



PROJETO FINAL DE GRADUAÇÃO

**DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS
RECICLADAS A QUENTE COM ASFALTO FRESADO**

ANDRÉ LUÍS CARVALHO

Brasília, 4 de julho de 2018

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS
A QUENTE COM ASFALTO FRESADO**

ANDRÉ LUÍS CARVALHO

ORIENTADOR: MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, PhD

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 2

BRASÍLIA – DF, 4 DE JULHO DE 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A
QUENTE COM ASFALTO FRESADO

ANDRÉ LUÍS CARVALHO

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

Prof. Márcio Muniz de Farias, PhD (ENC-UnB)
(Orientador)

Prof. Luiz Guilherme Rodrigues de Mello, Dr. (ENC-UnB)
(Examinador interno)

Letícia Cardoso Nunes, M.^a (Universidade de Brasília)
(Examinadora externa)

BRASÍLIA/DF, 4 DE JULHO DE 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

CARVALHO, ANDRE LUIS

Dosagem de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente com Asfalto [Distrito Federal] 2018. xv, 76 p., 210 x 279 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2018)

Monografia de Projeto Final. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Reciclagem Asfáltica

3. Fresagem

2. Caracterização de Agregados

4. Dosagem Marshall

I ENC/FT/UnB

II Título (Bacharel)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CARVALHO, A. L. (2018). Dosagem de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente com Asfalto Fresado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, xv, 76 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: André Luís Carvalho

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Dosagem de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente com Asfalto Fresado

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2018

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

André Luís Carvalho
CSA 2 LOTES 12/14
72.015-025 – Taguatinga/DF - Brasil
andreluiscdnt@gmail.com

RESUMO

A crise do petróleo no século XX gerou uma busca por formas mais econômicas e sustentáveis de se confeccionar revestimentos asfálticos. Uma das soluções encontradas foi a reciclagem do concreto asfáltico já existente no local ou derivado de outras estradas fresadas. No Distrito Federal, o método de reciclagem ainda é baseado no empirismo que, muitas vezes, não produz misturas satisfatórias quando submetidas a ensaios de avaliação mecânica. Em tal contexto, foram três as direções principais seguidas no presente estudo: caracterização do material fresado coletado em obra de infraestrutura no Trevo de Triagem Norte, Brasília -DF, segundo ensaios realizados com seu ligante (viscosidade, densidade, ponto de amolecimento, penetração) e com seus agregados (granulometria, densidade real, absorção); avaliação comparativa de desempenho entre os métodos de extração de ligante por ignição em forno mufla e por centrifugação em rotarex; dosagem de misturas asfálticas recicladas a quente (MARQ) pelo método marshall com a incorporação, ao fresado, de materiais virgens previamente caracterizados. Segundo análise de desempenho dos dois métodos extrativos de ligante, foi verificado que, durante o processo de centrifugação, há uma perda elevada de agregado miúdo e fino em comparação ao agregado perdido durante a realização da ignição em mufla, o que acarreta um aumento excessivo no teor de ligante aferido por aquele. Os resultados da caracterização apontaram a necessidade de correção da curva granulométrica do agregado fresado para adequações à curva de dosagem C normatizada. Com o acréscimo de agregados e de ligantes virgens ao conjunto, segundo cálculos propostos pelo *Asphalt Institute* e após correções no teor de ligante novo incorporado, as misturas recicladas dosadas atenderam às exigências de parâmetros físicos e de estabilidade para sua utilização em capa de camada de rolamento de um pavimento flexível.

Palavras-chave: reciclagem, fresado, dosagem

ABSTRACT

The oil crisis in the twentieth century has generated a search for new, more economical and more sustainable ways of making an asphalt coating. One of the solutions found was to recycle existing asphalt concrete on site or derived from other milled roads. In Federal District, Brazil, the recycling method is still based on empiricism and often does not produce satisfactory mixtures when these are subjected to mechanical testing. In this scenery, the three main directions followed in the present study were: characterization of the milled material collected at the Trevo de Triagem Norte, Brasília -DF, according to tests performed with its binder (viscosity, density, softening point, penetration) and its aggregates (grain size, actual density, absorption); comparative performance evaluation between methods of binder extraction by ignition in muffle furnace and by rotarex centrifugation; dosing of hot recycled asphalt mixtures by marshall method with the incorporation of previously characterized virgin materials on RAP. According to the performance analysis of the two extractive methods of binder, it was verified that during the centrifugation process there is a high loss of small and fine aggregate, in comparison to the aggregate lost during the ignition in muffle, which causes an excessive increase in the content of the binder measured by that. The results of the characterization indicated the need of correction of the granulometric curve of the RAP for adjustments to the normalized C dosage curve. With the addition of aggregates and virgin binders to the set, according to calculations proposed by the Asphalt Institute and after corrections in the incorporated new binder content, the recycled mixtures dosed met the requirements of physical parameters and stability for its use in the surface course of a flexible pavement.

Key-words: recycling, RAP, dosing

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Exemplo de máquina fresadora à frio, imagem (a), e cilindro de corte dentado, imagem (b) (BONFIM, 2007).....	6
Figura 2-2 Comparação das rugosidades resultantes de diferentes tipos de fresagem. Da esquerda para direita: fresagem padrão, fresagem fina e microfresagem (BONFIM, 2007 – Livro de fresagem).....	7
Figura 2-3 Representação esquemática de fresagem a quente <i>in situ</i> (SILVA, 2011, modificado de Wirtgen, 2011).....	8
Figura 2-4 Métodos usuais de extração. Da esquerda para a direita: Soxhlet, Rotarex, refluxo duplo e forno mufla (fonte: http://www.solotest.com.br/novo/).....	10
Figura 2-5 Número de agências rodoviárias estadunidenses divididas conforme método de extração de ligante que utilizam (AASHTO, 2011)	10
Figura 2-6 Comportamento mecânico do CAP ao ser submetido a um carregamento (TASHMAN, 2003).....	11
Figura 2-7 Representação esquemática da dispersão coloidal que é o CAP segundo modelo de Yen (YEN, 1991, <i>apud</i> BERNUCCI <i>et al</i> , 2010).....	12
Figura 2-8 Representação esquemática da defasagem entre a tensão e a deformação de um ligante asfáltico considerando somente seu comportamento viscoelástico (SUPERPAVE FUNDAMENTALS, <i>apud</i> ALVES, 2011)	14
Figura 2-9 Decomposição do módulo complexo de cisalhamento de um material viscoelástico (G^*) em uma componente viscosa (G'') e em uma componente elástica (G') (CHIN, 2009).....	14
Figura 2-10 Índice de envelhecimento em função da idade do ligante asfáltico (Whiteoak, 1990 <i>apud</i> Morilha Jr., 2004)	16
Figura 2-11 Exemplo de forno para ensaio RTFOT (https://jamescoxandsons.com/) .	16
Figura 3-1 Trevo de Triagem Norte (fonte: www.der.df.gov.br/ , 2017)	21
Figura 3-2 Operação de fresagem Trevo de Triagem Norte	22
Figura 3-3 Verificação aproximada da espessura de corte	22
Figura 3-4 Disposição da amostra de fresado para retirada de umidade por evaporação	24
Figura 3-5 Conjunto de peneiras e peneirador mecânico utilizados para o peneiramento dos grão de agregados e dos gomos do material fresado.....	25
Figura 3-6 Etapas do método de extração com Rotarex (SILVA, 2011).....	26
Figura 3-7 - Erro absoluto médio do teor de asfalto aferido por tipo de solvente (ROSSATO, 2014)	27
Figura 3-8 Esquema de equipamento Rotavaporador (ASTM D 5404) Erro! Indicador não definido.	
Figura 3-9 Equipamento Rotavaporador utilizado	Erro! Indicador não definido.
Figura 3-10 Pequena mufla utilizada para a extração de ligante por ignição	Erro! Indicador não definido.
Figura 3-11 Exemplo de amostras dosadas para aferição dos fatores de calibração	31
Figura 3-12 Fotos do processo de aferição da densidade real de agregados miúdos (esquerda) e graúdos (direita)	33
Figura 3-13 Disposição da aparelhagem para a realização do ensaio de ponto de amolecimento.....	36
Figura 3-14 Pernetômetro com agulha usados em ensaio de penetração	36
Figura 3-15 Picnômetros com ligante e água (esquerda) e com 1/3 de ligante	37
Figura 3-16 Exemplo de viscosímetro Brookfield (Han <i>et al</i> , 2011)	38

Figura 3-17 Processos para avaliação dos corpos de prova marshall: mistura, compactação, medidas das dimensões, aferição das massas específicas e compressão marshall (da esquerda para a direita, de baixo para cima)	41
Figura 3-18 Corpos de prova confeccionados	41
Figura 4-1 Curva granulométrica do material fresado e limites para dosagem de curva granulométrica C, DNIT 031/2006-ES.....	42
Figura 4-2 Curva granulométrica dos agregados extraídos do fresado pelo método da mufla e do rotarex. Apresentação dos limites da curva C	45
Figura 4-3 Comportamento viscoso do ligante envelhecido em elevadas temperaturas	48
Figura 4-4 Porcentagem de perda ou de ganho de agregado por método de extração, amostras representativas de gomos graúdos.....	50
Figura 4-5 Porcentagem de perda ou de ganho de agregado por método de extração, amostras representativas de gomos graúdos.....	51
Figura 4-6 Curva de tendência para a massa específica aparente verificada nos corpos de prova	56
Figura 4-7 Curva de tendência para o volume de vazios verificado nos corpos de prova	56
Figura 4-8 Curva de tendência para a relação betume/vazio verificada nos corpos de prova.....	57
Figura 4-9 Curva de tendência para os valores de estabilidade aferidos nos corpos de prova.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-1-Classificação do pavimento (CNT,2016).....	1
Tabela 3-1 Peneiras utilizadas na determinação da granulometria do fresado	23
Tabela 3-2 Massa mínima de amostra por dimensão máxima do grão (NBR NM 248:2001).....	23
Tabela 3-3 Faixas de dosagem para os agregados (DNIT 031/06) Erro! Indicador não definido.	
Tabela 3-4 Massa mínima para ensaio de densidade aparente (DNER – ME 081/98).	33
Tabela 4-1 Valores correspondentes a extração de ligante pelo método da mufla e do rotarex.....	43
Tabela 4-2 Propriedades aferidas nos agregados virgens, normativas, especificações e valores (NUNES, 2017).....	44
Tabela 4-3 Granulometria verificada do agregado extraído do fresado segundo método de extração e granulometria dos gomos de fresado	45
Tabela 4-4 Propriedades aferidas nos agregados virgens, normativas e valores	46
Tabela 4-5 Propriedades físicas do ligante utilizado e limites estabelecidos em norma	47
Tabela 4-6 Propriedades físicas do ligante recuperado utilizado	48
Tabela 4-7 Fatores de calibração para teores de ligante aferidos em extração em forno mufla.....	49
Tabela 4-8 Teores de ligante corrigidos por fatores de calibração, Cf.....	52
Tabela 4-9 Resultado da análise de variância com fator duplo e repetição para os teores corrigidos de ligante	53
Tabela 4-10 Teor de ligante total aferido para o fresado coletado	54
Tabela 4-11 Porcentagem entre agregados componentes da mistura reciclada.....	54
Tabela 4-12 Parâmetros de entrada para a determinação da porcentagem final de ligante novo na mistura reciclada.....	55
Tabela 4-13 Valores dos índices físicos e de estabilidade marshall para os teores ensaiados.....	55
Tabela 4-14 Limites normatizados para os índices físicos e para a estabilidade de misturas destinadas a camada de rolamento (DNIT 031/2006).....	57
Tabela 4-15 Teor ideal de ligante constituinte da mistura asfáltica usinada a quente..	58
Tabela 4-16 Taxas de reciclagem para o teor ideal de ligante.....	58
Tabela A-1 Dados para amostra de controle para forno mufla, gomos graúdos	68
Tabela A-2 Dados para amostra de controle para forno mufla, gomos miúdos e finos	69
Tabela A-3 Dados para amostra de controle para centrifugação em rotarex, gomos graúdos	70
Tabela A-4 Dados para amostra de controle para forno mufla, gomos miúdos e finos	71
Tabela B-5 Parâmetros físicos aferidos para cada CP	73
Tabela C-6 Estabilidade corrigida e fluência para os teores de 2,02% e 2,52% de ligante novo	74
Tabela C-7 Estabilidade corrigida e fluência para os teores de 3,02% e 3,52% de ligante novo	74
Tabela C-8 Estabilidade corrigida e fluência para os teores de 4,02% e 4,52% de ligante novo	75
Tabela C-9 Estabilidade corrigida e fluência para os teores de 5,02% e 5,52% de ligante novo	75

LISTA DE SÍMBOLOS

A_n	Abrasão “Los Angeles” da graduação n (%)
a	Absorção do agregado (%)
C_F	Fator de calibração para mufla (%)
D_{ap}	Densidade aparente
D	Diâmetro do corpo de prova (cm)
f	Índice de forma
F_m	Massa do agregado miúdo (g)
f_c	Fator de correção para estabilidade Marshall
F	carga de ruptura (N)
F_f	a carga vertical aplicada repetida para fadiga (N)
F_{res}	carga vertical repetida para resiliência (N)
G^*	Módulo complexo de cisalhamento (GPa)
G'	Módulo de cisalhamento de comportamento viscoso (MPa)
G''	Módulo de cisalhamento de comportamento elástico (MPa)
G	Massa específica relativa seca do agregado miúdo (g/mL)
h	Espessura do corpo de prova
h_{cp}	é a altura do corpo de prova (cm)
H	Altura do corpo de prova (cm)
k_2	parâmetro gráfico
L	Leitura da balança correspondente ao agregado submerso (g)
L_C	Leitura final no frasco após a imersão do agregado (cm ³)
M_I	Massa total da amostra de calibração antes da combustão (g)
M_L	Massa total da amostra de calibração após a combustão (g)
M_B	Massa total da amostra antes da combustão (g)
M_A	Massa total da amostra de calibração após a combustão (g)
m_n	Massa total de agregado colocada na máquina (g)
m'_n	Massa da amostra retida na peneira 1,7 mm (g)
M_s	Massa ao ar do agregado seco em estufa (g)
M_h	Massa ao ar do agregado na condição saturada superfície seca em estufa (g)
MR	módulo de resiliência do corpo de prova (MPa)

$M_{inicial}$	Massa da amostra de CAP antes de ensaio RTFOT (g)
M_{final}	Massa da amostra de CAP após a realização do ensaio RTFOT (g)
n	Graduação do agregado escolhido para o ensaio “Los Angeles”
n_g	Número de frações que compõem a graduação escolhida (%)
n_2	parâmetro gráfico
N	vida de fadiga (ciclos)
P	Porcentagem de CAP conhecida da mistura (%)
P_1	Soma de todas as percentagens retidas no crivo I (%)
P_2	Soma de todas as percentagens retidas no crivo II (%)
U	Porcentagem de vazios no agregado miúdo (%)
V	Volume do cilindro (mL)
$\%AC$	Porcentagem de CAP na mistura asfáltica, método mufla (%)
γ_t	Deformação por cisalhamento com comportamento senoidal
γ	Massa específica do agregado miúdo (g/cm ³)
$\gamma_{máx}$	Deformação por cisalhamento máxima no ensaio DSR
$\Delta\gamma$	Deformação de cisalhamento
Δt	Variação temporal (s)
δ	Ângulo de fase para ensaio DSR (rad)
Δ	deformação elástica ou resiliente registrada em microcomputador (cm)
$\Delta\sigma$	diferença de tensões no centro do corpo de prova (MPa)
$\Delta Massa$	Variação percentual da massa com após RTFOT (%)
ε^e	Deformação elástica que é recuperável ao término do carregamento
ε^{ve}	Deformação viscoelástica
ε^p	Deformação plástica irreversível;
ε^{vp}	Deformação viscoplástica irreversível
η	Viscosidade dinâmica (cP)
η_c	Viscosidade cinemática (cSt)
μ	coeficiente de Poisson
ρ	Massa específica do material
σ_R	Resistência à tração (MPa)
σ^*_t	porcentagem da tensão máxima de tração (MPa)
τ	Tensão cisalhante aplicada a um fluido (MPa)
τ_t	Tensão cisalhante com comportamento senoidal (MPa)

$\tau_{m\acute{a}x}$

Tens\~ao cisalhante m\~axima no ensaio DSR (MPa)

SUMÁRIO

FICHA CATALOGRÁFICA.....	v
RESUMO.....	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE SÍMBOLOS	xi
SUMÁRIO.....	xiv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo geral	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Justificativas.....	3
1.4 Organização do trabalho	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Histórico.....	4
2.2 Questão Ambiental	5
2.3 Tipos de Fresagem	5
2.4 Tipos de Reciclagem Asfáltica	7
2.4.1 Reciclagem a quente em usina	7
2.4.2 Reciclagem a quente “in situ”	8
2.4.3 Reciclagem a frio em usinas	8
2.4.4 Reciclagem a frio “in situ”	8
2.5 Métodos para extração do ligante contido no fresado	9
2.6 Ligante asfáltico e suas propriedades	11
2.6.1 Comportamento físico sobre carregamento	11
2.6.2 Composição química por fracionamento SARA.....	12
2.6.3 Viscosidade	13
2.6.4 Envelhecimento do ligante asfáltico	15
2.7 Agregados e suas propriedades.....	17
2.7.1 Desgaste à abrasão	18
2.7.2 Densidade relativa ou massa específica real e absorção	18
2.7.3 Forma e angularidade dos agregados	18
2.8 Dosagem Marshall	19
2.9 Dosagem de misturas recicladas usinadas a quente.....	19
3 METODOLOGIA	21
3.1 Revisão bibliográfica e fundamentação teórica.....	21

3.2	Coleta de material fresado	21
3.3	Determinação da granulometria do material fresado	23
3.4	Extração do ligante asfáltico para determinação do teor de ligante no fresado 25	
3.4.1	Método de extração por centrifugação com Rotarex e separação ligante- solvente por método Rotavaporador.....	25
3.4.2	Método de extração de ligante por ignição em forno mufla	28
3.4.3	Fabricação de amostras de controle para os métodos de extração	30
3.5	Caracterização dos agregados	31
3.5.1	Determinação da granulometria	31
3.5.2	Determinação da densidade real e da absorção.....	32
3.6	Caracterização do ligante asfáltico	35
3.6.1	Ponto de amolecimento – método anel bola	35
3.6.2	Ensaio de penetração.....	36
3.6.3	Determinação da densidade do CAP com picnômetro.....	37
3.6.4	Determinação da viscosidade com utilização de viscosímetro rotacional	38
3.7	Dosagem de misturas recicladas e avaliação mecânica	38
3.7.1	Dosagem segundo método marshall	38
3.7.2	Ensaio de estabilidade e de fluência Marshall	40
4	RESULTADOS E ANÁLISE	42
4.1	Granulometria do material fresado	42
4.2	Extração do ligante betuminoso.....	43
4.3	Caracterização dos Agregados	44
4.4	Caracterização dos Ligantes	47
4.5	Correção no teor de ligante aferido.....	49
4.6	Dosagem Marshall	54
5	Conclusões e Recomendações.....	59
5.1	Conclusões	59
5.2	Recomendações	60
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
	APÊNDICES	68

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o quinto maior país do mundo, com uma área superficial de aproximadamente 8,5 milhões de quilômetros quadrados (IBGE, 2017). Nessa extensão, atuam os modais rodoviário, ferroviário, aquaviário, dutoviário e aéreo para o transporte de cargas e de passageiros. O modal rodoviário é o predominante, compreendendo aproximadamente 60% da matriz de transportes de carga e 90% da matriz de transporte de passageiros do país (CNT, 2016).

Segundo avaliação da Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2016), a malha rodoviária brasileira possui uma extensão total de 1.720.643,2 km sendo que somente 12,3% dessa é pavimentada, o que equivale a um total de 210.618,8 km ou 25 km de estradas pavimentadas para cada 1.000 km² de área territorial. Esses números são extremamente baixos se comparados a outros países com extensões próximas às brasileiras:

- Estados Unidos: 438,1 km para 1.000 km²;
- China: 359,9 km para 1.000 km²;
- Rússia: 54,3 km para 1.000 km².

O pavimento encontrado nessas vias também não está em condições satisfatórias, como pode ser observado na Tabela 1-1. Mais de 50% das rodovias públicas, que compreendem a maior parte da extensão total de rodovias pavimentadas no país, encontram-se na condição de estado péssimo ou regular (CNT,2016).

Tabela 1-1-Classificação do pavimento (CNT,2016)

Pavimento	Gestão Concedida		Gestão Pública	
	km	%	km	%
Ótimo	14.833	74,1	31.043	37,3
Bom	1.429	7,1	6.056	7,3
Regular	3.351	16,7	33.617	40,4
Ruim	423	2,1	9.804	11,8
Péssimo	-	-	2.703	3,2
Total	20.036	100	83.223	100

As principais causas para tais condições são decorrência, principalmente, de fatores como a utilização de método de dimensionamento empírico já ultrapassado, falta de fiscalização da carga por eixo veicular e falta de manutenção e de restauração dos pavimentos já existentes.

Uma nova forma de restauração que vem ganhando força tanto no Brasil quanto no mundo é a reciclagem do revestimento asfáltico, método que possui considerável rapidez executiva e um custo competitivo, se comparado aos métodos tradicionais de revestimento (DELLABIANCA, 2004). Segundo BERNUCCI *et al* (2010):

“A reciclagem de pavimentos é o processo de reutilização de misturas asfálticas danificadas para produção de novas misturas, aproveitando os agregados e ligantes remanescentes, provenientes da fresagem, com acréscimo ou não de agentes rejuvenescedores, espuma de asfalto, CAP ou EAP novos, e também com adição de aglomerantes hidráulicos”.

A reciclagem do pavimento asfáltico é uma ideia antiga que surgiu em Singapura em 1930, mas só ganhou mais atenção na década de 1970 no exterior, chegando ao Brasil na década de 80 (FONSECA, 2014).

