas**. 2013. 344 f. Tese (Doutorado)- Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2013.

_____. BARDINI, V. S. S. KLINSKY, L. M. G.; FERNANDES JUNIOR, J. L.. A importância do fíler para o bom desempenho da mistura asfáltica. **Minerva: Pesquisa e Tecnologia**, São Carlos, v. 7, p.1-3. jan./abr. 2015.

BOCK, André Luiz. **Efeitos da incorporação de cal hidratada em concretos asfálticos elaborados com ligante convencional e modificado**. 2012. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

BRASIL. Portal Brasil. **IBGE mapeia a infraestrutura de transportes no Brasil**. 2014. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2014/11/ibge-mapeia-a-infraestrutura-dos-transportes-no-brasil>>. Acesso em: 10 set. 2017.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro, p.504, 2007.

BOTUVERÁ, Calcário. **Produtos & Serviços**. 2018. Disponível em: <<http://www.calcariobotuvera.com.br/produtos-e-servicos/>>. Acesso em: 13 jun. 2018.

BÚRIGO, Alice Serafim. **Influência da formulação de esqueletos minerais no comportamento mecânico de misturas de concreto asfáltico**. 2015. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia de Infraestrutura, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2015.

BUDNY, Jaelson. **Avaliação Dos Efeitos De Diferentes Tipos De Cal Em Misturas De Concreto Asfáltico.2009**. 74f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí, 2009.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES (CNT). **Pesquisa CNT aponta 58,2% das rodovias com problemas**. 2016. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Imprensa/noticia/pesquisa-cnt-aponta-58-das-rodovias-com-problemas>>. Acesso em: 02 set. 2017.

CUNHA, Marcos Bottene. **Avaliação do método de Bailey de seleção granulométrica de agregados para misturas asfálticas**. 2004. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADA E RODAGEM. **DNER – ME 035/1998**. Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998, 6 p. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me035-98.pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2018.

_____. **DNER – ME 043/1995**. Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995, 11 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me043-95.pdf>>. Acesso em: 07 nov. 2017.

_____. **DNER – ME 078/1994**. Agregados graúdo – adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994, 3 p. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me078-94.pdf/view> . Acesso em: 07 nov. 2017.

_____. **DNER – ME 086/1994**. Agregados – determinação do índice de forma. Rio de Janeiro, 1994, 5p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me086-94.pdf>>. Acesso em: 07 nov. 2017

_____. **DNER-ME 367/1997**. Material de enchimento para misturas betuminosas. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997, 3p. Disponível em : <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-material-em/dner-em367-97.pdf>> Acesso em: 07 nov. 2017.

_____. **Manual de Pavimentação**. 3. Ed. Rio de Janeiro. Publicação Instituto de pesquisas rodoviárias (IPR) – 719. 2006b. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/10847292/manual-de-pavimentacao>>. Acesso em: 17 mai. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **DNIT – ES 031/2006**. Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviços. Rio de Janeiro, 2006a, 14 p. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit031_2006_es.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2018.

_____. **DNIT - ME 131/2010**. Materiais asfálticos - Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola – Método do ensaio. Rio de Janeiro, 2010, 6 p. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnit131_2010_me.pdf>. Acesso em: 07 nov. 2017.

_____. **DNIT - ME 155/2010**. Material asfáltico – Determinação da Penetração – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2010, 8 p. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnit155_2010_me.pdf>. Acesso em: 07 nov. 2017.

FERRÃO, W. C.; MOIZINHO, J. C. **Influência de fileres alternativos com potencial de uso em misturas asfálticas**. In: 20º REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 2017, p. 1 - 12. Florianópolis. Anais... Florianópolis, 2017.

FONTENELE, Heliana Barbosa. **Representação do tráfego de veículos rodoviários de carga através de espectros de carga por eixo e seu efeito no desempenho dos pavimentos**. 2011. 287 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

FRAENKEL, Benjamin B. **Engenharia Rodoviária**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S. A., 1980. 844 p.

GRANDE, Wilson Ricardo de. **Efeito da cal hidratada e do ácido fosfórico nas propriedades mecânicas e susceptibilidade à umidade de misturas asfálticas densas**. 2011. 159 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.

GUIMARÃES, José Epitácio Passos. **A cal**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2002. 329 p.

KLINSKY, Luis Miguel Gutiérrez; FERNANDES JUNIOR, José Leomar. A importância do filler para o bom desempenho da mistura asfáltica. **Minerva: Pesquisa e Tecnologia**, São Carlos, v. 7, p.1-3. jan./mar. 2015.

LUZ, Ruan Carlo da. **Estudo comparativo da formulação de esqueletos minerais na dosagem de misturas de concreto asfáltico densas**. 2016. 95 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia de Infraestrutura, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2016.

LUZZI, Felipe Cipriani et al. **Incorporação de cal e cimento Portland em misturas de concreto asfáltico com ligante modificado por polímero**. In: 20º REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 2017, p. 1 - 8. Florianópolis. Anais.Florianópolis, 2017.

MEDEIROS, Petruccio Tenório. **Processos de fabricação e controle de qualidade de cal e cimento**. 2011. Disponível em: <<https://petrucciottm.files.wordpress.com/2011/02/cal-e-cimento-fabricac3a7c3a3o-2008.pdf>>. Acesso em: 30 set. 2017.

MENDES, Larissa de Oliveira. **Utilização do método bailey para a seleção de agregados em dosagem de misturas asfálticas**. 200. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ambiente Construído, Pós Graduação, Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2011.

MEURER, Priscilla. **Caracterização de materiais rochosos do norte de santa catarina para fins de aplicação em obras de pavimentação**. 2015. 109 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia de Infraestrutura, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2015.

Ministério dos Transportes Portos e Aviação Civil. **Transporte Rodoviário**. 2014. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/transporte-rodoviario-relevancia.html>>. Acesso em: 13 set. 2017.

PETROBRAS. **Home Blog Fatos e Dados home busca Conheça os derivados do petróleo que fazem parte do cotidiano**. 2014. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/conheca-os-derivados-do-petroleo-que-fazem-parte-do-cotidiano.htm>>. Acesso em: 09 set. 2017.

PEREIRA, Gerson. **Aditivos Orgânicos Melhoradores de Adesividade**. 2012. Disponível em: <<http://www.sinicesp.com.br/materias/2012/bt08a.htm>>. Acesso em: 24 set. 2017.

QUINTERO Carlos Fernando. **Estudo de misturas asfálticas com ligantes de consistência elevada – formulação e comportamento mecânico**. 2011. 229f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.

SAMPAIO, João Alves; ALMEIDA, Salvador Luiz Matos de. **Calcário e dolomito**. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/agrominerais/teste/livros/16-agrominerais-calcario-dolomito.pdf>>. Acesso em: 23 set. 2017.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2007. Vol. 1.

SIROMA, Rodrigo Shigueiro. **Estudo da utilização de areia descartada de fundição (adf) na formulação e no desempenho mecânico de misturas de concreto asfáltico**. 2016. 135 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia de Infraestrutura, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2016.

VAVRIK, W. R.; HUBER, G.; PINE, W. et al. **Bailey Method for Gradation Selection in HMA Mixture Design**. Transportation Research Board: Transportation Research Circular Number E-C044, Washington, D. C., EUA. oct. 2002.

WICANDER, Reed; MONROE, James S. **Fundamentos da geologia**. São Paulo: Cengage Learning, 2011.