No Distrito Federal (DF), a reciclagem é realizada de forma empírica e os valores de desempenho do pavimento muitas vezes encontram-se a quem do obtido com o método convencional de revestimento (DELLABIANCA, 2004).

1.1 Objetivo geral

Essa monografia possui como objetivo a caracterização do material fresado (da sigla em inglês, RAP) coletado no Trevo de Triagem Norte, Brasília - Df (gomos, agregados e CAP), bem como a determinação de um teor ideal para uma mistura reciclada a quente conforme especificações do método de dosagem marshall.

1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Coletar asfalto fresado no Trevo de Triagem Norte (TTN -DF);
- Realizar a separação de ligante dos agregados envelhecidos e avaliar a porcentagem de ligante na mistura original de fresado;
- Avaliar o desempenho da aferição de teores de asfaltos segundo os métodos de extração por centrifugação em rotarex e por ignição em forno mufla;
- Realizar ensaios de caracterização do agregado e do CAP;
- Realizar dosagem marshall para a fabricação de uma mistura asfáltica reciclada a quente e avaliar a taxa de reciclagem alcançada.

1.3 Justificativas

Conforme apresentado no tópico 1.1, a implementação do asfalto reciclado no DF ainda é limitada pelo empirismo da metodologia (DELLABIANCA, 2004). Não há uma preocupação com a determinação das propriedades do material fresado reciclado, que influenciam de forma significativa o comportamento de bases e revestimentos durante a vida útil de um pavimento. Mesmo havendo reciclagem, o pavimento apresentará um desempenho insatisfatório em caso de equívocos nas misturas e na avaliação das propriedades mecânicas do asfalto.

Esse estudo leva em consideração essas necessidades e, com isso, visa obter uma mistura reciclada a quente que atenda às mesmas especificações de misturas asfálticas usinadas a quente.

1.4 Organização do trabalho

O capítulo 1 compreende à introdução sobre o panorama atual dos pavimentos brasileiros e sobre as condições da reciclagem de pavimentos no Brasil e no mundo. Nesse capítulo também estão contidos os objetivos da pesquisa e a justificativa para sua realização.

O capítulo 2 contém a revisão bibliográfica para o embasamento teórico da pesquisa. Nele estão contidos resultados e conclusões encontradas em teses, normas, livros, sites e artigos que abordam o assunto da reciclagem asfáltica.

No capítulo 3, está contida a metodologia seguida para a obtenção dos resultados necessários para a avaliação do fresado e das novas misturas asfálticas. Nele estão descritos todos os ensaios realizados juntamente com suas respectivas normas.

No capítulo 4 estão contidos todos os resultados e as análises decorrentes dos ensaios realizados em laboratório.

O capítulo 5 apresenta a conclusão do projeto e uma proposta de continuidade à pesquisa.

No capítulo 6 estão contidas as referências bibliográficas utilizadas nesse estudo.

Nos Anexos são apresentados os dados que auxiliaram os cálculos dos valores apresentados no capítulo 4.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 *Histórico*

As primeiras ideias de reciclagem do pavimento asfáltico surgiram na Índia e em Singapura, 1930. Ainda muito insipientes, os métodos de reciclagem asfáltica ganharam força somente na década de 70 após o início da Crise do Petróleo (FONSECA, 2014).

O preço do barril do petróleo, que é a principal fonte de componentes asfálticos, chegou a impressionantes US\$ 10,0 após um embargo realizado pela Organização dos países Exportadores de Petróleo (OPEP) em 1973 (KODJA, 2009). Conseqüentemente, a realização de revestimentos asfálticos de forma convencional (mistura de ligantes e de agregados “novos”) ficou mais cara e métodos alternativos foram contemplados, como a reciclagem asfáltica.

Segundo SILVA (2011), “a reciclagem de revestimentos asfálticos é um processo pelo qual uma mistura asfáltica existente, geralmente em condição deteriorada, é fresada e misturada a novos agregados e a um novo ligante asfáltico, possibilitando seu reaproveitamento na construção de uma nova camada, incorporando ou não novos materiais que permitem a obtenção de um pavimento com características mecânicas e funcionais semelhantes e até superiores ao pavimento antigo”.

Nos primórdios, o material a ser reciclado era retirado das pistas por escarificação, um processo com custo reduzido e um controle de profundidade de corte ruim. A falta desse controle pode gerar a contaminação do material de revestimento com componentes das camadas subjacentes (componentes argilosos da camada de base, por exemplo). Outra dificuldade associada a esse método é a necessidade de posterior britagem dos fragmentos coletados, para se adequar à granulometria desejada da mistura final (DNIT,2006 e BONFIM, 2007).

Ainda segundo BONFIM (2007), as máquinas destinadas à fresagem do pavimento surgiram a partir da década de 1970 na Europa e na América do Norte, simultaneamente. No Brasil, essa nova técnica só foi implantada na década de 1980. Esse método não exige posterior britagem dos fragmentos, já que os grãos apresentam dimensões menores que as usualmente obtidas com o método de escarificação (DNIT,2006).

No DF, a reciclagem é utilizada na restauração de pavimentos bastante envelhecidos para suprir a falta tanto de cascalho para bases e sub-bases da região quanto de britas de qualidade para a realização do revestimento asfáltico (DELLABIANCA, 2004). Os métodos de reciclagem na região (fresagem, armazenamento e mistura) ainda são majoritariamente empíricos e geram misturas com propriedades mecânicas insatisfatórias. SILVA (2011), em sua tese, estimou, com uma análise topográfica, que em 2011 havia aproximadamente 2.082,49 m³

de fresado estocados nos pátios do DF. Como verificado em estudo de campo, esse armazenamento é feito de forma irregular, ficando o fresado exposto a contaminação tanto do solo quanto de seus arredores, dificultando ainda mais sua reciclagem em camadas de revestimento asfáltico.

2.2 Questão Ambiental

A reciclagem do pavimento recém fresado, do ponto de vista ambiental, também é justificável, uma vez estando de acordo com os princípios do desenvolvimento sustentável, que consiste na busca de um equilíbrio entre a exploração de recursos naturais pelos seres humanos e as taxas de reposição desses pelo meio ambiente (ÂNGULO, 2001).

Assim como em outros processos de reciclagem, a reutilização do asfalto em camadas de base ou de revestimento evita a exploração excessiva de jazidas minerais para a extração de agregados (menor passivo ambiental), de reservas naturais de petróleo para a obtenção de ligante e o descarte de resíduos indesejáveis no meio ambiente.

2.3 Tipos de Fresagem

Segundo o Glossário de Termos Técnicos Rodoviários (DNIT, 2017), a fresagem é o desbastamento de uma superfície asfáltica como parte de um processo de reciclagem do revestimento asfáltico. Esse processo pode ser tanto a quente quanto a frio e seu produto, os fragmentos asfálticos gerados, é denominado material fresado (em inglês, *Reclaimed Asphalt Pavement* – RAP).

No processo de fresagem a frio, o corte é realizado à temperatura ambiente e há a alteração na curva granulométrica do material por haver quebra parcial dos agregados da mistura. No processo de fresagem a quente, essa alteração granulométrica não é tão significativa, já que o pavimento é pré-aquecido, para oferecer menor resistência ao corte (BONFIM, 2007). A Figura 2-1 apresenta um exemplo de máquina fresadora a frio (a) bem como um exemplo de cilindro de corte dentado para microfresagem (b).

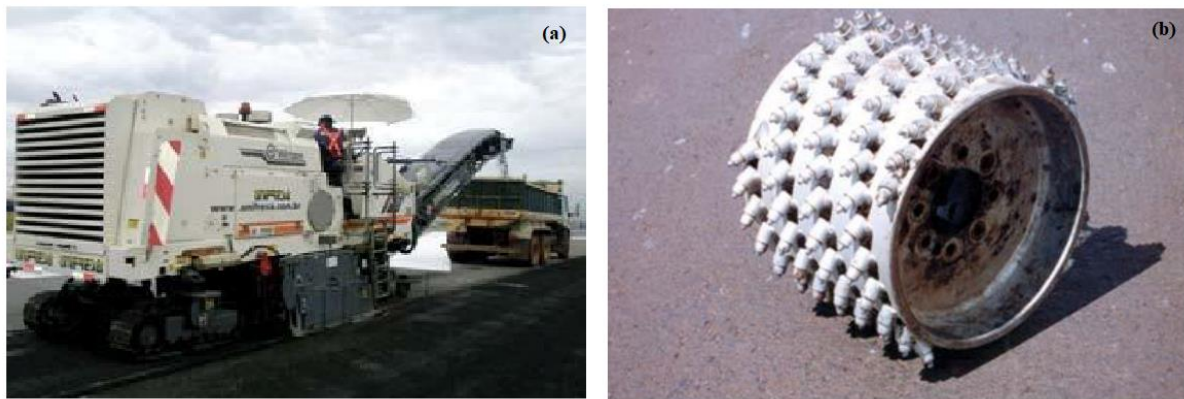


Figura 2-1 Exemplo de máquina fresadora à frio, imagem (a), e cilindro de corte dentado, imagem (b) (BONFIM, 2007)

BONFIM (2007) ainda apresenta em seu livro uma classificação dos tipos de fresagem segundo a profundidade do corte e a rugosidade resultante no pavimento.

As fresagens são classificadas, segundo a profundidade do corte, como:

- Fresagem superficial: tem como principal função a regularização da superfície do revestimento, não exigindo o posterior recapeamento da pista. Profundidades de corte pequenas;

- Fresagem rasa: sua profundidade média é de aproximadamente 5 cm e é utilizada na correção de defeitos funcionais e em remendos superficiais. A textura gerada pela fresagem favorece a aderência entre a nova camada asfáltica e a antiga;

- Fresagem profunda: o corte apresenta uma profundidade superior a 5 cm podendo alcançar as camadas subjacentes ao revestimento como base e sub-base. Normalmente utilizada tanto para correções estruturais do revestimento ou da base quanto para correções do aspecto funcional da via (regularização do greide para favorecer a drenagem superficial, por exemplo). Também é usada para a realização de pequenos remendos e requadramento de buracos.

A rugosidade da camada fresada varia de acordo com a velocidade de passagem da máquina e do cilindro dentado que ela utiliza. As fresagens são classificadas, segundo a rugosidade do corte (Figura 2-2), como:

- Padrão: a distância lateral entre os dentes de corte é de aproximadamente 15 mm e é ideal para o revestimento que receberá uma nova camada asfáltica sobre ele;

- Fresagem fina: a distância lateral entre os dentes de corte é de aproximadamente 8 mm, o que gera sulcos menores e conseqüentemente, menor rugosidade. Utilizada na regularização de vias para garantir melhores condições de circulação dos automóveis;

- Microfresagem: a distância lateral entre os dentes de corte varia entre 2 e 3 mm e é usada para a retirada de sinalização horizontal da pista.



Figura 2-2 Comparação das rugosidades resultantes de diferentes tipos de fresagem. Da esquerda para direita: fresagem padrão, fresagem fina e microfresagem (BONFIM, 2007 – Livro de fresagem)

2.4 Tipos de Reciclagem Asfáltica

O tipo de fresagem a ser realizada está diretamente relacionado ao método de reciclagem escolhido para a manutenção ou restauração do pavimento. O método de reciclagem é escolhido segundo os seguintes fatores, apresentados no Manual de Restauração dos Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006):

- Observação dos defeitos do pavimento;
- Averiguação das prováveis causas para os defeitos;
- Dados históricos do projeto como histórico de manutenções, etc.;
- Custo do processo;
- Restrições geométricas da via;
- Tráfego; e
- Fatores ambientais.

Castro (2003) divide os tipos de reciclagem em quatro grupos: reciclagem a quente em usina, reciclagem a quente “*in situ*”, reciclagem a frio em usina e reciclagem a frio “*in situ*”.

2.4.1 Reciclagem a quente em usina

Nesse método de reciclagem, parte do revestimento é retirada, usualmente por fresagem a frio, e é transportada para uma usina de asfalto, onde é misturada a quente com novos componentes (agregados, CAP e agente rejuvenescedor, caso necessário). Por fim, a mistura reciclada é levada até a pista onde será recuperada e espalhada sobre o pavimento onde será comprimida e acabada.

2.4.2 Reciclagem a quente “in situ”

Nesse método de reciclagem, há um pré-aquecimento da camada de revestimento a ser cortada. Em seguida, o material coletado passará por uma usina de reciclagem *in situ*, que é responsável pela mistura do CBUQ novo (CAP mais agregados), provindo da usina, com o fresado recém coletado. Pode haver a inclusão de agentes rejuvenescedores nessa etapa. Por fim, a mistura é aplicada na pista. Todos os processos são apresentados esquematicamente na Figura 2-3.

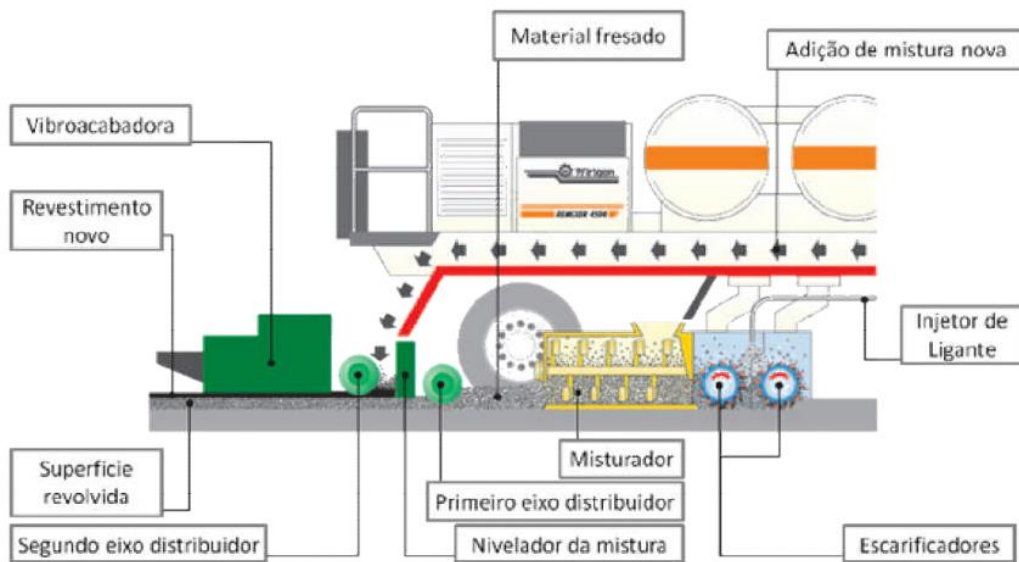


Figura 2-3 Representação esquemática de fresagem a quente *in situ* (SILVA, 2011, modificado de Wirtgen, 2011)

2.4.3 Reciclagem a frio em usinas

Esse método, que é muito utilizado em países europeus, consiste na mistura do material fresado a frio com material de enchimento e agente rejuvenescedor emulsionado em usinas estacionárias.

2.4.4 Reciclagem a frio “in situ”

Método comum no Brasil que utiliza um equipamento denominado fresadora-recicladora. Segundo DELLABIANCA (2004), é classificado conforme o aditivo que é incorporado ao material fresado em:

- Com adição de emulsão: há a produção de um Pré-Misturado a Frio (PMF) com a adição de uma emulsão rica em maltenos ao fresado. Após a fresagem, esses componentes são misturados, espalhados e comprimidos na pista de rolamento. Pode ser usado para realizar camadas de *Bider* ou de capa;

- Com adição de cimento Portland: há um espalhamento de nata de cimento Portland sobre a camada asfáltica antes da fresagem a frio. Em seguida, há a mistura, o espalhamento e a compactação desse material. Método utilizado para realizar as camadas de base e sub-base;

- Com adição de cimento e emulsão: consiste numa combinação dos métodos de adição de cimento Portland e de emulsão. Há o espalhamento de nata de cimento Portland sobre a superfície asfáltica, que é fresada a frio, misturada com emulsão modificada, espalhada na via e compactada. Também é usada para a confecção de bases e sub-bases;

- Com adição de CAP (Asfalto Espuma): há inicialmente o espalhamento de cimento Portland sobre a superfície asfáltica. Em seguida, há a fresagem a frio do revestimento e posterior mistura do fresado com CAP na forma de espuma (CAP aquecido misturado com água e ar a temperatura ambiente). Por fim, o material é espalhado e compactado para preencher a camada de base ou sub-base.

- Com adição de agregados: há o espalhamento de novos agregados sobre a superfície do pavimento. Em seguida, há a fresagem a frio, a mistura, o espalhamento e a compactação da mistura resultante sobre a via. Usada para a realização de bases e sub-bases.

2.5 Métodos para extração do ligante contido no fresado

Para a dosagem de uma mistura asfáltica reciclada adequada, é necessária a determinação do teor de ligante contido no material fresado. Quatro são os métodos usualmente utilizados para a extração do ligante contido no material fresado: centrifugação com rotarex, Soxhlet, refluxo duplo e ignição em forno mufla (Figura 2-4).



Figura 2-4 Métodos usuais de extração. Da esquerda para a direita: Soxhlet, Rotarex, refluxo duplo e forno mufla (fonte: <http://www.solotest.com.br/novo/>)

Os três primeiros métodos listados apresentam como fatores limitantes o intervalo de tempo entre a produção da mistura e a obtenção dos resultados de ensaio e a toxicidade do processo, devido a utilização de solventes asfálticos. No ensaio de extração com utilização de Soxhlet e de refluxo duplo, as amostras ensaiadas podem ainda não ser significativas para alguns tipos de misturas asfálticas e sofrem, assim como no método de centrifugação por rotarex, com a perda excessiva de finos (material passante na peneira nº 200), comprometendo a medição do teor real de ligante (SINICESP, 2015).

Em 2005, foi publicada a norma ASTM D 6307, que regulamenta todo o processo para a aferição do teor de ligante de uma mistura asfáltica em forno mufla. O procedimento, que é mais preciso que os métodos de aferição citados anteriormente, consiste na ignição e na expulsão por convecção do ligante asfáltico presente na mistura (SINICESP, 2015).

A Figura 2-5 apresenta graficamente o número de agências rodoviárias dos Estados Unidos que utilizam os diferentes métodos de extração (AASHTO, 2011).

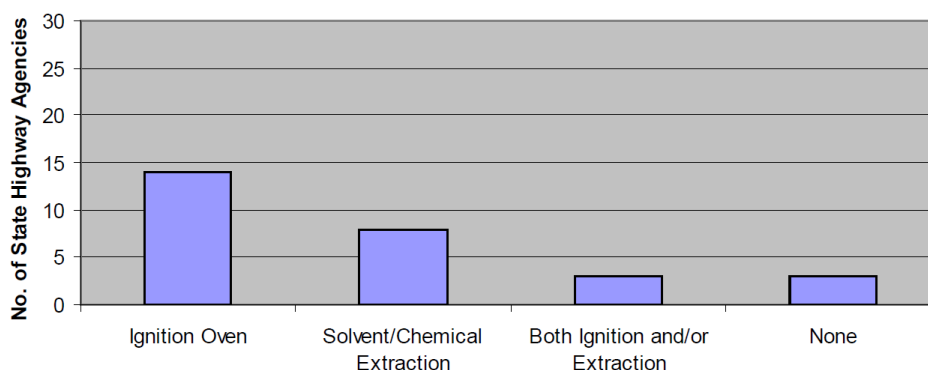


Figura 2-5 Número de agências rodoviárias estadunidenses divididas conforme método de extração de ligante que utilizam (AASHTO, 2011)

2.6 Ligante asfáltico e suas propriedades

2.6.1 Comportamento físico sobre carregamento

Segundo descrito por Bernucci, *et al* (2010), asfalto é um ligante betuminoso provindo da destilação do petróleo, denominado de CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo), no Brasil, quando se adequa a uma série de propriedades físicas estabelecidas para o bom desempenho nos pavimentos. É um material semi-sólido a temperaturas baixas com propriedades termo-viscoelatoelásticas. Essa classificação se dá devido ao seu comportamento mecânico variável em relação aos fatores de intensidade, de velocidade e de tempo de carregamento, como apresentado na Figura 2-6. O componente “termo” da nomenclatura vem do fato do material apresentar comportamento líquido em elevadas temperaturas e semi-sólido à temperatura ambiente, desconsiderando aditivos.

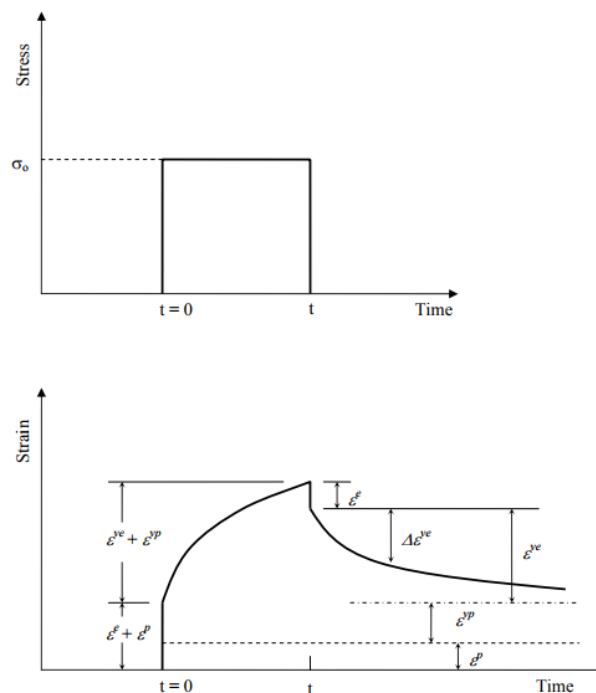


Figura 2-6 Comportamento mecânico do CAP ao ser submetido a um carregamento (TASHMAN, 2003)

As medidas apresentadas no gráfico deformação x tempo na Figura 2-6 são:

- ϵ^e : deformação elástica que é recuperável ao término do carregamento
- ϵ^{ve} : deformação viscoelástica que aumenta ao longo do tempo mesmo com o carregamento mantido constante. É recuperável;
- ϵ^p : deformação plástica irreversível;

- ϵ^{vp} : deformação viscoplástica irreversível

2.6.2 Composição química por fracionamento SARA

A composição química do CAP varia de acordo com o método de fracionamento empregado. O método mais usual é o método SARA, empregado na Europa, no qual a separação dos constituintes é feita por cromatografia da camada fina com ionização por chama (BERNUCCI *et al*, 2010). Cada letra constituinte do termo SARA representa um constituinte do CAP, todos descritos a seguir:

- S de saturados: compõem de 5 a 20% dos asfaltos e são cadeias de hidrocarbonetos retas e ramificadas, o que os torna óleos viscosos não-polares;

- A de aromáticos: são líquidos viscosos polares que compõem de 40 a 60 % do volume de CAP e possuem uma baixa massa molar;

- R de resinas: são compostos polares e encontram-se em estado sólido e semi-sólido. Suas cadeias de carbono possuem, além de hidrogênio, átomos de oxigênio, nitrogênio e enxofre;

- A de asfaltenos: são compostos sólidos formados pela aglomeração de hidrocarbonetos naftênicos condensados e com cadeias saturadas curtas. São determinantes para a dureza e viscosidade da dispersão final de CAP. Simplificadamente, quanto mais asfaltenos na dispersão, mais duro e viscoso será o CAP

O CAP é uma dispersão coloidal cuja disposição de componentes é apresentada na Figura 2-7, segundo o modelo de Yen. Nesse modelo, os asfaltenos formam micelas individuais revestidas por uma camada de resina polar adesiva imersos em um meio intermicelar de óleos saturados e aromáticos (YEN, 1991, *apud* BERNUCCI *et al*, 2010).

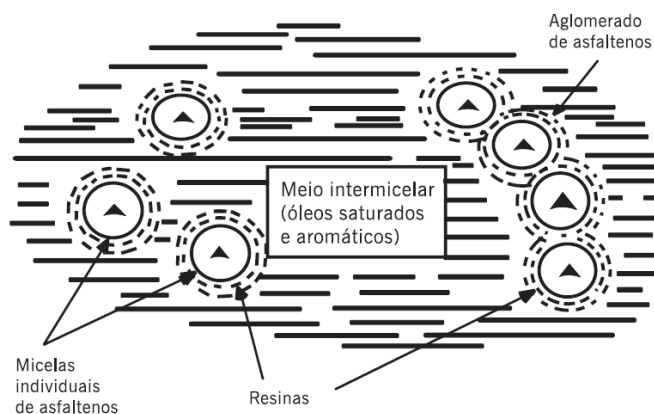


Figura 2-7 Representação esquemática da dispersão coloidal que é o CAP segundo modelo de Yen (YEN, 1991, *apud* BERNUCCI *et al*, 2010)

2.6.3 Viscosidade

A viscosidade é uma medida da resistência que um material apresenta contra escoamento. Para uma boa caracterização do ligante asfáltico é fundamental a definição de dois tipos distintos de viscosidade: dinâmica e cinemática. Há ainda um terceiro tipo de viscosidade denominado viscosidade técnica, que é avaliada para compostos betuminosos pelo ensaio de Saybolt Furol.

Segundo YOUNG *et al* (2011), a viscosidade dinâmica ou absoluta (η) é definida como a relação entre a tensão de cisalhamento aplicada a um fluido (τ) e a taxa de deformação por cisalhamento em relação ao tempo ($\Delta\gamma/\Delta t$). A equação (1) apresenta essa definição. A unidade usual para esse coeficiente é o poise (g/[cm.s]).

$$\eta = \tau / [\Delta\gamma / \Delta t] \quad (1)$$

A determinação da viscosidade dinâmica pode ser realizada com o ensaio de viscosímetro Brookfield, conforme método normatizado na ASTM D 4402-02. Esse ensaio consiste em determinar a viscosidade de um composto betuminoso aquecido, relacionando ela ao torque necessário para manter um fuso rodando em seu interior (tópico 3.6.4 desse relatório).

A viscosidade cinemática (η_c) é definida como a relação entre a viscosidade absoluta (η) e a massa específica do material (ρ), ver equação (2). A unidade usual para esse parâmetro é o centiStoke (cSt ou mm²/s).

$$\eta_c = \eta / \rho \quad (2)$$

A viscosidade técnica é definida, segundo ASTM E102 / E102M-93(2016), como sendo o tempo, em segundos, que uma amostra betuminosa leva para preencher um frasco de 60 mL ao passar por um orifício calibrado (Furol). Sua unidade é o segundo Saybolt Furol (SSF, tópico desse relatório).

Segundo ALVES (2011), a relação entre a propriedade elástica e a propriedade viscosa do ligante é usada para medir a capacidade que o ligante betuminoso tem de resistir às deformações permanentes e à fadiga. O ensaio de cisalhamento dinâmico (DSR) submete o ligante a tensões cisalhantes de comportamento senoidal (τ_t) e avalia a resposta do material a elas (deformação γ_t). Como o ligante asfáltico apresenta tanto comportamento elástico quanto viscoso, as funções senoidais referentes ao carregamento e à deformação estão defasadas em

um ângulo de fase (δ), resultando em um atraso temporal da função de deformações em relação à função de tensões (Δt), como mostra a Figura 2-8.

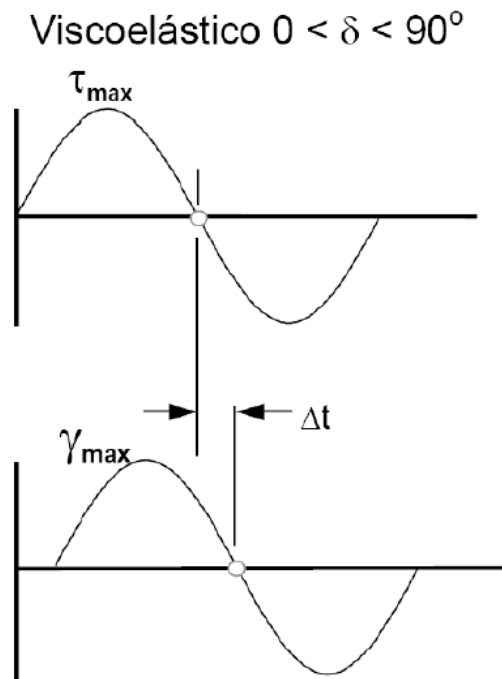


Figura 2-8 Representação esquemática da defasagem entre a tensão e a deformação de um ligante asfáltico considerando somente seu comportamento viscoelástico (NCHRP, *apud* ALVES, 2011)

O módulo complexo de cisalhamento (G^*) é a relação entre a tensão de cisalhamento máxima aplicada ao material ($\tau_{máx}$) e sua deformação correspondente máxima ($\gamma_{máx}$). Esse módulo apresenta duas componentes, uma componente associada ao comportamento viscoso do ligante (G'') e outra associada ao comportamento elástico do material (G'), como é mostrado na Figura 2-9. Vale observar que a relação entre as duas é regulada pela tangente do ângulo de fase do material.

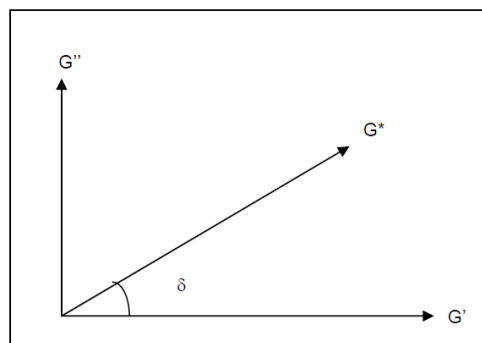


Figura 2-9 Decomposição do módulo complexo de cisalhamento de um material viscoelástico (G^*) em uma componente viscosa (G'') e em uma componente elástica (G') (CHIN, 2009)

2.6.4 *Envelhecimento do ligante asfáltico*

O envelhecimento do ligante asfáltico é notado pela perda de propriedades reológicas do asfalto como a diminuição da penetração e o aumento da sua viscosidade. Os seguintes fatores são os principais motivos que contribuem para o envelhecimento das misturas asfálticas segundo VALLEGRA *et al* (1957, *apud* HAN, 2011):

- Oxidação: a oxidação do CAP ocorre quando as moléculas de oxigênio do ambiente reagem com as cadeias de hidrocarbonetos do material produzindo uma cadeia mais pesada molecularmente. Essas novas moléculas deixam o sistema mais viscoso, frágil e suscetível a rachaduras e trincas. Dependente do tempo e da temperatura;

- Volatização: é um processo de evaporação dos óleos leves contidos no CAP. É exclusivamente função da temperatura;

- Polimerização: combinações das moléculas existentes para formar moléculas maiores que aumentam a viscosidade da composição;

- Tixotropia; as partículas sólidas do CAP, com o passar do tempo, formam uma estrutura interligada que pode ser destruída com a elevação da temperatura e com remodelamento;

- Sinérese: é o enrijecimento ocasionado pela exsudação de componentes leves presentes no asfalto;

- Separação: ocorre quando parte das resinas e componentes oleosos são adsorvidos pelo agregado da mistura.

Segundo MORILHA (2004) três são os estágios de envelhecimento do ligante asfáltico:

- Etapa de mistura (curto prazo): ocorre durante o processo de mistura do asfalto. O ligante é submetido a elevadas temperaturas e a ar quente, o que acelera sua oxidação. Representa aproximadamente 60% do ganho de viscosidade do CAP (envelhecimento);

- Etapa de estocagem e transporte: aproximadamente 20% do envelhecimento do CAP ocorre nessa etapa;

- Etapa de vida útil (longo prazo): representa 20% do envelhecimento total do ligante asfáltico e varia de acordo com a quantidade de vazios existente no material (VALLEGRA *et al* 1957, *apud* JIE HAN, 2011).

Todas as etapas de envelhecimento são apresentadas graficamente na Figura 2-10.

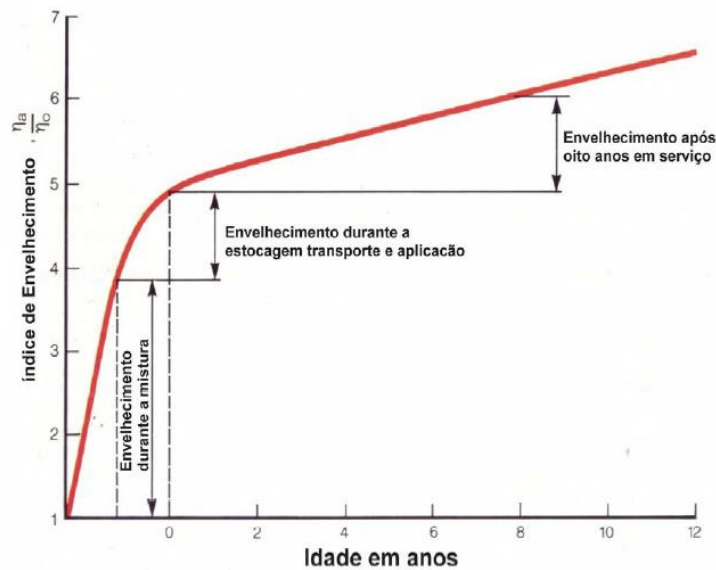


Figura 2-10 Índice de envelhecimento em função da idade do ligante asfáltico (Whiteoak, 1990 *apud* Morilha Jr., 2004)

O envelhecimento de uma amostra de CAP a curto prazo pode ser simulado pela técnica *Rolling Thin-Film Oven Test* (RTFOT).

A técnica RTFOT é normatizado pela ASTM D2872-12e1 e consiste na disposição de uma fina película de CAP em pequenos recipientes cilíndricos que, posteriormente, serão colocados em um forno rotativo. Dentro do forno, as capsulas são submetidas a temperaturas elevadas e a jatos de ar para acelerar o envelhecimento. A Figura 2-11 apresenta um exemplo do forno rotativo utilizado nesse ensaio. A perda de massa por amostra é determinada para verificações de conformidade.

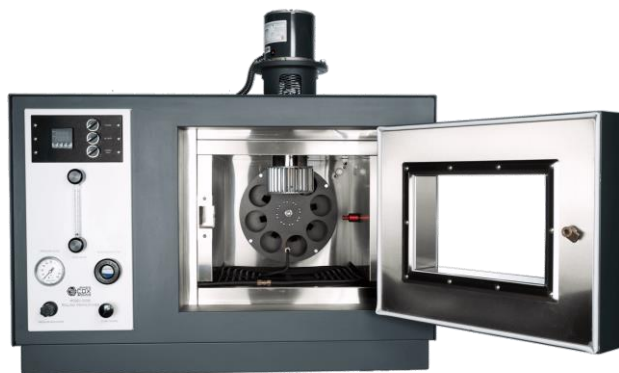


Figura 2-11 Exemplo de forno para ensaio RTFOT (<https://jamescoxandsons.com/>)

2.7 Agregados e suas propriedades

A norma NBR 9935/2005 define agregado como um “material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa ou concreto”.

BERNUCCI *et al* (2010), em seu livro, classifica os agregados em três grandes grupos, segundo a natureza do material, segundo suas dimensões e segundo a granulometria dos grãos que o compõem.

Quanto a natureza, o agregado pode ser considerado:

- Natural: provém da retirada do material de fontes naturais como rochas, rios, sedimentos, etc.
- Artificial: pode provir de resíduos de processos industriais (escória de alto-forno, por exemplo) ou fabricados para possuírem elevado desempenho (argila calcinada, por exemplo);
- Reciclado: provém do reuso de materiais diversos que são incorporados ao novo asfalto (resíduos de construção civil, por exemplo).

Quanto ao tamanho, o agregado pode ser classificado como graúdo (dimensões entre 50,8 mm e 2 mm), miúdo (dimensões entre 2 mm e 0,075 mm) e filer ou enchimento (material com 65% de sua massa passando pela peneira de n°200, abertura de 0,0075 mm).

A distinção por análise granulométrica do agregado (NBR NM 248:2001) é fundamental para o comportamento final da mistura CAP + Agregados. Ela é uma determinação da porcentagem de cada faixa dimensional sobre a massa total do agregado. Essa determinação granulométrica é realizada por peneiramento utilizando peneiras normatizadas pela antiga NBR 5734/1989. Ainda segundo BERNUCCI *et al* (2010), os agregados podem apresentar quatro tipos distintos de graduação:

- Graduação densa: distribuição granulométrica contínua;
- Graduação aberta: distribuição granulométrica contínua, mas com material fino (passante na peneira n°200) em quantidades insuficientes para o preenchimento de vazios;
- Graduação uniforme: a maioria do material encontra-se em uma faixa estreita de diâmetros, ou seja, o material apresenta pouca variabilidade em suas dimensões;
- Graduação descontínua: material com poucos grãos em uma dimensão intermediária. Sua curva granulométrica é caracterizada por um degrau nessa faixa intermediária.

Além dessas propriedades, SILVA (2011), em sua tese, enumera outras propriedades fundamentais para uma boa caracterização dos agregados. São elas: desgaste à abrasão, densidade aparente, forma e absorção. HAN (2011) ainda cita propriedades como angularidade

do agregado graúdo e do agregado fino como fundamentais para o bom desempenho da mistura asfáltica final.

2.7.1 Desgaste à abrasão

Durante o processo de mistura, de lançamento, de compactação e de vida útil de uma mistura asfáltica, seus agregados são submetidos a sucessivos impactos com outras partículas sólidas. As forças atritivas atuantes em sua superfície podem gerar degradação, desintegração e até esmagamento do grão, o que compromete a resistência final da camada a tensões tangenciais. Agregados com baixa resistência abrasiva tendem a possuir uma granulometria distinta em campo da observado em laboratório, já que sofrem muitas perdas com os processos de transporte e estocagem. O desempenho do revestimento não será o mesmo para uma mesma porcentagem de CAP, pois a superfície específica do material aumentará significativamente (WU *et al*, 2013).

A determinação da abrasão de um agregado é normatizada pela norma DNER-ME 035/1998 e consiste em uma avaliação da quantidade de material provindo agregado que fica retida na peneira de abertura 1,7 mm, após sucessivas rotações em um tambor com cargas abrasivas padronizadas.

2.7.2 Densidade relativa ou massa específica real e absorção

A norma NBR 9935 classifica os agregados quanto suas densidades em agregado leve (densidade inferior à 2.000 kg/m³), agregado de densidade normal (densidade entre 2.000 kg/m³ e 3.000 kg/m³) e agregado pesado ou denso (densidade superior à 3.000 kg/m³). Pinto (2006) define a densidade como a relação entre uma quantidade de matéria e seu volume. A norma DNER – ME 081/98 cita dois tipos de densidade:

- densidade aparente: é a relação entre a massa de uma unidade de volume do agregado ao ar e a massa de um mesmo volume de água destilada à uma dada temperatura;
- densidade real: relação entre a massa da unidade de volume de um agregado e a massa de igual volume de água, à uma dada temperatura.

A norma DNER – ME 081/98 define absorção como um aumento de massa decorrente da entrada de água nos poros de um material.

2.7.3 Forma e angularidade dos agregados

A forma e a angularidade dos grãos que compõem um agregado influenciam diretamente a trabalhabilidade e a resistência ao cisalhamento da mistura asfáltica final. Partículas mais irregulares, angulares, e menos esféricas tendem a criar um intertravamento entre si, resistindo melhor a esforços transversais e gerando menores deformações ao longo da vida útil do revestimento (BERNUCCI *et al*, 2010; HAN, 2011).

O índice de forma é um valor que varia entre 0 e 1 e que caracteriza, de maneira simples, a forma das partículas de diferentes agregados graúdos. A obtenção desse parâmetro é descrita na norma DNER – ME 086/94.

A angularidade do agregado miúdo é verificada segundo métodos descritos na norma ASTM C 1252 – 03, que determina uma forma indireta de verificação da angularidade de agregados miúdos pela porcentagem volumétrica de vazios entre os grãos desses.

2.8 Dosagem Marshall

O estudo da associação ligante - agregado é tão importante quanto a avaliação das características individuais de cada um deles em separado. A estabilidade mecânica e a fluência da mistura final em serviço podem ser avaliadas pelo ensaio de compressão marshall.

A estabilidade Marshall é definida como a resistência à compressão radial máxima do material asfáltico (DNIT, 1995). Cada granulometria do agregado apresenta uma quantidade ideal de ligante que deve ser capaz de manter toda a mistura coesa quando submetida à compressão (SEVERINO *et al*, 2015). A deformação total apresentada por um corpo de prova desde o início da aplicação da carga radial até o momento em que ela atinge seu valor máximo, é denominada fluência Marshall.

2.9 Dosagem de misturas recicladas usinadas a quente

Segundo BERNUCCI (2006), há uma diversidade de métodos de dosagem sendo que três são detalhados por ele de maneira mais minuciosas:

- Dosagem do *Asphalt Institute*: essa dosagem segue as mesmas etapas da dosagem marshall com o acréscimo de três etapas adicionais para a determinação dos teores ideais de ligantes a serem incorporados. É um método simples, mas a utilização de solvente costuma alterar as propriedades finais do ligante extraído do fresado;
- Dosagem Castro Neto (2000): esse método também baseia-se no processo de dosagem marshall e na avaliação dos parâmetros Resistência à Tração (RT) e Módulo de Resiliência (MR) das misturas. Tem a vantagem de se basear em métodos mecânicos

para a determinação do teor ideal e sugere uma utilização mínima de 15% de agentes rejuvenescedores (AR) para recuperação do ligante envelhecido;

- Dosagem Superpave: essa dosagem é realizada com o enquadramento da quantidade de material fresado em três faixas: faixa 1- até 15% de material fresado; faixa 2- entre 16% e 25% de material fresado incorporado; faixa 3- acima de 25% de fresado. Para cada uma dessas faixas a dosagem realizada é distinta. Para a faixa 1, a dosagem é realizada conforme recomendações para misturas virgens. Para a faixa 2, é recomendado que o material fresado apresente um PG (*Performance Grade*) inferior ao do ligante recuperado do fresado. Para a faixa 3, são avaliadas as variações dos parâmetros G^* (módulo de cisalhamento complexo) e δ (ângulo de fase) para diferentes razões ligante envelhecido por ligante novo. A proporção ideal será aquela que apresentar os parâmetros adequados para as condições de tráfego.

3 METODOLOGIA

Esse capítulo enumera e descreve a sequência de métodos seguidos durante os ensaios e as verificações realizadas com o material fresado e sua mistura com novos componentes (ligante e agregados “virgens”). São listados e descritos todos os ensaios realizados com o material fresado, com seus componentes envelhecidos, com seus componentes “virgens” e com as misturas asfálticas recicladas dosadas.

3.1 Revisão bibliográfica e fundamentação teórica

Essa primeira etapa consistiu no estudo e na avaliação dos melhores métodos e das melhores técnicas empregadas para a definição dos parâmetros necessários a uma boa caracterização dos materiais a serem ensaiados.

3.2 Coleta de material fresado

A coleta do material fresado foi realizada durante a fresagem rasa de um pavimento no Trevo de Triagem Norte – DF 002 (Brasília, DF). O Projeto Trevo de Triagem Norte é uma obra viária que visa diminuir os pontos de retenção na saída norte do Plano Piloto, entre a DF - 002 e a DF – 007 (Figura 3-1) e tem data de conclusão estimada para o fim de 2018.

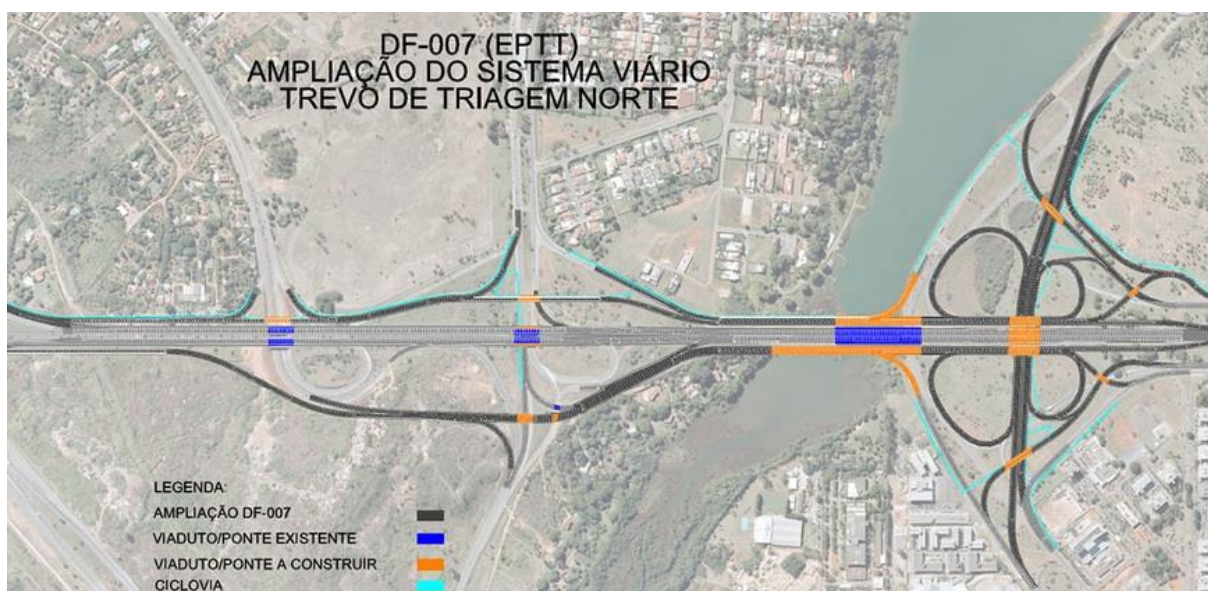


Figura 3-1 Trevo de Triagem Norte (fonte: www.der.df.gov.br/, 2017)

A coleta de material fresado foi realizada na porção final da DF – 002, no dia 11 de setembro de 2017. A máquina utilizada para a fresagem era uma Caterpillar PM-102 (Figura 3-2) e a velocidade de fresagem era muito baixa e não definida pelos operadores.



Figura 3-2 Operação de fresagem Trevo de Triagem Norte

Segundo os responsáveis pela fresagem, o revestimento possuía uma espessura de 13 cm de CBUQ e a fresagem estava sendo realizada em dois turnos, o primeiro com profundidade de 5 cm e o segundo com profundidade de 8 cm. Por análise visual, o corte apresentou profundidade variante em toda a extensão fresada, chegando a 9 cm ainda na primeira passagem (Figura 3-3), provavelmente a causa da velocidade reduzida do equipamento. Não foram obtidas informações sobre a idade do revestimento.



Figura 3-3 Verificação aproximada da espessura de corte

3.3 Determinação da granulometria do material fresado

O primeiro procedimento realizado após a coleta do fresado, foi sua análise granulométrica. Com base na NBR NM 248:2001, foram utilizadas as peneiras presentes na Tabela 3-1 para a determinação da curva granulométrica da mistura CAP + agregados.

Tabela 3-1 Peneiras utilizadas na determinação da granulometria do fresado

Peneira-Mesh	Abertura (mm)
2"	50,000
1"	25,000
3/4"	19,000
1/2"	12,500
3/8"	9,500
Nº 4	4,750
Nº 10	2,000
Nº 40	0,420
Nº 80	0,177
Nº 100	0,149
Nº 200	0,075

A determinação da massa mínima para a amostragem atendeu aos valores mínimos presentes na Tabela 3-2 segundo a dimensão máxima.

Tabela 3-2 Massa mínima de amostra por dimensão máxima do grão (NBR NM 248:2001)

Dimensão máxima do agregado (mm)	Massa mínima da amostra (kg)
<4,75	0,30
9,50	1,00
12,50	2,00
19,00	5,00
25,00	10,00
37,50	15,00
50,00	20,00
63,00	35,00
75,00	60,00
90,00	100,00
100,00	150,00
125,00	300,00

Os dados presentes na Tabela 3-2 só são aplicáveis a materiais secos. Como foi verificada umidade no fresado durante seu armazenamento, foi necessária a realização de uma secagem por evaporação no material, com exposição a iluminação intensa (250 W), por 24 h, com remeximentos frequentes assim que verificada escurecimento da superfície do fresado (Figura 3-4). Esse método foi utilizado para evitar possível amolecimento e consequente separação do ligante do agregado, fenômeno que poderia ocorrer no caso de aquecimento em estufa.

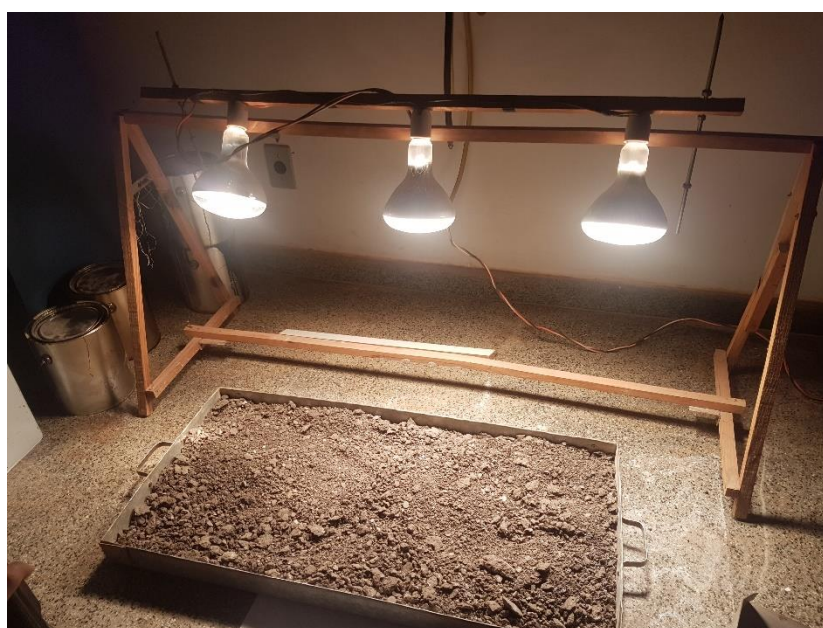


Figura 3-4 Disposição da amostra de fresado para retirada de umidade por evaporação

O material seco foi, em seguida, colocado na associação de peneiras para o peneiramento mecânico (Figura 3-5), com tempo de peneiramento variando conforme o aspecto granulométrico do material. Após essa etapa, pesou-se a peneira superior e teve início um peneiramento manual de 1 minuto com posterior verificação de massa. Essa etapa se encerrou quando a diferença entre duas medições se apresentou inferior a 1 % da massa do material retido. A próxima etapa foi a retirada do material retido na peneira e posterior escovação de ambas as faces da tela (DNER-ME 083/98).

Por fim, os grãos foram armazenados separadamente em dois sacos. O primeiro saco continha os grãos retidos na peneira nº4 (4,75 mm) e o segundo continha o restante de fresado passante por essa. Essa divisão foi fundamental para a caracterização dos componentes de cada uma das frações de gomos do fresado (graúdo e miúda + fina).



Figura 3-5 Conjunto de peneiras e peneirador mecânico utilizados para o peneiramento dos grão de agregados e dos gomos do material fresado

3.4 Extração do ligante asfáltico para determinação do teor de ligante no fresado

Para a separação do ligante asfáltico do agregado do fresado, foram utilizados dois métodos extrativos: método com utilização de extrator de betume (Rotarex) e método com ignição em forno mufla. Os dois métodos são descritos nos tópicos 3.4.1 (para Rotarex) e 3.4.2 (para mufla), sendo que a elaboração de amostras corretivas é descrita no tópico 3.4.3.

3.4.1 Método de extração por centrifugação com Rotarex e separação ligante-solvente por método Rotavaporador

A extração de ligante com utilização de extrator rotatório (Rotarex) é normatizada pela DNER 053/94. A etapa inicial desse método consistiu no aquecimento de uma amostra de fresado em estufa a 110°C – 120°C por uma hora. O material foi, em seguida, quarteado até a obtenção de uma amostra de 1 kg que foi posteriormente pesada e colocada no prato do extrator de betume. No prato, foi acrescentado um solvente (percloroetileno) para dissolver o ligante (Figura 3-6a). Por fim e sobre o conjunto, foi colocado um papel filtro circular e, acima desse, a tampa do extrator. O equipamento foi fechado e colocado em funcionamento (Figura 3-6b).

Novas porções de solventes foram acrescentadas à mistura até verificada a saída de apenas daquele material pela extremidade do equipamento.

O material coletado (solvente +ligante) passou posteriormente por um processo de filtragem com utilização de funil de Buchner, *kitasato* e bomba à vácuo para a recuperação dos finos transportados pelo líquido (Figura 3-6c). A razão entre a diferença das massas antes e após a extração pela massa inicial da amostra foi definida como o teor de ligante presente na mistura. Esse teor foi posteriormente corrigido com a realização de amostras de controle (tópico 3.4.3).



Figura 3-6 Etapas do método de extração com Rotarex (SILVA, 2011)

O solvente utilizado para a extração foi o percloroetileno que, segundo ROSSATO (2014), apresenta as seguintes vantagens em relação aos demais solventes usualmente utilizados para esse método de extração:

- Ao contrário da gasolina e do diesel, o percloroetileno é recuperável, ou seja, pode ser separado do ligante asfáltico de forma relativamente simples e sem comprometimento excessivo nas propriedades do ligante;
- Dentre os solventes usualmente mais utilizados na extração por centrifugação, é o que está associado ao menor erro na determinação do teor de ligante (Figura 3-7);

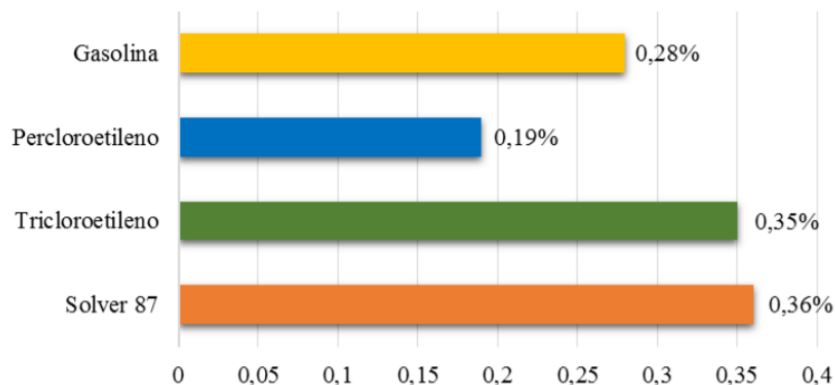


Figura 3-7 - Erro absoluto médio do teor de asfalto aferido por tipo de solvente (ROSSATO, 2014)

- Em laboratório, havia uma grande quantidade desse material, adquirido para estudos anteriores.

A separação do ligante do solvente foi realizada com um equipamento Rotavaporador (Figura 3-8 e Figura 3-9) e conforme normatização (ASTM D 5404). A mistura ligante + solvente provida da centrífuga extratora foi colocada em um frasco de destilação que, em seguida, foi rotacionado sobre uma cuba de glicerina quente, com injeções graduais de dióxido de carbono (CO_2) em seu interior. Em elevadas temperaturas, o solvente evaporou e seus gases, expelidos do frasco, condensaram-se e precipitaram-se em um condensador. O percloroetileno precipitado foi então recolhido em outro recipiente e pôde ser reutilizado em novas extrações. O CAP ficou retido no frasco inicial de destilação.

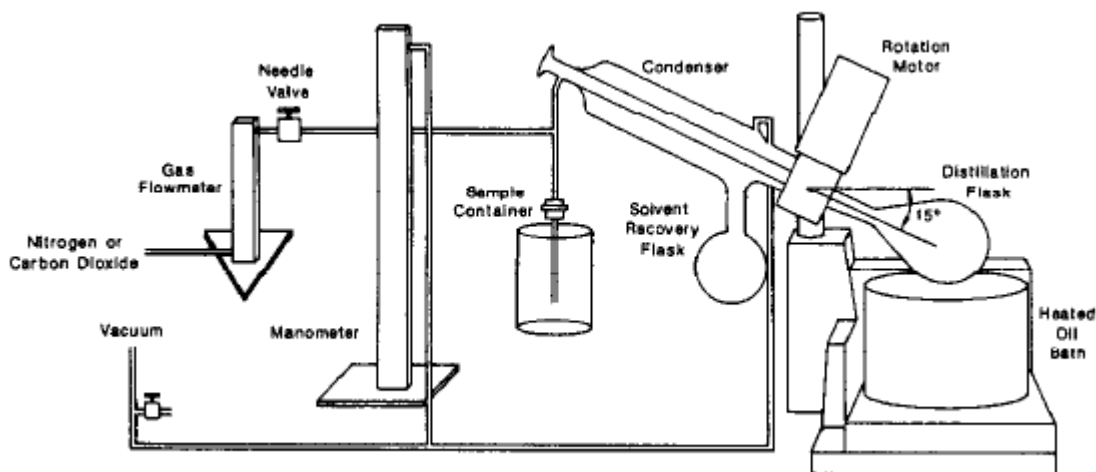


Figura 3-8 Esquema de equipamento Rotavaporador (ASTM D 5404)



Figura 3-9 Equipamento Rotavaporador utilizado

3.4.2 *Método de extração de ligante por ignição em forno mufla*

O método de extração por ignição em forno mufla (ASTM D 6307) consistiu na queima do ligante asfáltico presente nos gomos de fresado a uma temperatura de 570°C (Figura 3-10). Ao contrário do método de centrifugação, o método de combustão não possibilitou a recuperação do ligante retirado da amostra.



Figura 3-10 Pequena mufla utilizada para a extração de ligante por ignição

Para a aferição do teor real de ligante do fresado coletado, foi necessária a realização de uma calibração do forno com amostras de CBUQ com porcentagens de CAP previamente conhecidas. As amostras de calibração, previamente secas em estufa, tiveram suas massas iniciais aferidas e colocadas no forno mufla. Após 45 minutos, foram retiradas e deixadas para secar por 10 minutos. Em seguida, foram colocadas novamente no forno por mais 15 minutos na mesma temperatura de ignição. Passado esse tempo, foram mais uma vez retiradas, resfriadas e pesadas. Repetiu-se esse procedimento até que a massa de cada amostra, após o processo de ignição, não excedesse mais que 0,01% da massa da mesma antes do procedimento. O fator de calibração é definido pela equação (3):

$$C_F = \left(\frac{M_I - M_L}{M_I} \times 100 \right) - P \quad (3)$$

Na qual:

C_F é o fator de calibração, em porcentagem;

M_I é a massa total da amostra de calibração antes da combustão, em g;

M_L é a massa total da amostra de calibração após a combustão, em g;

P é a porcentagem de CAP conhecida da mistura, em porcentagem.

Previamente à determinação do fator de calibração, realizou-se o ensaio com o material fresado coletado. Seguiram-se os mesmos passos descritos para a aferição da perda de massa nas amostras de controle. A porcentagem de CAP, em massa, na mistura foi definida pela equação (4).

$$\%AC = \left(\frac{M_B - M_A}{M_B} \times 100 \right) - C_F \quad (4)$$

Na qual:

$\%AC$ é a porcentagem de CAP na mistura asfáltica;

M_B é a massa total da amostra antes da combustão;

M_A é a massa total da amostra de calibração após a combustão;

C_F é o fator de calibração, em porcentagem.

3.4.3 *Fabricação de amostras de controle para os métodos de extração*

Como já mencionado nos tópicos 3.4.1 e 3.4.2, a determinação do teor de ligante pelo método de combustão em forno mufla e do rotarex dependem da realização de amostras de controle para a obtenção do fator de calibração (*CF*).

Com a finalidade de se obter o referido fator e, ao mesmo tempo, realizar um estudo comparativo entre os dois métodos de extração (mufla e rotarex), foram confeccionadas vinte amostras de misturas asfálticas usinadas a quente para a extração dos ligantes.

Do total de vinte amostras, dez foram destinadas ao método de extração por centrifugação com rotarex e dez ao método de extração por combustão em mufla. Das dez amostras separadas para cada método, cinco possuíam agregados com granulometria semelhante à verificada nos agregados extraídos dos gomos de fresado retidos na peneira nº 4 (4,75 mm) e as cinco restantes possuíam granulometria de agregados próxima à verificada nos agregados extraídos dos gomos de fresado passantes na mesma peneira.

A aproximação da granulometria das amostras de controle à granulometria dos agregados extraídos do material fresado é uma das exigências da norma ASTM D 6307 para garantir maior acurácia do método de extração. A necessidade de determinação da granulometria dos agregados extraídos do material fresado para a confecção das amostras de controle é o principal motivo pelo qual essas amostras foram dosadas posteriormente à extração do ligante do RAP e não previamente, como recomenda a referida norma. É importante frisar que, mesmo com a adequação da granulometria das amostras à granulometria do material fresado, os fatores de calibração aferidos para ambos os métodos ainda foram aproximados, uma vez que, pela falta de informações sobre os materiais envelhecidos, o ligante incorporado às amostras não foi o mesmo que o contido no fresado.

Em relação ao teor de ligante para cada amostra, foram calculados teores ideais segundo aproximação inicial pelo método de dosagem marshall para que, dessa forma, fossem evitados problemas como exsudação e cobrimento não uniforme de CAP nos agregados, que poderiam distorcer os valores aferidos com a extração.

Após o procedimento, os agregados provenientes de todas as amostras de controle passaram por um processo de peneiramento, a fim de ser verificar qualquer perda ou ganho de material que pudesse comprometer o teor de ligante aferido. A Figura 3-11 apresenta esquematicamente duas amostras dosadas para os processos de extração: uma amostra com granulometria dos gomos miúdos e finos (B) e seus agregados derivados da extração por

centrifugação (A) e por ignição (C); uma amostra com mesma 32 granulometria dos gomos graúdos (D) e seus agregados derivados da extração por centrifugação (F) e por ignição (E).

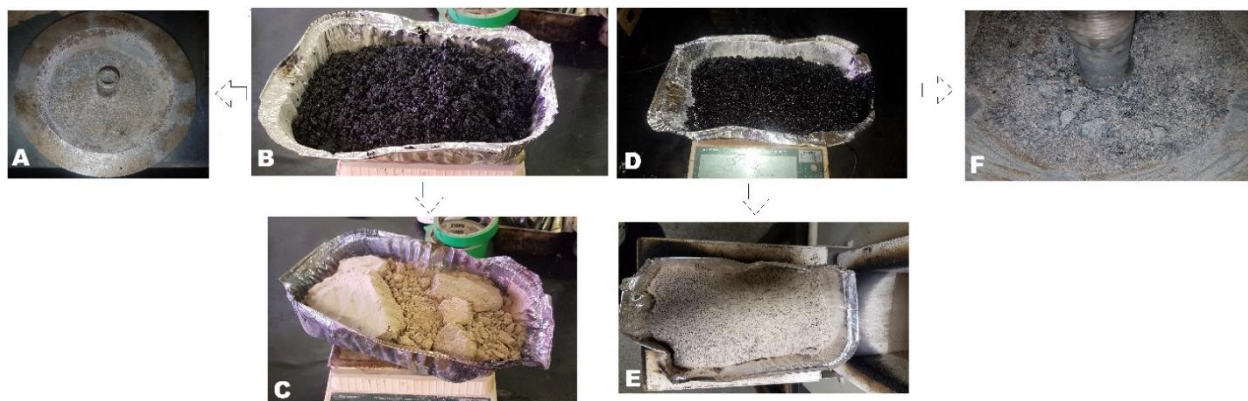


Figura 3-11 Exemplo de amostras dosadas para aferição dos fatores de calibração

3.5 Caracterização dos agregados

Os agregados “virgens” incorporados nas misturas recicladas, de origem calcária e de jazidas do próprio Distrito Federal, tiveram seus dados de caracterização obtidos do estudo de NUNES (2017).

Os agregados extraídos do material fresado foram submetidos a três ensaios de caracterização necessários para a dosagem marshall: determinação da granulométrica, aferição da densidade real e da absorção, conforme método de dosagem do Asphalt Institute (BERNUCCI, 2006 e BAPTISTA, 2006).

Como foram realizados dois métodos distintos de extração (por ignição e por centrifugação), amostras provenientes de cada um desses foram ensaiadas separadamente para posterior comparação dos valores aferidos.

3.5.1 Determinação da granulometria

A determinação da granulometria do agregado é normatizada pela NBR NM 248:2001 e seguiu os mesmos métodos descritos para o peneiramento dos gomos de fresado no tópico 3.3 desse estudo. A única diferença na realização desses ensaios foi o aquecimento prévio do material. No caso do peneiramento de agregados, a amostra foi aquecida em estufa (temperatura próxima a 105 °C) previamente ao ensaio.

Para a composição do concreto asfáltico, a norma DNIT 031/06 exige que a granulometria do agregado atenda a uma das curvas de dosagem presentes na Tabela 3-3. No

33 caso da dosagem de misturas asfálticas destinadas à capa da camada de rolamento, as porcentagens referentes à curva C devem ser atendidas. Como os agregados extraídos do RAP não possuíam granulometria adequada a esses parâmetros, a correção da curva foi realizada com a incorporação dos agregados virgens caracterizados por NUNES (2017).

Tabela 3-3 Faixas de dosagem para os agregados (DNIT 031/06)

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,8	100	-	-	-
1 ½"	38,1	95 - 100	100	-	± 7%
1"	25,4	75 - 100	95 - 100	-	± 7%
¾"	19,1	60 - 90	80 - 100	100	± 7%
½"	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	2,0	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 (Binder)	4,5 - 7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5 - 9,0 Camada de rolamento	± 0,3%

3.5.2 Determinação da densidade real e da absorção

A determinação da densidade de um agregado varia conforme o tamanho do mesmo. A porção de massa do agregado que fica retida na peneira 4,8 mm deve ser ensaiada conforme a norma DNER – ME 081/98. A porção passante por essa peneira e retida na peneira n° 200 (0,075 mm) deve ter sua massa específica avaliada segundo procedimentos descritos na DNER – ME 194/98. A determinação da densidade específica para grãos passantes na peneira n°200 é normatizada pela DNER-ME 085/94 (Figura 3-12).

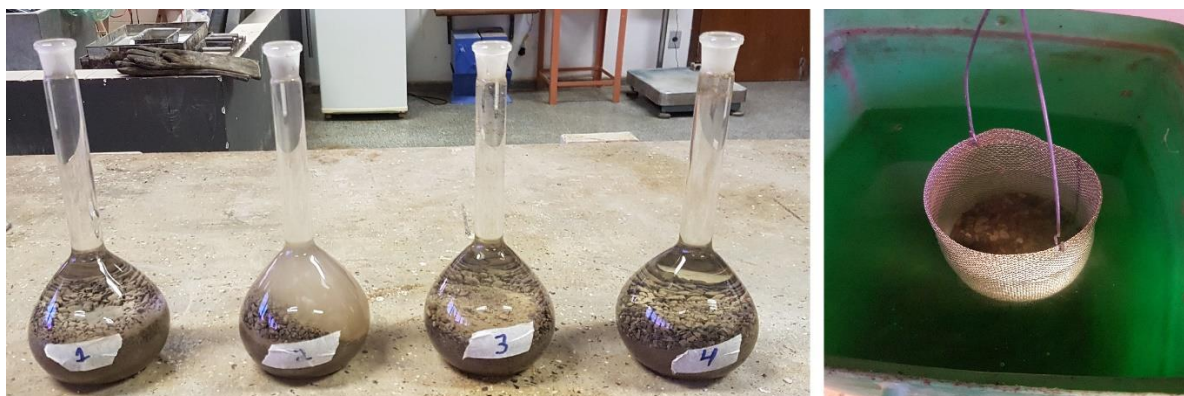


Figura 3-12 Fotos do processo de aferição da densidade real de agregados miúdos (esquerda) e graúdos (direita)

A massa mínima da amostra a ser ensaiada segundo a norma DNER – ME 081/98 é determinada conforme a Tabela 3-4

Tabela 3-4 Massa mínima para ensaio de densidade aparente (DNER – ME 081/98)

Dimensão	Massa
12,5	2,0
19	3,0
25	4,0
38	5,0
50	8,0
64	12,0
76	18,0
100	40,0
125	75,0
152	125,0

A amostra foi lavada e seca até a constância de massa em estufa a 105 °C. Em seguida, resfriou-se o material à temperatura ambiente por um período de uma a três horas para então ser submergido em água à temperatura ambiente por 24h.

Após esse período, o agregado foi retirado da água e colocado sobre um pano absorvente com o qual enxugou-se sua superfície cuidadosamente, até ser removida a película de água superficial. Mediu-se sua massa após esse procedimento.

O agregado foi então imergido em um recipiente com água potável à temperatura de 24 °C. A balança acoplada ao recipiente determinou a massa submersa do agregado.

Por fim, foi aferida a massa seca do agregado após nova secagem em estufa. A densidade aparente é determinada pela equação (5).

$$D_{real} = \frac{M_s}{M_h - L} \quad (5)$$

Na qual:

D_{real} é a densidade real;

M_s é a massa ao ar do agregado seco em estufa, em g;

M_h é a massa ao ar do agregado na condição saturada superfície seca em estufa, em g;

L é a leitura da balança correspondente ao agregado submerso, em g.

A absorção do agregado é definida pela equação (6) na qual a é a absorção do agregado em porcentagem.

$$a = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (6)$$

A massa específica da porção de agregado passante na 4,8 mm e retida na 0,075 mm é determinada conforme procedimentos descritos na norma DNER – ME 194/98. Uma massa de 500g de agregado seco é colocada em um frasco Chapman com água até a marcação de 200 mL. A massa específica do agregado miúdo é definida pela equação (7).

$$\gamma = \frac{500}{L_c - 200} \quad (7)$$

Na qual:

γ é a massa específica do agregado miúdo, em g/cm³;

L_c é a leitura final no frasco após a imersão do agregado, em cm³

A absorção do agregado miúdo foi determinada segundo procedimento descrito na norma NBR NM 30 com a utilização de um molde em forma de tronco de cone. A condição saturada superfície seca é atingida quando o agregado miúdo consegue manter o formato de tronco após a retirada do molde. A absorção do material foi definida pela razão entre a diferença das massas saturada superfície seca e seca em estufa com sua própria massa seca.

Por fim, a densidade real do material pulverizado foi realizada em conformidade à norma DNER-ME 085/94, segundo a qual a densidade real dos finos é determinada pela razão entre a massa seca de uma amostra desse material pelo volume deslocado por ele ao ser submerso em um Frasco de Le Chatelier com querosene, a uma altura predefinida.

3.6 Caracterização do ligante asfáltico

Assim como o descrito para os agregados (tópico 3.5), as misturas asfálticas recicladas a quente (MARQ) incorporam dois tipos distintos de ligantes: um ligante “virgem” (normalmente com agentes rejuvenescedores) e um ligante envelhecido proveniente do material fresado.

O ligante novo utilizado para as dosagens foi o CAP 50/70, por sua boa representatividade nas misturas usualmente realizadas na prática da reciclagem (SILVA, 2011) e por sua baixa consistência, que contrabalança os parâmetros do ligante envelhecido. O ligante foi fornecido pela Centro Oeste Asfalto e já fora caracterizado por NUNES (2017) em estudos prévios. O ligante envelhecido proveniente dos gomos de asfalto fresado foi submetido aos ensaios de caracterização listados do tópico 3.6.1 ao tópico 3.6.4.

3.6.1 Ponto de amolecimento – método anel bola

O ponto de amolecimento do CAP foi determinado pelo método anel bola conforme o método descrito na norma DNIT 131/2010.

Segundo a referida norma, a amostra para esse ensaio é composta por 200 a 250 g de CAP que é aquecido em estufa para ser moldado em dois anéis de latão. Após o resfriamento do conjunto por 30 minutos ao ar, foram retirados o excesso de material asfáltico nos anéis, estando a amostra pronta para o ensaio.

A aparelhagem foi disposta como mostrado na Figura 3-13, com duas esferas metálicas sobre cada anel com CAP, e levada a banho em água aquecida. A taxa de variação da temperatura da água foi da ordem de 5°C por minuto, controlada por um termômetro dentro do béquer de ensaio. O ponto de amolecimento foi a média das temperaturas nas quais o CAP contido em cada um dos anéis tocou a placa metálica inferior da aparelhagem, com aproximação de 0,2 °C.



Figura 3-13 Disposição da aparelhagem para a realização do ensaio de ponto de amolecimento

3.6.2 *Ensaio de penetração*

O ensaio de determinação da penetração no CAP, que é normatizado pela norma DNIT 155/2010, requereu a aparelhagem apresentada na Figura 3-14. A amostra de CAP, com aproximadamente 50 g, foi preaquecida até atingir fluidez para ser colocada em um recipiente com 55 mm de diâmetro interno e altura interna mínima de 35 mm.

Em seguida, resfriou-se o conjunto até uma temperatura entre 15 °C e 30 °C para então ser colocado em banho d'água até a temperatura de ensaio (25 °C). Após esse período, o material foi penetrado pela agulha com carga de 100 g. A amostra sofreu três penetrações em regiões mais distantes possíveis. A média das penetrações foi a medida final de penetração do material, em décimo de milímetro.



Figura 3-14 Pernetômetro com agulha usados em ensaio de penetração

3.6.3 Determinação da densidade do CAP com picnômetro

A determinação da densidade do CAP foi realizada conforme método normatizado na norma DNER – ME 193/96. O ensaio consistiu em comparar a massa de um determinado volume de material betuminoso, a 25 °C, com a massa de um mesmo volume de água destilada à mesma temperatura. Para tal finalidade, utilizou-se um picnômetro padronizado de 25 ml que foi pesado perfeitamente seco (massa “a”). Posteriormente, encheu-se o picnômetro com água a temperatura estabelecida e colocou-se o conjunto, com um béquer, em banho d’água por 30 minutos. O picnômetro com água foi então seco e pesado (massa “b”).

Em seguida, uma amostra de CAP fluidificado por aquecimento foi despejada até 1/3 da altura de um picnômetro vazio e perfeitamente seco. Esfriou-se o conjunto à temperatura ambiente por 40 min para posterior pesagem com a tampa (massa “c”). Preencheu-se o restante do volume disponível com água destilada e o picnômetro tampado foi novamente colocado em um béquer em banho d’água por 40 min. Por fim, secou-se o mesmo e pesou-se o picnômetro com CAP e água (massa “d”). Ambos os picnômetros estão representados na Figura 3-15.



Figura 3-15 Picnômetros com ligante e água (esquerda) e com 1/3 de ligante

A densidade do CAP (D) é dada pela equação (8). Essa densidade é posteriormente multiplicada pela massa específica da água à temperatura do ensaio para se obter a massa específica do material.

$$D = \frac{(d-a)}{(b-a)-(d-c)} \quad (8)$$

3.6.4 *Determinação da viscosidade com utilização de viscosímetro rotacional*

Os métodos necessários para a determinação da viscosidade absoluta com utilização de viscosímetro rotacional são normatizados pela ASTM D 4402 – 02.

Três amostra de ligante foram primeiramente aquecidas à 10 °C acima da temperatura de cada ensaio. Preencheu-se então os tubos de ensaio com as amostras de 8 gramas de ligante e colocou-se um desses tubos dentro do recipiente do viscosímetro (Figura 3-16). Após ajustada a temperatura desejada no Thermosel do aparelho, foi necessário aguardar o equilíbrio térmico do sistema. Por fim, encaixou-se o spindler nº 21 no aparelho e foi aplicada a velocidade de rotação desejada. Leu-se o resultado diretamente no aparelho, que correlacionou o torque aplicado com as características dimensionais dos acessórios, resultando num valor de viscosidade em centipoise (cP).



Figura 3-16 Exemplo de viscosímetro Brookfield (Han *et al*, 2011)

3.7 *Dosagem de misturas recicladas e avaliação mecânica*

3.7.1 *Dosagem segundo método marshall*

O método de dosagem utilizado foi o método convencional de dosagem marshall com acréscimo de duas etapas propostas pelo *Asphalt Institute* (1995) e exclusivas para misturas asfálticas recicladas a quente (BERNUCCI, 2006).

Segundo esse método, tanto o ligante quanto os agregados provenientes do material fresado desempenharão suas respectivas funções na mistura reciclada final, devendo-se acrescentar a essa uma quantidade predefinida de agregados e de ligantes virgens para adequações às normas virgentes.

As etapas da dosagem são enumeradas a seguir desconsiderando os procedimentos de caracterização de agregados e de ligantes já descritos nas etapas anteriores:

I. Correção da curva granulométrica do agregado extraído do fresado com porcentagens de agregado novo. No caso, a granulometria final esperada para o conjunto é a faixa central da curva C para CBUQ destinado à capa de pista de rolamento (DNIT 031/2006);

II. Estima-se pela equação (9) a quantidade total de ligante necessária (novo + envelhecido):

$$P_l = 0,035a + 0,045b + K \times c + F \quad (9)$$

Na qual:

P_l = demanda aproximada de ligante para a mistura reciclada (%);

a = percentual de agregado mineral retido na peneira 2,36mm (Nº 8);

b = percentual de agregado mineral passante na peneira 2,36mm (Nº 8) e retido na peneira 0,075mm (Nº 200);

c = percentual de agregado mineral passando na peneira 0,075mm (Nº 200).

K = constante, função da quantidade de agregado c que passa na peneira 0,075mm (0,15 para c entre 11 e 15%, 0,18 para c entre 6 e 10% e 0,20 para c igual ou menor que 5%);

F = absorção dos agregados. Valores entre 0 e 0,2%.

III. Com o teor de ligante total, estima-se o teor total de ligante novo a ser incorporado à mistura, segundo equação (10):

$$P_{ln} = \frac{(100^2 - rP_{lf})P_{lt}}{100(100 - P_{lf})} - \frac{(100 - r)P_{lf}}{100 - P_{lf}} \quad (10)$$

Na qual:

P_{ln} = percentual de ligante novo na mistura final;

r = percentual de agregado novo com relação ao agregado total da mistura reciclada;

P_{lt} = teor de ligante (novo + envelhecido) da mistura reciclada em porcentagem;

P_{lf} = teor de ligante do material fresado em porcentagem.

IV. Procedimento de dosagem Marshall convencional e moldagem dos corpos de prova.

Após a determinação do teor supostamente ideal de ligante novo, foram preparadas misturas com novos teores com variações de $\pm 0,5\%$ e $\pm 1\%$ do calculado, resultando em 15 corpos de prova.

A dosagem proposta pelo *Asphalt Institute* ainda considera ajustes na viscosidade final da mistura com a adição de agentes rejuvenescedores para o ligante envelhecido. Como no presente trabalho não foram usados rejuvenescedores, essa etapa de aprimoramento foi desconsiderada.

3.7.2 *Ensaio de estabilidade e de fluência Marshall*

A avaliação da estabilidade e da fluência de uma mistura betuminosa a quente foi realizada segundo ensaio marshall, normatizado pela DNER - ME 043/95, com pequenas alterações para a inclusão dos grãos de fresado na mistura.

Para o preparo dos corpos de prova de 1.200g, o ligante foi aquecido à 150°C (75 SSF). Os agregados, juntamente com os gomos de fresado, foram aquecidos a 165°C (15°C a mais que a temperatura do ligante). Por fim, misturaram-se o ligante e os agregados ainda quentes para serem colocados nos moldes de corpo de prova untados e com papel filtro.

No molde, a mistura foi compactada com 15 golpes de espátula no interior e ao redor do molde e 10 golpes em seu centro de massa. Em seguida, com a utilização dos anéis superior e inferior, foram submetidas a 75 golpes de soquete padronizado com queda de 45,72 cm. Após todos esses processos, retiraram-se os corpos de prova dos moldes e colocaram-nos para secar à temperatura ambiente por 12 h. Cada um dos corpos tiveram sua altura e diâmetros aferidos para verificação de conformidade com os limites de 3,5 a 6,5 cm de altura e diâmetro de 10 cm.

Após essa etapa, foram avaliados os parâmetros físicos das misturas (densidade aparente, densidade máxima teórica, porcentagem de vazios, porcentagem de vazios do agregado mineral, relação de betume – vazios). Todos avaliados em conformidade aos limites estabelecidos para capa ou binder de pista de rolamento segundo a norma DNIT 031/2006 .

Os cilindros foram por fim aquecidos em banho maria a uma temperatura de 60°C por um período de 30 minutos e foram, em seguida, colocados no molde de compressão e posicionados na prensa juntamente com um medidor de fluência. Iniciou-se a operação da

prensa com seu êmbolo estabilizando sua velocidade em 5 cm/min até o rompimento dos corpos de prova. Foram registrados os valores de fluência e de estabilidade medidos ao longo do tempo de ensaio. A média de três resultados para uma mesma dosagem foi determinada como a estabilidade resultante. A fluência foi dada pelo medidor de fluência fixado no corpo de prova. Essas etapas são apresentadas na Figura 3-17.

O teor ideal de ligante novo e total (novo + envelhecido) foram determinados segundo o atendimento aos limites normatizados na DNER - ME 043/95 para os parâmetros físicos e para a estabilidade marshall.



Figura 3-17 Processos para avaliação dos corpos de prova marshall: mistura, compactação, medidas das dimensões, aferição das massas específicas e compressão marshall (da esquerda para a direita, de baixo para cima)



Figura 3-18 Corpos de prova confeccionados

4 RESULTADOS E ANÁLISE

Nessa seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios de caracterização do material fresado coletado no Trevo de Triagem Norte - TTN, dos ligantes (novo e envelhecido) e dos agregados (virgens e extraídos do fresado) utilizados na dosagem das misturas asfálticas recicladas a quentes (MARQ). Também são apresentados e analisados os parâmetros físicos e a estabilidade das misturas confeccionadas.

4.1 Granulometria do material fresado

Após a coleta do material fresado descrita no tópico 3.2 do presente relatório, foi realizado o peneiramento daquele. Uma avaliação prévia determinou que a dimensão nominal máxima apresentada pelos grãos de fresado foi de 25 mm (correspondente à abertura da peneira 1”). Para esse caso, a NBR – NM 248 exige uma amostragem mínima de 10 kg de material a ser ensaiado.

A quantidade total de fresado peneirado foi de aproximadamente 26,8 kg. O peneiramento foi realizado em cinco frações e o resultado final é apresentado na Figura 4-1 juntamente com o limite superior e inferior para a curva granulométrica C (C inf e C sup, respectivamente).

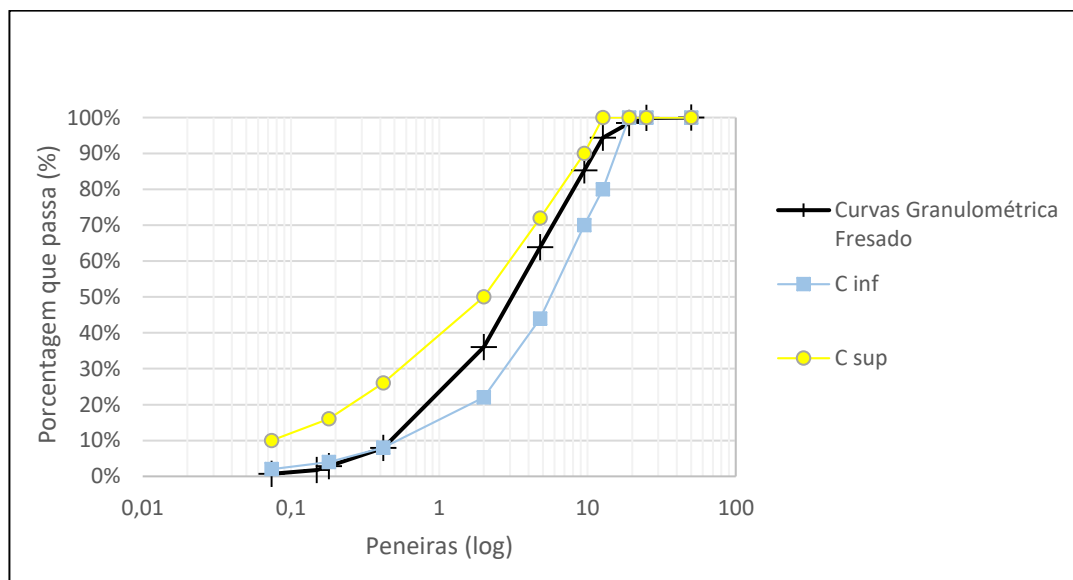


Figura 4-1 Curva granulométrica do material fresado e limites para dosagem de curva granulométrica C, DNIT 031/2006-ES

Como descrito na seção 3.3, as porções passante e retida na peneira nº4 (4,75 mm) foram separadas para a posterior análise de teores de ligante em cada uma dessas frações. Segundo o peneiramento, 36,11% dos gomos de fresado ficaram retidos na peneira nº4 e 63,89% passaram por essa.

4.2 Extração do ligante betuminoso

Como apresentado na seção 3.4, amostras de fração graúda e miúda do fresado coletado foram submetidas a dois processos de extração de ligante: extração por ignição em forno mufla e extração por centrifugação com Rotarex. A Tabela 4-1 apresenta os valores correspondentes aos teores de ligante aferidos pelos dois métodos, segundo a granulometria dos gomos de fresado.

Tabela 4-1 Valores correspondentes a extração de ligante pelo método da mufla e do rotarex

Equipamento	Granulometria dos Gomos	Método	Amostra	%CAP
Rotarex	>nº4	DNER 053/94	1R>4	6,21%
			2R>4	5,90%
			3R>4	5,21%
	<nº4	DNER 053/94	1R<4	6,34%
			2R<4	6,63%
			3R<4	6,20%
Mufla	>nº4	ASTM D 6307-98	1M>4	5,57%
			2M>4	5,51%
			3M>4	5,97%
	<nº4	ASTM D 6307-98	1M<4	6,23%
			2M<4	6,10%
			3M<4	6,60%

Pelos valores presentes na Tabela 4-1, verifica-se que os teores de ligante determinados pelo método de centrifugação são, aparentemente, superiores aos aferidos por ignição. No entanto, esses valores não desconsideram a perda ou ganho de massa derivados de:

- Perda de agregados durante a execução dos ensaios;
- Resquícios de ligante remanescente nos agregados após extração;
- Perda de umidade remanescente nos grãos durante a ignição em mufla.

Devido a todas as considerações listadas, foram calculados, posteriormente à caracterização dos agregados e dos ligantes, fatores de calibração corretivos para ambos os métodos de extração utilizados.

4.3 Caracterização dos Agregados

Em conformidade ao descrito no tópico 3.5 do presente relatório, as misturas asfálticas recicladas realizadas possuíram dois tipos de agregados. Foram eles: agregados virgens armazenados em laboratório e já caracterizados em estudos prévios; agregados envelhecidos extraídos do fresado.

Segundo os resultados de caracterização apresentada por NUNES (2017), os agregados virgens apresentam as propriedades disposta na Tabela 4-2 na qual também são apresentados os limites estabelecidos em norma para os respectivos parâmetros físicos aferidos. Em análise, verifica-se que os materiais ensaiados atendem aos limites normativos, estando aptos, dessa forma, a serem incorporados nas misturas asfálticas recicladas a quente.

Tabela 4-2 Propriedades aferidas nos agregados virgens, normativas, especificações e valores especificados em norma (NUNES, 2017)

Agregados Graúdos			
Ensaio	Método	Especificação	Valor
Abrasão Los Angeles (%)	DNER ME 078	máx 30	16
Índice de forma	DNER ME 086	mín 0,5	0,9
Chatos e alongados, 3/4"- 1/2" (%) 5 para 1	ASTM D 4791	máx 10	1,6
Chatos e alongados, 1/2"- 3/8" (%) 5 para 1		máx 10	2,3
Densidade Real (g/cm ³)			2,758
Densidade Aparente (g/cm ³)			2,710
Densidade Aparente SSS (g/cm ³)	ASTM C 127	-	2,727
Absorção (%)			0,65
Agregados Miúdos			
Ensaio	Método	Especificação	Valor
Angularidade N10-N40 (%)	ASTM C 1252 (método B)	mín 45	49
Angularidade N40-N200 (%)		mín 45	55
Teor de argila (%)	ASTM D 2419	mín 55	75
Densidade Real (g/cm ³)			2,775
Densidade Aparente (g/cm ³)			2,830
Densidade Aparente SSS (g/cm ³)	ASTM C 128	-	2,794
Absorção (%)			0,94
Filler			
Ensaio	Método	Especificação	Valor
Densidade (g/cm ³)	DNER ME 085	-	2,752

Para os agregados coletados do material fresado, o método de dosagem, proposto pelo *Asphalt Institute* e replicado por Baptista (2006), exige a determinação da granulometria dos grãos. Como foram utilizados dois métodos distintos para extração de ligante (mufla e rotarex) foram obtidas duas curvas granulométricas correspondente a cada um deles (Tabela 4-3 e Figura 4-2), tendo sido atendidos todos os procedimentos e exigências listados na NBR NM 248:2001. Na Figura 4-2, também são apresentados os limites máximo e mínimo para a curva C (DNIT 031/2006-ES), para comparação.

Tabela 4-3 Granulometria verificada do agregado extraído do fresado segundo método de extração e granulometria dos gomos de fresado

Malha		Rotarex		Mufla		Resumo	
Peneiras	Abertura (mm)	R>4	R<4	M>4	M<4	R	M
2"	50	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1"	25	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
3/4"	19,05	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1/2"	12,7	98,43%	100,00%	98,74%	100,00%	99,33%	99,62%
3/8"	9,525	95,09%	100,00%	93,94%	100,00%	97,89%	98,18%
Nº 4	4,8	72,49%	100,00%	70,70%	100,00%	88,18%	91,19%
Nº 10	2	47,13%	73,80%	47,39%	73,73%	62,34%	65,81%
Nº 40	0,42	23,85%	34,54%	24,71%	38,17%	29,94%	34,13%
Nº 80	0,18	13,89%	20,22%	14,48%	21,06%	17,50%	19,08%
Nº 200	0,074	6,13%	9,26%	5,49%	9,11%	7,92%	8,02%

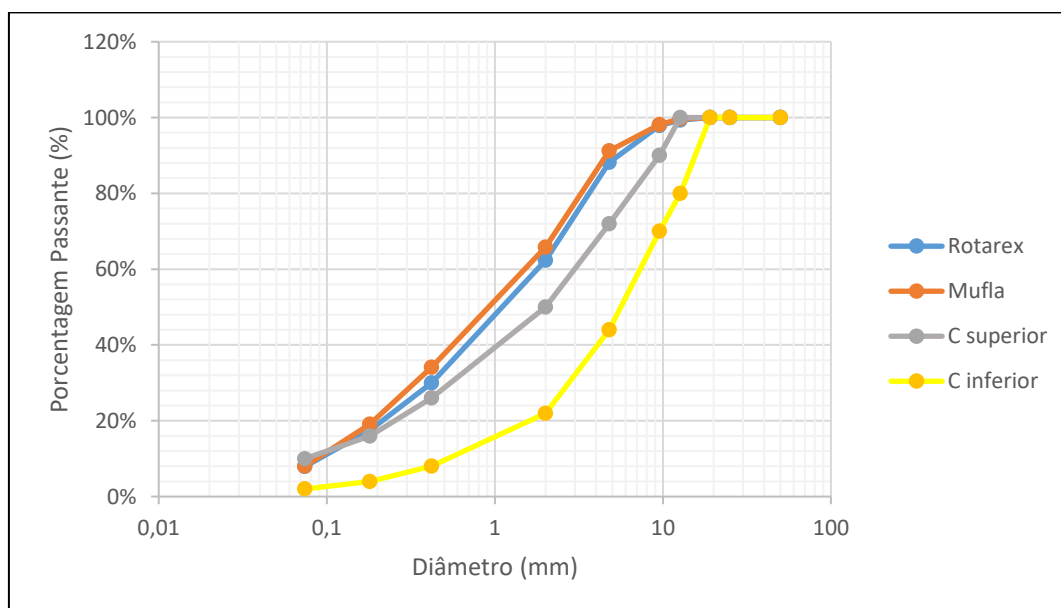


Figura 4-2 Curva granulométrica dos agregados extraídos do fresado pelo método da mufla e do rotarex. Apresentação dos limites da curva C

Em análise, é verificado que:

- A granulometria do agregado extraído variou pouco entre os métodos de extração, sendo a diferença mais significativa encontrada na fração miúda e fina. Essa disparidade é justificável pelo fato de que, durante a realização da extração de ligante pelo método de centrifugação com rotarex, houve a fuga inevitável dessas frações dos grãos, o que alterou para menos a porcentagem de agregado retido nas peneiras nº 80 e nº 200;
- A granulometria do agregado extraído está fora dos limites da curva C e, visando adequação às exigências normativas para a confecção de camada de revestimento (DNIT 031/2006-ES), foi corrigida com a incorporação de agregados virgens;
- A dimensão máxima característica do agregado para ambos os métodos de extração é a mesma, 3/8”.

Considerando o elevado volume de perdas verificado na extração por Rotarex, a curva granulométrica obtida com a extração por ignição em forno mufla foi adotada como a granulometria ideal para dosagens posteriores (dosagem Marshall e amostras de controle).

Para a realização das misturas asfálticas recicladas, foi necessária a determinação da densidade real e da absorção para o agregado extraído. A Tabela 4-4 apresenta os valores aferidos e as normativas que nortearam a determinação das referidas propriedades.

Tabela 4-4 Propriedades aferidas nos agregados virgens, normativas e valores

Agregados Graúdos				
Extração	Ensaio	Método	Especificação	Valor
Mufla	Densidade Real (g/cm ³)	DNER-ME 081 e ASTM C 127	-	2,63
	Absorção (%)			0,45
Rotarex	Densidade Real (g/cm ³)	DNER-ME 081 e ASTM C 127	-	2,62
	Absorção (%)			0,46
Agregados Miúdos				
Extração	Ensaio	Método	Especificação	Valor
Mufla	Densidade Real (g/cm ³)	DNER-ME 084, ASTM C 128 e NBR NM 30	-	2,55
	Absorção (%)			0,84
Rotarex	Densidade Real (g/cm ³)	DNER-ME 084, ASTM C 128 e NBR NM 30	-	2,54
	Absorção (%)			0,84
Fíller				
Extração	Ensaio	Método	Especificação	Valor
Mufla	Densidade Real (g/cm ³)	DNER-ME 085	-	2,183
Rotarex	Densidade Real (g/cm ³)	DNER-ME 085	-	2,185

Pela análise dos dados, verifica-se que os métodos de extração não influenciaram significativamente a densidade e a absorção dos grão extraídos. A diferença entre as massas específicas aferidas para a porção graúda e para a porção miúda obtidas por ambos os métodos de extração foi inferior a 0,02 g/cm³ (limite máximo estabelecido pelas normas DNER ME 081 e DNER ME 084 para diferentes aferições de densidade de um mesmo agregado). Na porção de fíller, a diferença entre as densidades foi de 0,002 g/cm³, inferior ao limite máximo estabelecido na norma DNER-ME 085 para um mesmo material.

4.4 Caracterização dos Ligantes

Em conformidade ao descrito no tópico 3.6 do presente relatório, as misturas asfálticas recicladas confeccionadas possuíam dois tipos de ligantes: CAP 50/70 novo e já caracterizado em estudos prévios (NUNES, 2017); ligante envelhecido extraído do fresado e recuperado pelo método Rotavaporador.

Segundo os resultados de caracterização apresentada em NUNES (2017), os agregados virgens a serem utilizados apresentam as propriedades disposta na Tabela 4-2, na qual também são apresentados os limites usuais para os respectivos parâmetros físicos aferidos (BERNUCCI, 2008).

Tabela 4-5 Propriedades físicas do ligante utilizado e limites estabelecidos em norma (NUNES, 2017)

Característica	CAP 50/70	ANP (2005)
Penetração (0,1 mm)	51	50 a 70
Ponto de Fulgor (°C)	325	mín 235
Ponto de amolecimento (°C)	49	mín 46
Viscosidade Rotacional a 177°C (mPa.s)	55	30 a 150
Densidade (g/cm ³)	1,014	-

Em análise, verifica-se que o ligante CAP 50/70 atendeu a todos os limites normatizados, estando apto a ser incorporado como a fração de ligante novo na mistura reciclada.

A outra porção de ligante que compõem a mistura reciclada é a de ligante envelhecido. O CAP recuperado do fresado passou pela mesma bateria de ensaios do ligante “virgem”, com exceção do ensaio de ponto de fulgor. As propriedades aferidas para o material recuperado são dispostas na Tabela 4-6. A Figura 4-3 apresenta graficamente os resultados para o ensaio de

aferição de viscosidade com viscosímetro Brookfield com utilização de spindler nº 21, conforme normatizado pela ASTM D 4402 - 02.

Tabela 4-6 Propriedades físicas do ligante recuperado utilizado

Característica	Ligante Envelhecido
Penetração (0,1 mm)	51
Ponto de amolecimento (°C)	54,5
Viscosidade Rotacional a 135°C (mPa.s)	1103
Viscosidade Rotacional a 150°C (mPa.s)	573
Viscosidade Rotacional a 177°C (mPa.s)	245
Densidade (g/cm ³)	1,151

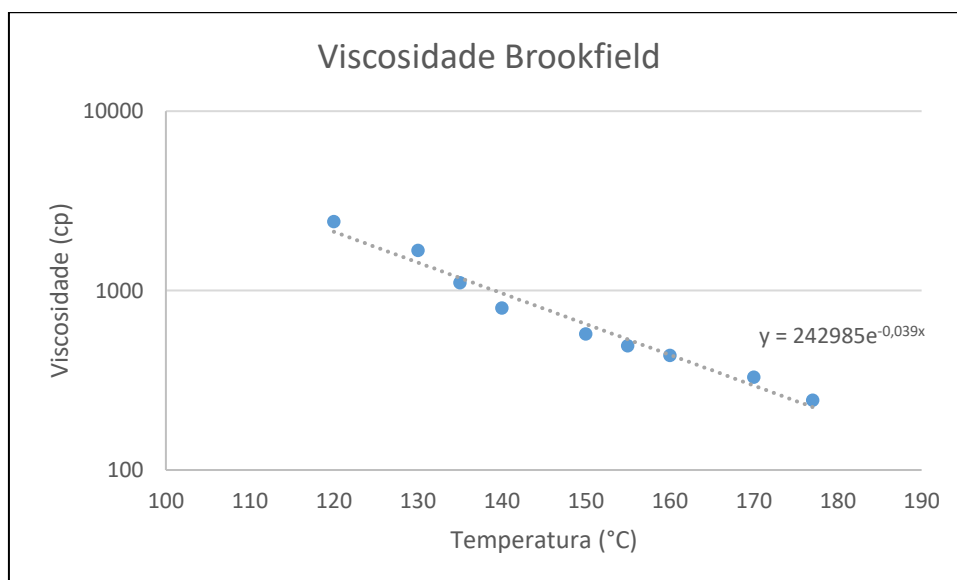


Figura 4-3 Comportamento viscoso do ligante envelhecido em elevadas temperaturas

Como não foram encontradas informações prévias sobre o cimento asfáltico contido no fresado (tipo de CAP, idade, etc.) não foi possível avaliar atendimento a limites normatizados para um tipo específico de ligante envelhecido. Em relação ao ligante novo a ser utilizado na mistura, verifica-se que ele apresenta viscosidade consideravelmente inferior ao ligante envelhecido, sendo aquele o responsável pela redução da viscosidade na mistura final reciclada (SILVA, 2011).

4.5 Correção no teor de ligante aferido

Após a caracterização dos componentes extraídos do fresado, foram dosadas amostras de controle a fim de se obter fatores de calibração para o método de extração por ignição em mufla e para o de centrifugação em Rotarex. A granulometria das amostras foi adotada como a mesma verificada no agregado extraído do asfalto pelo método da mufla, tanto para os gomos retidos na peneira n° 4 (gráudos) quanto para os gomos passantes por essa (miúdos e finos). O ligante utilizado para essa finalidade foi o mesmo CAP 50/70 a utilizado nas misturas recicladas a quente e caracterizado por NUNES (2017).

A Tabela 4-7 apresenta os valores dos teores de ligante reais e dos teores aferidos após o processo de extração nas amostras em forno mufla e em rotarex (ver Apêndice A). O conjunto das amostras foi dividido segundo a granulometria utilizada em cada dosagem, conforme o apresentado nas seções 3.4.3 e 4.2.

Tabela 4-7 Fatores de calibração para teores de ligante aferidos em extração em forno mufla

Método de Extração	Granulometria	Amostra	Teor Real de Ligante (%)	Teor Aferido (%)	C_f (%)	C_f médio (%)
Mufla	> n° 4	G_M_1	5,89%	5,82%	-0,08%	-0,10%
		G_M_2	5,89%	5,79%	-0,10%	
		G_M_3	5,88%	5,80%	-0,09%	
		G_M_4	5,88%	5,76%	-0,12%	
		G_M_5	5,89%	5,77%	-0,12%	
	< n° 4	F_M_1	6,44%	6,34%	-0,10%	-0,12%
		F_M_2	6,45%	6,33%	-0,12%	
		F_M_3	6,45%	6,31%	-0,13%	
		F_M_4	6,44%	6,31%	-0,13%	
		F_M_5	6,44%	6,31%	-0,13%	
Rotarex	> n° 4	G_R_1	5,88%	6,24%	0,35%	0,32%
		G_R_2	5,88%	6,24%	0,36%	
		G_R_3	5,89%	6,19%	0,30%	
		G_R_4	5,89%	6,18%	0,29%	
		G_R_5	5,88%	6,18%	0,30%	
	< n° 4	F_R_1	6,44%	6,84%	0,40%	0,40%
		F_R_2	6,45%	6,84%	0,39%	
		F_R_3	6,45%	6,82%	0,37%	
		F_R_4	6,45%	6,88%	0,43%	
		F_R_5	6,44%	6,85%	0,41%	

Em análise, verifica-se que as amostras de CBUQ submetidas a extração em forno mufla apresentaram teor de ligante aferido inferior ao teor de ligante real incorporado à mistura. Isso significa que, mesmo considerando perdas eventuais de agregado durante a realização desses

ensaios, o método de extração em forno mufla não foi capaz de retirar por completo o ligante colocado no cimento asfáltico.

As amostras submetidas à extração por centrifugação em Rotarex apresentaram teor de ligante superior ao real incorporado à mistura. Isso é justificável pela perda excessiva de grãos durante o procedimento de extração. A fuga de grãos junto ao ligante reduziu a massa resultante da extração, criando a falsa impressão de que uma maior quantidade de ligante foi perdida.

Após as extrações, foi determinada a granulometria dos grãos restantes em cada amostra, afim de se verificar o ganho ou a perda de massa nas diferentes frações granulométricas. A Figura 4-4 e a Figura 4-5 apresentam a variação mássica total dos agregados após cada método de extração para a porção com mesma granulometria dos gomos graúdos e dos gomos miúdos + finos, respectivamente. Nos gráficos, os teores de perda ou de ganho representam a razão entre a variação de massa do agregado com a massa inicial colocada desse por fração.

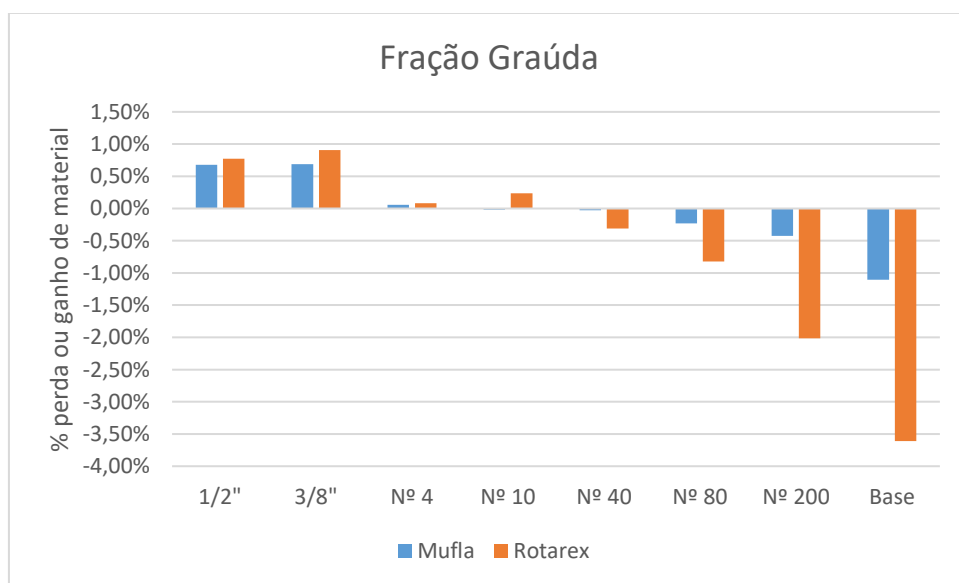


Figura 4-4 Percentagem de perda ou de ganho de agregado por método de extração, amostras representativas de gomos graúdos

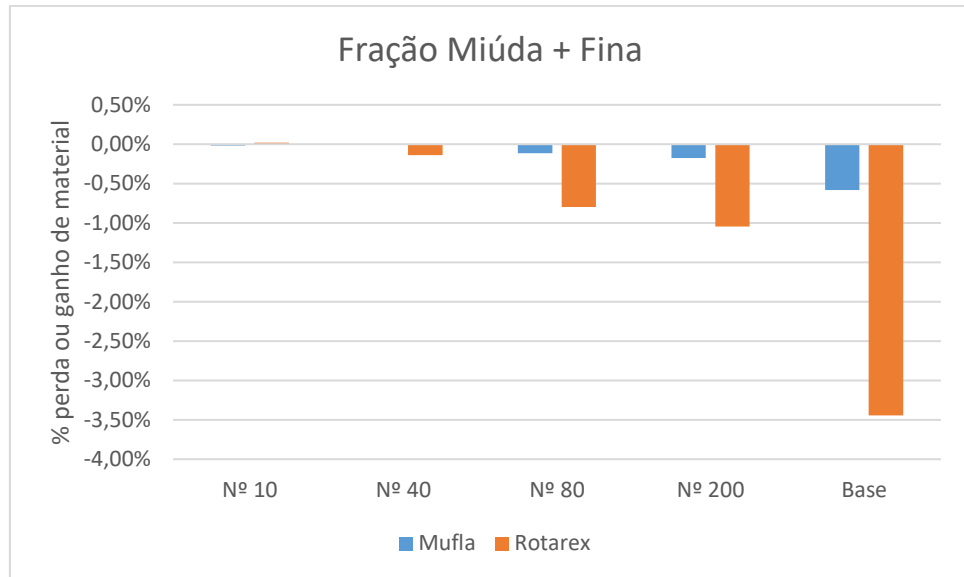


Figura 4-5 Porcentagem de perda ou de ganho de agregado por método de extração, amostras representativas de gomos graúdos

Por análise, constatou-se que:

- Como já verificado nos ensaios de extração no material fresado, o método de extração por centrifugação apresentou uma perda de agregados miúdos e finos consideravelmente superior à perda pelo método de ignição em mufla. Tal resultado se deve ao fato de que, mesmo com o completo rosqueamento da tampa do rotarex, os grãos mais finos foram “transportados” pelo ligante para fora do prato de extração alterando, dessa forma o teor final aferido;
- Os resultados provenientes do método de extração em forno mufla também apresentaram variações de massa, mesmo passando por um processo menos invasivo que o de centrifugação. Essa perda se deve aos sucessivos remeximentos nas amostras para a extração total de ligante durante aquele procedimento (ASTM D 6307);
- Na fração graúda e em ambos os métodos, houve um ganho relativo de massa, caracterizando uma falha na separação completa do ligante asfáltico desses agregados;
- Após cada extração, não foram encontrados gomos de ligante com agregados miúdos e finos, usuais nesse tipo de ensaio, mas foram verificados traços de ligante nos agregados da porção graúda de acordo com o encontrado por GONÇALVES (2014), segundo o qual parte do ligante extraído dos agregados miúdos e finos tende a ficar retida nas saliências superficiais dos agregados graúdos;
- A perda de material retido na peneira de nº 200 apresentou uma redução considerável com o aumento no número de miúdos e de finos na mistura. Não foram

encontradas justificativas na literatura para tal fenômeno, podendo estar vinculado ao manuseio das amostras.

Por fim e para a correção dos teores de ligante aferidos nas amostras de fresado coletado, foram subtraídos desses valores os fatores de calibração apresentados na Tabela 4-7, em conformidade ao procedimento descrito na ASTM D 6307-98. A Tabela 4-8 apresenta os teores de CAP corrigidos.

Tabela 4-8 Teores de ligante corrigidos por fatores de calibração, Cf

Equipamento	Granulometria	Identificação de Amostra	Teor de CAP (%)	Cf %	Teor de CAP corrigido (%)	Teor de CAP médio (%)
Rotarex	>4	1R>4	6,53%	0,32%	6,21%	5,77%
		2R>4	6,22%	0,32%	5,90%	
		3R>4	5,53%	0,32%	5,21%	
	<4	1R<4	6,74%	0,40%	6,34%	6,39%
		2R<4	7,03%	0,40%	6,63%	
		3R<4	6,60%	0,40%	6,20%	
Mufla	>4	1M>4	5,47%	-0,10%	5,57%	5,68%
		2M>4	5,41%	-0,10%	5,51%	
		3M>4	5,87%	-0,10%	5,97%	
	<4	1M<4	6,11%	-0,12%	6,23%	6,31%
		2M<4	5,98%	-0,12%	6,10%	
		3M<4	6,48%	-0,12%	6,60%	

Para verificar se os teores de CAP aferidos após correção pertencem a uma mesma população de dados, ou seja, se a média de todos os resultados é representativa para todo o conjunto, foi realizada uma análise de variância com fator duplo e repetição (*two-way ANOVA with replication*) com a utilização do recurso “Análise de Dados” do programa MS Excel para 95% de certeza ($\alpha=0,05$). Pelo método ANOVA, dois conjuntos de dados são agrupados em uma mesma população (hipótese nula) se a estatística F resultante da análise for inferior à estatística $F_{crítico}$ já tabelada. O *valor-P* é o nível descritivo do teste e deve ser menor que o nível de significância do mesmo (α) para a aceitação da hipótese nula (mesma população). Os *outputs* fornecidos pelo programa são dispostos na Tabela 4-9

Tabela 4-9 Resultado da análise de variância com fator duplo e repetição para os teores corrigidos de ligante

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F_{crítico}</i>
Método de Extração	2,03E-06	1	2,03E-06	0,18	0,68	5,32
Granulometria (>n ^o 4 ou <n ^o 4)	1,17E-04	1	0,000117	10,52	0,01	5,32
Interações	1,96E-09	1	1,96E-09	0,00	0,99	5,32

Segundo os dados apresentados na Tabela 4-9, é de fácil verificação que o fator *F* referente às diferentes granulometrias (> n^o4 e <n^o4) é superior ao crítico, o que significa que os teores aferidos nos gomos retidos na peneira n^o4 e nos gomos passante nessa fazem parte de populações distintas, com médias diferentes (hipótese nula rejeitada). O valor-P (significância) é inferior à 0,05, o que comprova a relevância da diferença da granulometrias dos gomos de RAP nos valores de teor de ligante aferidos.

Pelos dados expostos na supracitada tabela, conclui-se que nem o *Método de Extração* e nem as *Interações* (método de extração – granulometria) são significantes na análise (*F* menor que o crítico e significância superior a 0,05). Isso denota que, para uma mesma granulometria de gomos de material fresado, o teor aferido e corrigido para cada um dos métodos de extração (mufla e rotarex) pertencem a uma mesma população.

Uma vez verificada a divisão dos teores corrigidos em duas populações distintas segundo a granulometria dos gomos, foram determinadas as médias para cada uma dessas. A população correspondente aos teores de ligante nos gomos graúdos apresentou um teor médio de 5,73%, enquanto a população correspondente aos teores de ligante aferidos nos gomos miúdos apresentou teor médio de 6,35%. Concluiu-se que, após a fresagem, a porcentagem de ligante retida nos gomos miúdos é relativamente superior àquela retida nos gomos graúdos. Esse resultado já era esperado, uma vez que a fração de miúdos e de finos, por possuir uma superfície específica maior que a da fração graúda, acumula a maior porcentagem de CAP na mistura.

Como para esse estudo não foram realizadas extrações de ligante em amostragens não fracionadas de fresado (sem a divisão de grãos retidos e passantes na peneira n^o4), o teor de ligante determinado para o RAP foi obtido por uma média ponderada entre a porcentagem de gomos miúdos e de graúdos no fresado (tópico 4.1) e seus respectivos teores médios corrigidos (seção 4.5). O resultado de tal ponderação é apresentado na Tabela 4-10. O teor de ligante

encontrado para RAP como um todo foi de 6,20%, sendo esse utilizado para a dosagem das misturas asfálticas recicladas em laboratório.

Tabela 4-10 Teor de ligante total aferido para o fresado coletado

Granulometria do Gomo	Porcentagem retida acumulada (%)	Teor médio CAP (%)	Teor Real (%)
Graúdo	36,11%	5,73%	6,20%
Miúdo	63,89%	6,35%	

4.6 Dosagem Marshall

Como apresentado no tópico 3.7.1 e considerando a granulometria do agregado não “virgem” obtida após extração em forno mufla (tópico 4.3), foi necessária a correção da curva granulométrica do agregado em relação à faixa central da curva C, com adição dos agregados novos. As porcentagens entre os agregados são apresentadas na Tabela 4-11, na qual os agregados novos são divididos conforme suas frações granulometria.

Tabela 4-11 Porcentagem entre agregados componentes da mistura reciclada

Tipo de Agregado	% entre agregados
Extraído do Fresado	38,74
Retido nº 1/2"	9,80
Retido nº 3/8"	9,44
Retido nº 4	18,77
Retido nº 8	9,23
Retido nº 10	2,85
Retido nº 40	6,59
Retido nº 80	1,68
Retido nº 200	0,00
Passante nº 200	2,91
Total	100,00

Segundo a Tabela 4-11 a taxa de reciclagem de agregados (razão entre a massa de agregados extraídos e massa total dos agregados) foi de 38,74%.

Após a correção, foram determinados todos os *inputs* necessários para a utilização das equações (9) e (10), segundo aproximação do Asphalt Institute (BERNUCCI, 2006). A Tabela 4-12 apresenta os referidos valores sendo que a absorção geral adotada para o conjunto de

agregados foi a média ponderada das absorções aferidas no tópico 4.3 pelas porcentagens entre os agregados na mistura final (Tabela 4-11).

Tabela 4-12 Parâmetros de entrada para a determinação da porcentagem final de ligante novo na mistura reciclada

Parâmetro	Valor
a (%)	56,53
b (%)	37,47
c (%)	6,00
K	0,18
F (%)	0,70
r (%)	61,26
P_{lf} (%)	6,20

O resultado dos cálculos (*output*) foi o teor de 5,44% de ligante (novo + envelhecido) na mistura reciclada com 3,02% de ligante novo a ser incorporado (RE). Portanto, foram dosados três corpos de prova, com 1.200g, para cada um dos teores de ligante novo de RE - 1,00%, RE - 0,50%, RE, RE + 0,50% e RE + 1,00%, resultando em 15 corpos de prova no total. Após a mensuração das propriedades físicas e da estabilidade marshall média para cada teor, verificou-se, perante a não definição de um padrão gráfico para estabilidade marshall e para a massa específica, a necessidade de realização de novas misturas com os teores RE + 1,50%, RE + 2,00% e RE + 2,50%.

A Tabela 4-13 apresenta os valores médios dos índices físicos e da estabilidade obtidos para os CP's dosados com os diferentes teores de ligante novo (ver Apêndice B e Apêndice C).

Tabela 4-13 Valores dos índices físicos e de estabilidade marshall para os teores ensaiados

	RE-1	RE-0,5	RE	RE+0,5	RE+1	RE+1,5	RE+2	RE+2,5
Teor Total de Ligante (%)	4,47	4,96	5,44	5,93	6,42	6,90	7,39	7,88
Teor Ligante Novo (%)	2,02	2,52	3,02	3,52	4,02	4,52	5,02	5,52
Densidade Aparente (g/cm ³)	2,22	2,20	2,19	2,22	2,25	2,32	2,35	2,33
DMT (g/cm ³)	2,50	2,48	2,46	2,44	2,42	2,41	2,39	2,37
Vv (%)	10,96	11,06	10,84	9,19	7,09	3,50	1,72	1,72
VAM (%)	20,31	21,47	22,31	21,97	21,25	18,67	18,20	19,21
RBV (%)	46,00	48,47	51,43	58,15	66,65	81,23	90,52	91,04
Estabilidade (kN)	8,27	8,03	8,09	9,29	9,30	11,10	9,96	8,59

Os dados apresentados na Tabela 4-13 foram dispostos graficamente em função do teor de ligante novo incorporado na mistura (Figura 4-6, Figura 4-7, Figura 4-8 e Figura 4-9). Em cada um dos gráficos, está representada uma linha de tendência que aproxima o comportamento

dos índices físicos e da estabilidade em função daqueles valores. A Tabela 4-14 apresenta os valores limites para a aceitação da mistura asfáltica destinada à capa de uma camada de rolamento segundo DNIT 031/2006.

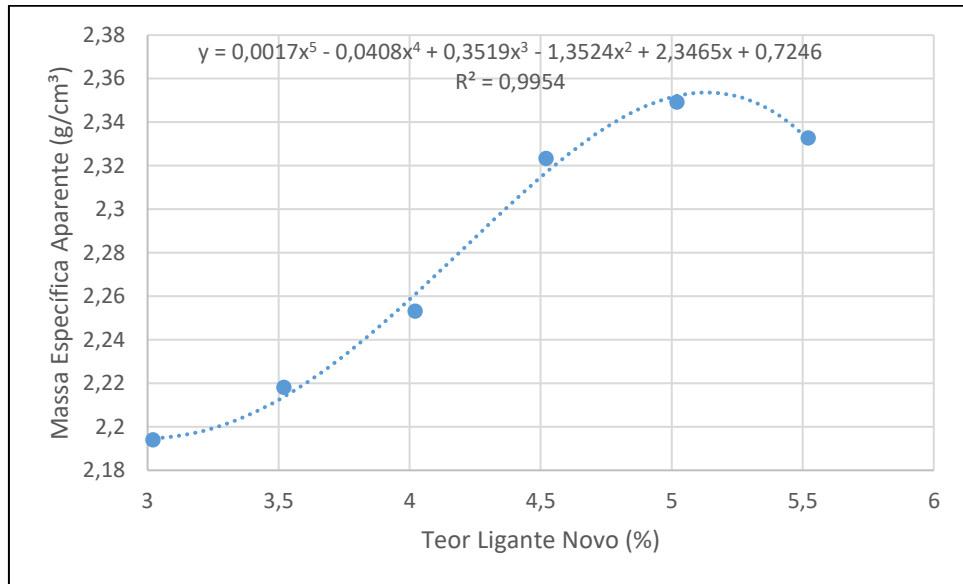


Figura 4-6 Curva de tendência para a massa específica aparente verificada nos corpos de prova

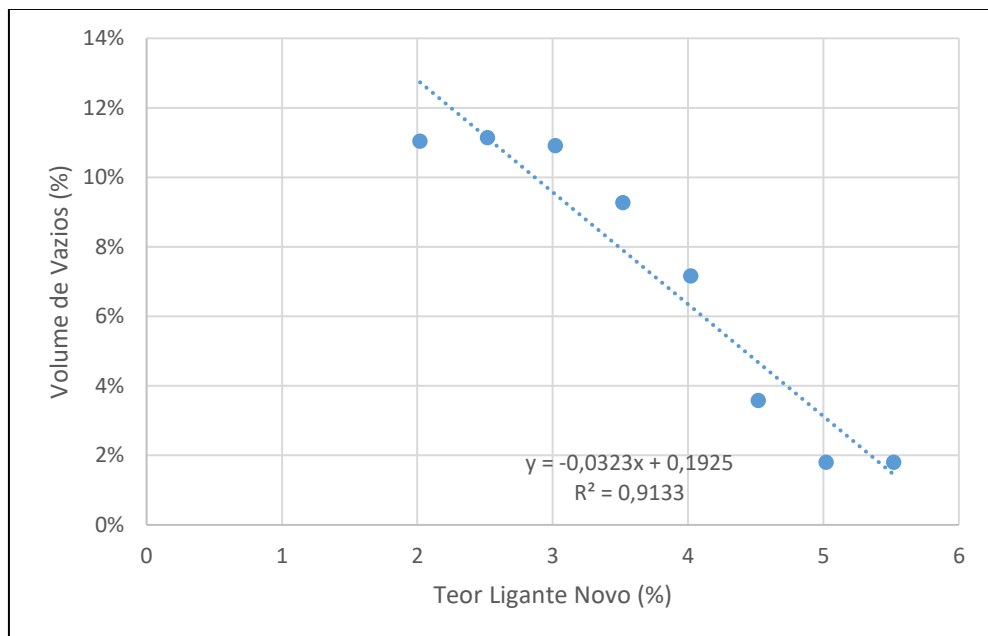


Figura 4-7 Curva de tendência para o volume de vazios verificado nos corpos de prova

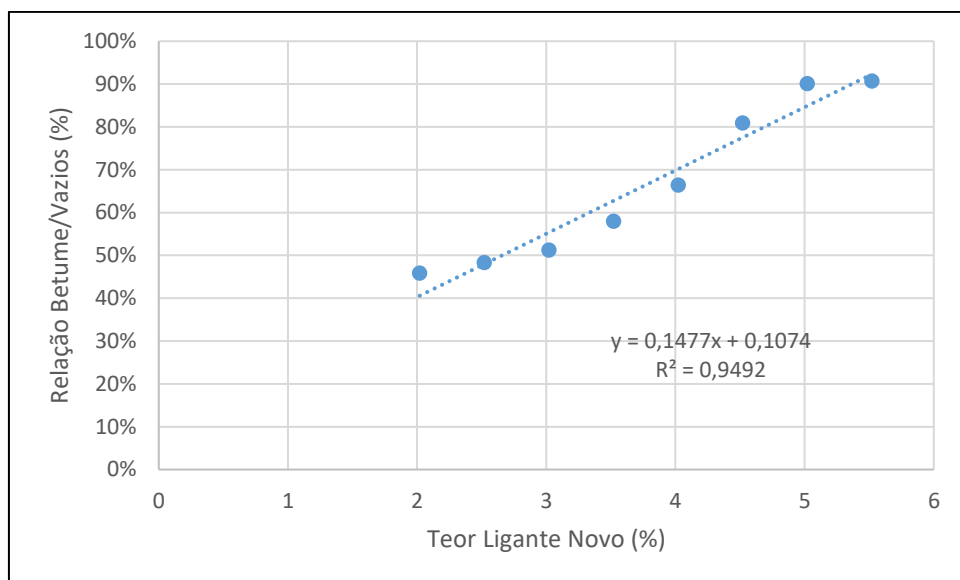


Figura 4-8 Curva de tendência para a relação betume/vazio verificada nos corpos de prova

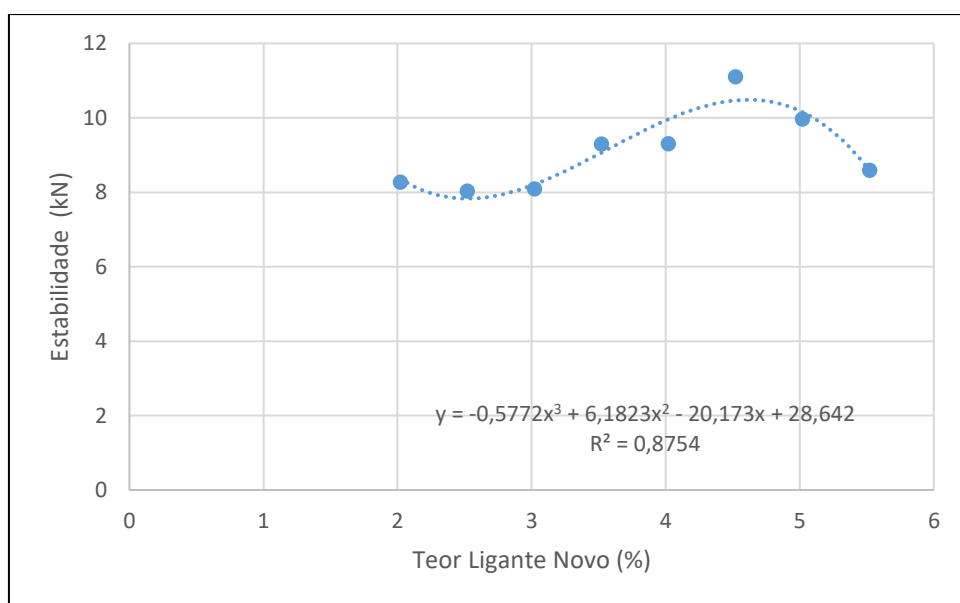


Figura 4-9 Curva de tendência para os valores de estabilidade aferidos nos corpos de prova

Tabela 4-14 Limites normalizados para os índices físicos e para a estabilidade de misturas destinadas a camada de rolamento (DNIT 031/2006)

Características	Método de Ensaio	Camada de Rolamento
Porcentagem de Vazios (%)	DNER-ME 043	3-5
Relação Betumes/Vazios (%)	DNER-ME 043	75-82
Estabilidade Mínima, 75 golpes (kgf)	DNER-ME 043	500
Vazios do Agregado Mineral, mínimo ½'' (%)	DNER-ME 043	16

Em avaliação dos gráficos e dos limites normatizados, a Tabela 4-15 apresenta o teor ideal de ligante novo a ser incorporado na mistura e os índices físicos a ele associados segundo as linhas de tendência gráficas.

Tabela 4-15 Teor ideal de ligante constituinte da mistura asfáltica usinada a quente

Teor de Ligante Novo(%)	4,52
Teor Total de Ligante (%)	6,90
Estabilidade (kN)	10,47
Porcentagem de Vazios(%)	4,65
Massa Especifica (g/cm ³)	2,37
RBV (%)	77,50
VAM (%)	18,67

Com esses parâmetros, foram determinadas a taxa de reciclagem de betume (razão ligante envelhecido/ligante total e massa) e a taxa de geral (razão material envelhecido/ material novo) para a mistura de teor ideal (GONÇALVES, 2006). Essas taxas são dispostas, juntamente à taxa de reciclagem dos agregados (Tabela 4-11), na Tabela 4-16.

Tabela 4-16 Taxas de reciclagem para o teor ideal de ligante

Componente	Taxa de Reciclagem (%)
Agregado Envelhecido	38,74
Ligante Envelhecido	34,49
Material Envelhecido	38,45

Considerando a terminologia aplicada pela AASHTO (2012) e por BROSSEAUD (2011) a taxa de reciclagem obtida é considerada forte (> 25%) mesmo estando um pouco abaixo das taxas de reciclagem fortes usualmente empregadas na União Europeia (40-60%) com a utilização de agentes rejuvenescedores e modificadores poliméricos para os ligantes. Os valores mais usuais de taxa de reciclagem empregados nas usinas da França e dos Estados Unidos são de 10% e 12% respectivamente (BROSSEAUD, 2011 e FHWA, 2011). Não foram encontrados dados de taxas de reciclagem usuais em usinas brasileiras.

5 Conclusões e Recomendações

5.1 Conclusões

A crise do petróleo na década de 70 foi um fator determinante para a busca de maneiras mais econômicas e sustentáveis para cadeias produtivas baseadas nessa matéria prima. Com a fabricação de pavimentos asfálticos não foi diferente. O aumento no preço do barril impulsionou a busca de substitutos para diminuir o teor de ligantes asfálticos incorporados nas misturas. Uma das soluções encontradas foi a utilização de gomos de asfalto obtidos da fresagem de pavimentos já envelhecidos (RAP, do inglês *Reclaimed Asphalt Pavement*).

A prática de reciclagem em camadas de rolamento teve um desenvolvimento mais lento desde então. As misturas asfálticas recicladas usualmente dosadas para essa finalidade apresentam taxas de reciclagem consideradas fracas ou médias ($< 15\%$), sendo que, no Brasil, ainda falta uma normativa para regularizar a fabricação daquelas. No país, o fresado é usualmente utilizado como agregado graúdo para a composição de bases, sendo que o ligante contido não desempenha sua função original. No DF, boa parte do material fresado é descartado ou armazenado em pátios rodoviários onde são expostos a fontes de contaminação, que tornam sua reciclagem inviável.

Com o objetivo de se caracterizar o material fresado e de se avaliar a estabilidade de misturas asfálticas dosadas com esse, foram coletadas amostras de fresado extraído no processo de construção do trevo de triagem norte, Brasília-DF.

A avaliação iniciou-se com o processo de secagem e de peneiramento dos gomos de fresado, pelo qual foi verificado a ausência de gomos excessivamente graúdos ($\geq 2''$), que exigiriam uma etapa adicional de rompimento dos gomos. A massa de RAP foi dividida em uma fração graúda (retida na peneira nº4) e em uma fração miúda (passante na peneira nº4) para posteriores análises. A proporção verificada entre as frações foi de 1:1,77 (graúda/miúda + finos), o que sinaliza a predominância dos gomos miúdos e finos após a fresagem.

A etapa seguinte foi a determinação do teor de ligante contido em cada uma dessas frações. O método de extração por centrifugação em rotarex e por ignição em mufla foram realizados por finalidades comparativas. Em resultado e após a fabricação de amostras de controle, verificou-se uma perda excessiva de material miúdo e fino durante o método de centrifugação, que conseqüentemente alterou para mais o valor de teor de ligante aferido. O método da mufla, em contraposição, apresentou valores de teor inferiores aos reais colocados

nas amostras, o que indicou uma extração falha. Após correções e uma análise de variância, o teor determinado para o RAP foi de 6,20%.

O ligante extraído pelo método de centrifugação foi recuperado e caracterizado, juntamente com os agregados reciclados provenientes da mufla e do próprio rotarex. Em resultados, a caracterização indicou a necessidade de se incorporar novos materiais à mistura reciclada, tanto para reduzir a viscosidade total do ligante quanto para corrigir a granulometria dos agregados, segundo a curva de dosagem C. Pela caracterização não foram verificadas diferenças significativas entre os parâmetros físicos dos agregados que passaram por processos de extração distintos.

Por fim, considerando os valores obtidos com a caracterização prévia de agregados e do CAP 50/70 virgens, foram confeccionados corpos de prova segundo método de dosagem marshall com adição de duas etapas adicionais propostas pelo *Asphalt Institute* para misturas recicladas a quente. Os primeiros quinze corpos dosados não apresentaram parâmetros físicos satisfatórios e mais nove corpos foram confeccionados.

Após novas aferições de estabilidade e de índices físicos, o teor ideal encontrado foi de 6,90% de ligante total com 4,52% de ligante novo. Todos os valores de índices físicos atenderam às normativas brasileiras e a taxa de reciclagem encontrada (38,45%) foi considerada razoável em comparação aos valores internacionais, uma vez que não foram usados modificadores e agentes rejuvenescedores na recuperação do ligante envelhecido.

5.2 Recomendações

Para pesquisas futuras com o mesmo fresado, são feitas as seguintes recomendações:

- Determinação do módulo complexo de cisalhamento para o ligante envelhecido;
- Realização de novas misturas com taxas de reciclagens mais elevadas e com a incorporação de rejuvenescedores;
- Realização de ensaios mecânicos adicionais com a dosagem ideal encontrada (tração por compressão diametral, módulo de resiliência e fadiga).

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation (2012) M-323 - *Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design*.

ÂNGULO, S. C., ZORDAN, S. E, JOHN, V. M. (2001). Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem de Resíduos na Construção Civil. Artigo Científico. PCC – Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica. São Paulo, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 9935 – Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro, 2011.

_____.NBR NM 248 – Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____.NBR 5734/1989 – Agregados – Peneiras para ensaio com telas de tecido metálico. Rio de Janeiro, 1989.

ALVES, L. R. R. (2011). Ligantes betuminosos e a normalização europeia. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.

ÁREA TERRITORIAL BRASILEIRA. IBGE. Disponível em: https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/default_territ_area.shtm. Acesso em: 1º de nov. 2017.

ASTM C 1252 (2003). Standard Test Method for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading).

ASTM D92-02b (1989), Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester, ASTM International, West Conshohocken.

ASTM D 4402 (1995). Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer. American Society for Testing and Materials.

ASTM D-2872 (1997). Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). American Society for Testing and Materials.

ASTM D 6307 (1998). Standard Test Method for Asphalt Content of Hot – Mix Asphalt by Ignition Method.

ASTM D 7175 (2005). Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using Dynamic Shear Rheometer.

ASTM E102 / E102M-93(2016), Standard Test Method for Saybolt Furol Viscosity of Bituminous Materials at High Temperatures.

BAPTISTA, A. M.C. (2006). Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central. Dissertação de Doutorado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 339p.

BERNUCCI, L., MOTTA, L., CERATTI, J., & SOARES, J. (2006). Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2006. 504 f. Incluindo Bibliografia. Patrocínio Petrobrás.

BOMFIM, Valmir. Fresagem de pavimentos asfálticos – 3 ed. São Paulo: Exceção Editorial, 2007.

BROSSEAUD, Y. (2011). Reciclagem de Misturas Asfálticas: Evolução após 20 Anos e a Situação Atual na França. Proposta de Comunicação. 3º Salão de Inovação ABCR – 7º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões, Foz do Iguaçu, Paraná.

CASTRO, L. N. (2003). Reciclagem a frio “*In Situ*” com espuma asfalto. Tese de Mestrado, Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 171 p.

CHIN, C. (2009). Performance Graded Bitumen Specifications. ARRB Group, Sustainable Infrastructure Management Department, Vermont South, Austrália.

CNT: SEST: SENAT (2016). Pesquisa CNT de rodovias 2016: relatório gerencial, 20.ed. Brasília: Confederação Nacional do Transporte: Serviço Social do Transporte: Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte. 145 p.

CNT (2017). Transporte rodoviário: desempenho do setor, infraestrutura e investimentos. – Brasília: Confederação Nacional do Transporte. 67 p.

CNT (2017). Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram? – Brasília: Confederação Nacional do Transporte. 158 p.

DELLABIANCA, L. M. A. (2004). Estudo do comportamento de material fresado de revestimento asfáltico visando sua aplicação em reciclagem de pavimentos. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-020/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 110p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM DNER, Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos, Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM DNER, Glossário de Termos Técnicos Rodoviários, Rio de Janeiro, 1998.

DNER ME 138/94. Misturas betuminosas – determinação da Resistência à Tração por compressão diametral. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Método de Ensaio ME 138/94.

DNER ME 163/98. Materiais betuminosos: determinação da ductilidade. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Método de Ensaio ME 163/98.

DNER ME 004/94. Materiais betuminosos: determinação da viscosidade “Saybolt-furol” a alta temperatura. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Método de Ensaio ME

004/94.

DNER ME 131/2010. Materiais asfálticos – determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel Bola. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Método de Ensaio ME 133/94.

DNER ME 135/2010. Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Método de Ensaio - ME 135/2010.

DNER ME 133/94. Misturas betuminosas – determinação do Módulo de Resiliência. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Método de Ensaio ME 133/94.

DNER ME 035/98. Agregados: Determinação da Abrasão Los Angeles. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Método de Ensaio - ME 035/98.

DNER ME 043/95. Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Método de Ensaio ME 043/95.

DNER ME 78/94. Agregado graúdo: adesividade a ligante betuminoso. Método de Ensaio - ME 035/98.

DNER ME 081/98. Agregados: Determinação da Absorção e da Densidade do Agregado Graúdo. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Método de Ensaio - ME 081/98.

DNER ME 083/98. Agregados: análise granulométrica. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Método de Ensaio - ME 083/98.

DNER ME 086/94. Agregado: Determinação do Índice de Forma. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Método de Ensaio - ME 086/94.

DNER ME 136/2010. Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Método de Ensaio - ME 136/2010.

DNER ME 148/94. Material betuminoso: Determinação dos pontos de fulgor e de combustão (vaso aberto Cleveland). Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Método de Ensaio - ME 148/94.

DNER ME 193/96. Materiais betuminosos líquidos e semi-sólidos: Determinação da densidade e da massa específica. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Método de Ensaio - ME 193/96.

DNER ME 194/98. Agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Método de Ensaio - ME 194/98.

DNIT ME 003/99. Material asfáltico: determinação da penetração. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Método de Ensaio ME 155/2010.

DNIT ME 031/2006. Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Método de Ensaio ME 031/2006.

DNIT ME 003/99. Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Método de Ensaio ME 155/2010.

FHWA – Federal Highway Administration (2011). *Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice*. FHWA-HRT-11-021. Turner-Fairbank Highway Research Center, USA.

FONSECA, J. F. et al. (2014). O estado da arte sobre uso de reciclado de pavimento asfáltico na pavimentação no Brasil e no mundo. Congresso de Pesquisas e Ensino em Transportes, Curitiba, PR.

GONÇALVES, B. C. S (2014). Análise de Dispersão de Resultados do Controle do Teor de Ligante de Misturas Asfálticas com Agregados de Baixa Absorção a Partir do Rotarex. Trabalho

de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil, 98p.

HAN, J. et al (2011). *Laboratory evaluation of characteristics of recycled asphalt pavement in Kansas*. Report No K-Tran: KU-09-2, Civil, Environmental & Architectural Engineering Department, University of Kansas, Lawrence, KS, 126 p.

KODJA, C. C. (2009). Crise econômica ao final do século XX – 1970 a 2000: Advento de uma nova organização social e financeira. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em História Econômica do Departamento de História da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, SP, 259 p.

SILVA, J.P.S. (2011). Avaliação dos efeitos de produtos rejuvenescedores em misturas asfálticas. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-067/2011, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 145 p.

SINICESP – Sindicato da Indústria da Construção Pesada do Estado de São Paulo, 2015. Determinação do Teor de Ligante em Misturas Asfálticas a Quente através do Forno de Ignição por Convecção. Disponível em: <http://www.sinicesp.org.br/materias/2015/bt07a.htm>. Acessado em: 20 de junho de 2018.

MEDINA, J. (2000). Mecânica dos Pavimentos. Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ. 380p.

MORILHA JUNIOR, Armando (2004). Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, SC, 165 p.

NUNES, L.C. (2017). Fadiga de Misturas Asfálticas Descontínuas com Asfalto-Borracha de 4ª Geração. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-281/17, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 142p.

PINTO, C. S (2006). Curso Básico de Mecânica dos Solos, 5 ed. Rio de Janeiro, Rj, pp. 1-340.

ROSSATO, F. P., PEREIRA, D. S., SPECHT, L. P., PINHEIRO, R. J. B., CERVO, T. C., ECHEVERRIA, J. A., MATTOS, R. F.. Análise de dispersão de resultados do controle de teor de ligante de misturas asfálticas a partir do Rotarex. 43º RAPv e 17º ENACOR. Maceió, AL, 2014. 12p.

SEVERINO, R.R.F. et al (2015). Análise de estabilidade Marshall em misturas asfálticas com adição de resíduo oleoso da indústria petrolífera. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC. CE.

SILVA, H. N. (2009). Caracterização Viscoelástica Linear de Misturas Asfálticas: Operacionalização Computacional e Análise pelo Método dos Elementos Finitos. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 210 fl.

TASHMAN, L. (2003). *Microstructural viscoplastic continuum model for asphalt concrete*. Dissertation Submitted to the Office of Graduation Studies of Texas A&M University, TX, 165 p.

WU, Y., PARKER, F., KANDHAL, P. S (2013). Aggregate Toughness/Abrasion Resistance and Durability/Soundness Tests Related to Asphalt Concrete Performance in Pavements. Paper No 98-0213, National Cooperative Highway Research Program, US.

YOUNG, F. D. *A Brief Introduction to Fluid Mechanics*. 5 ed. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2011.

APÊNDICES

A. Dados para Amostras de Controle

A Tabela A-0-1, a Tabela A-0-2, a Tabela A-0-3 e a Tabela A-0-4 apresentam os dados para dosagem e definição de teor aferido de ligante para as vinte amostras confeccionadas para avaliação de desempenho dos métodos extrativos.

Tabela A-0-1 Dados para amostra de controle para forno mufla, gomos graúdos

Amostr a	Peneira s	Massa de Agregad o Colocad a Seca (g)	Massa de Ligante Colocad a (g)	Teor Real de Ligant e (%)	Massa da Mistur a +Tara (g)	Mass a Total após Mufla +Tara (g)	Teor Aferid o (%)	Granulometr ia Agregado após Mufla (g)	Δ agregado s (g)	% agregad o	Δ ligant e (%)
G_M_1	1/2"	14,24	70,91	5,89%	1211,45	1141,56	5,82%	14,47	-0,23	0,08%	-0,08%
	3/8"	54,45						54,73	-0,28		
	Nº4	262,81						262,98	-0,17		
	Nº10	264,14						263,98	0,16		
	Nº40	256,25						256,07	0,18		
	Nº80	115,51						115,11	0,40		
	Nº200	101,64						101,35	0,29		
	Base	62,00						61,35	0,65		
G_M_2	1/2"	14,87	70,80	5,89%	1210,75	1141,22	5,79%	14,91	-0,04	0,06%	-0,10%
	3/8"	54,57						54,76	-0,19		
	Nº4	262,69						262,8	-0,11		
	Nº10	263,28						263,23	0,05		
	Nº40	256,20						256,20	0,00		
	Nº80	115,48						115,12	0,36		
	Nº200	101,65						101,26	0,39		
	Base	62,00						61,69	0,31		
G_M_3	1/2"	14,54	70,66	5,88%	1209,65	1140,09	5,80%	14,61	-0,07	0,06%	-0,09%
	3/8"	54,57						54,61	-0,04		
	Nº4	262,59						262,68	-0,09		
	Nº10	263,31						263,38	-0,07		
	Nº40	256,17						256,14	0,03		
	Nº80	115,48						115,23	0,25		
	Nº200	101,64						101,26	0,38		
	Base	61,97						61,57	0,40		
G_M_4	1/2"	14,62	70,73	5,88%	1211,54	1142,28	5,76%	14,81	-0,19	0,10%	-0,12%
	3/8"	55,01						55,28	-0,27		
	Nº4	262,66						262,83	-0,17		

Amostr a	Peneira s	Massa de Agregad o Colocad a Seca (g)	Massa de Ligante Colocad a (g)	Teor Real de Ligant e (%)	Massa da Mistur a +Tara (g)	Mass a Total após Mufla +Tara (g)	Teor Aferid o (%)	Granulometr ia Agregado após Mufla (g)	Δ agregado s (g)	% agregad o	Δ ligant e (%)
	Nº10	263,49						263,58	-0,09		
	Nº40	256,82						256,62	0,20		
	Nº80	115,50						115,25	0,25		
	Nº200	101,64						101,15	0,49		
	Base	62,01						61,05	0,96		
G_M_5	1/2"	14,45						14,56	-0,11		
	3/8"	54,48						55,26	-0,78		
	Nº4	262,87						263,04	-0,17		
	Nº10	263,33	70,82	5,89%	1210,85	1141,53	5,77%	263,19	0,14	0,07%	-0,12%
	Nº40	256,18						256,21	-0,03		
	Nº80	115,55						115,45	0,10		
	Nº200	101,63						101,01	0,62		
	Base	61,99						60,87	1,12		

Tabela A-0-2 Dados para amostra de controle para forno mufla, gomos miúdos e finos

Amostr a	Peneira s	Massa de Agregad o Colocad a Seca (g)	Massa de Ligante Colocad a (g)	% real de ligant e	Massa da Mistur a + Tara (g)	Mass a Total após Mufla + Tara (g)	Teor Aferid o (%)	Granulometr ia Agregado após Mufla (g)	Δ agregado s (g)	% agregad o	Δ ligant e (%)
F_M_1	Nº10	294,98						294,85	0,13		
	Nº40	399,22						399,12	0,10		
	Nº80	192,13	77,37	6,44%	1210,49	1134,41	6,34%	192,01	0,12	0,08%	-0,10%
	Nº200	134,21						134,1	0,11		
	Base	102,26						101,78	0,48		
F_M_2	Nº10	294,97						295,01	-0,04		
	Nº40	399,19						399,18	0,01		
	Nº80	192,13	77,48	6,45%	1211,05	1135,01	6,33%	191,94	0,19	0,12%	-0,12%
	Nº200	134,23						133,89	0,34		
	Base	102,27						101,32	0,95		
F_M_3	Nº10	294,97						294,23	0,75		
	Nº40	399,19						399,56	-0,34		
	Nº80	192,13	77,50	6,45%	1210,97	1135,10	6,31%	192,11	0,03	0,09%	-0,13%
	Nº200	134,23						134,02	0,19		
	Base	102,27						101,86	0,40		
F_M_4	Nº10	294,97						295,55	-0,59		
	Nº40	399,19	77,36	6,44%	1209,87	1134,15	6,31%	398,82	0,38	0,08%	-0,13%
	Nº80	192,13						191,49	0,64		
	Nº200	134,23						134,06	0,15		

Amostr a	Peneira s	Massa de Agregad o Colocad a Seca (g)	Massa de Ligante Colocad a (g)	% real de ligant e	Massa da Mistur a + Tara (g)	Mass a Total após Mufla + Tara (g)	Teor Aferid o (%)	Granulometr ia Agregado após Mufla (g)	Δ agregado s (g)	% agregad o	Δ ligant e (%)
	Base	102,27						101,93	0,33		
	Nº10	294,97						294,98	-0,01		
	Nº40	399,19						399,27	-0,09		
F_M_5	Nº80	192,13	77,38	6,44%	1210,98	1135,1 5	6,31%	191,99	0,13	0,10%	-0,13%
	Nº200	134,23						133,84	0,38		
	Base	102,27						101,45	0,81		

Tabela A-0-3 Dados para amostra de controle para centrifugação em rotarex, gomos graúdos

Amostr a	Peneira s	Massa de Agrega do Colocad a Seca(g)	Massa de Ligante Colocad a (g)	% real de ligant e	Massa Coloca da Rotarex (g)	Massa Total após Rotare x (g)	Teor Aparen te (%)	Massa de Agrega do após Extraçã o (g)	Δ agregad o (g)	Δ agregado/mist ura final (%)	Δ ligant e (%)
	1/2"	12,30						12,43	-0,13		
	3/8"	45,26						45,91	-0,65		
	Nº4	218,85						218,98	-0,13		
G_R_1	Nº10	219,51	59,01	5,88%	1001,93	939,45	6,24%	219,34	0,17	0,39%	0,35%
	Nº40	213,45						213,26	0,19		
	Nº80	96,22						94,62	1,60		
	Nº200	84,71						83,46	1,25		
	Base	51,66						50,09	1,57		
	1/2"	11,96						12,1	-0,14		
	3/8"	45,55						45,89	-0,34		
	Nº4	218,78						219,43	-0,65		
G_R_2	Nº10	219,45	58,93	5,88%	1002,05	939,55	6,24%	220,55	-1,10	0,38%	0,36%
	Nº40	213,45						212,25	1,20		
	Nº80	96,21						94,87	1,34		
	Nº200	84,69						83,45	1,24		
	Base	51,66						49,37	2,29		
	1/2"	11,84						11,87	-0,03		
	3/8"	45,46						45,65	-0,19		
	Nº4	218,81						219,03	-0,22		
G_R_3	Nº10	219,41	58,99	5,89%	1001,87	939,89	6,19%	219,38	0,03	0,36%	0,30%
	Nº40	213,45						212,59	0,86		
	Nº80	96,25						95,79	0,46		
	Nº200	84,68						83,08	1,60		
	Base	51,64						50,56	1,08		

Amostr a	Peneir as	Massa de Agrega do Coloca da Seca(g)	Massa de Ligante Coloca da (g)	% real de ligant e	Massa Coloca da Rotarex (g)	Massa Total após Rotare x (g)	Teor Aparen te (%)	Massa de Agrega do após Extraçã o (g)	Δ agregad o (g)	Δ agregado/mist ura final (%)	Δ ligant e (%)
G_R_4	1/2"	11,96	59,03	5,89%	1001,76	939,88	6,18%	12,21	-0,25	0,39%	0,29%
	3/8"	45,38						45,68	-0,30		
	Nº4	218,87						218,58	0,29		
	Nº10	219,40						220,00	-0,60		
	Nº40	213,45						212,85	0,60		
	Nº80	96,26						95,82	0,44		
	Nº200	84,69						82,70	1,99		
	Base	51,65						49,93	1,72		
	1/2"	11,88						11,98	-0,10		
	3/8"	45,38						45,76	-0,38		
G_R_5	Nº4	218,80	58,89	5,88%	1001,88	939,97	6,18%	218,99	-0,19	0,39%	0,30%
	Nº10	219,40						220,52	-1,12		
	Nº40	213,44						212,98	0,46		
	Nº80	96,21						96,1	0,11		
	Nº200	84,69						82,23	2,46		
	Base	51,64						48,98	2,66		

Tabela A-0-4 Dados para amostra de controle para forno mufla, gomos miúdos e finos

Amostr a	Peneir as	Massa de Agrega do Coloca da Seca(g)	Massa de Ligant e Coloca da (g)	% real de ligant e	Massa Coloca da Rotare x (g)	Massa Total após Rotare x (g)	Teor Aparen te (%)	Massa de Agrega do após Extraçã o (g)	Δ agrega do (g)	Δ agregado/mi stura final (%)	Δ ligant e (%)
F_R_1	Nº10	245,81	64,49	6,44%	1001,02	932,58	6,84%	245,98	-0,17	0,59%	0,40%
	Nº40	332,65						332,51	0,14		
	Nº80	160,12						158,56	1,56		
	Nº200	111,84						111,05	0,79		
	Base	85,22						81,63	3,59		
F_R_2	Nº10	245,81	64,58	6,45%	1001,32	932,86	6,84%	246,07	-0,26	0,53%	0,39%
	Nº40	332,65						331,92	0,73		
	Nº80	160,10						159,56	0,54		
	Nº200	111,85						110,03	1,82		
	Base	85,22						82,75	2,47		
F_R_3	Nº10	245,87	64,56	6,45%	1001,25	932,98	6,82%	245,45	0,42	0,57%	0,37%
	Nº40	332,68						332,78	-0,10		

Amostra	Peneiras	Massa de Agregado Colocada Seca(g)	Massa de Ligante Colocada (g)	% real de ligante	Massa Colocada Rotarex (g)	Massa Total após Rotarex (g)	Teor Aparente (%)	Massa de Agregado após Extração (g)	Δ agregado (g)	Δ agregado/mistura final (%)	Δ ligante (%)
	Nº 80	160,10						157,97	2,13		
	Nº 200	111,86						110,65	1,21		
	Base	85,22						83,18	2,04		
F_R_4	Nº 10	245,86						245,86	0,00		
	Nº 40	332,69						331,88	0,81		
	Nº 80	160,16	64,65	6,45%	1001,45	932,51	6,88%	158,76	1,40	0,55%	0,43%
	Nº 200	111,87						110,85	1,02		
	Base	85,22						82,89	2,33		
	Nº 10	245,83						246,07	-0,24		
F_R_5	Nº 40	332,64						331,87	0,77		
	Nº 80	160,10	64,51	6,44%	1001,16	932,56	6,85%	159,33	0,77	0,66%	0,41%
	Nº 200	111,85						110,82	1,03		
	Base	85,22						80,98	4,24		
	Nº 10	245,83						246,07	-0,24		

B. Medidas Físicas dos Corpos de Prova

A Tabela B-0-5 apresentam os parâmetros físicos correspondentes a cada um dos 24 corpos de prova moldados.

Tabela B-0-5 Parâmetros físicos aferidos para cada CP

CP	Teor Novo(%)	Teor velho (%)	Teor Total (%)	Altura Média (mm)	Diâmetro Médio (mm)	Ms (g)	Msubmer (g)	Volume por Submersão (cm ³)
N1	3,02	2,59	5,61	69,53	102,85	1190,7	647,8	542,9
N2	3,02	2,59	5,61	71,24	101,90	1188,8	646,2	542,6
N3	3,02	2,59	5,61	66,79	102,19	1177,7	646,5	531,2
N4	3,52	2,63	6,15	68,16	102,55	1190,2	636,8	553,4
N5	3,52	2,63	6,15	65,71	102,78	1189,3	659,7	529,6
N6	3,52	2,63	6,15	63,75	102,07	1184,2	664,2	520,0
N7	4,02	2,67	6,69	58,95	102,83	1090,3	610,5	479,8
N8	4,02	2,67	6,69	64,76	102,01	1173	655,5	517,5
N9	4,02	2,67	6,69	64,90	102,37	1182,3	654,5	527,8
N10	2,02	2,54	4,56	68,87	102,04	1194,9	647,4	547,5
N11	2,02	2,54	4,56	66,48	102,44	1196,8	664,3	532,5
N12	2,02	2,54	4,56	66,50	101,87	1204,2	671,4	532,8
N13	2,52	2,57	5,09	67,85	101,79	1198,6	656,6	542,0
N14	2,52	2,57	5,09	66,49	102,70	1193,1	660,1	533,0
N15	2,52	2,57	5,09	68,27	102,51	1193,2	646,7	546,5
N16	4,52	2,38	6,90	63,95	102,42	1190,4	675,0	515,4
N17	4,52	2,38	6,90	63,11	102,52	1193,4	682,0	511,4
N18	4,52	2,38	6,90	63,94	102,00	1208,2	693,4	514,8
N19	5,02	2,37	7,39	62,70	102,34	1184,9	677,5	507,4
N20	5,02	2,37	7,39	60,43	101,92	1180,9	684,7	496,2
N21	5,02	2,37	7,39	60,09	102,60	1175,8	676,1	499,7
N22	5,52	2,36	7,88	65,93	102,24	1191,4	675,9	515,5
N23	5,52	2,36	7,88	66,38	101,47	1181,8	673,1	508,7
N24	5,52	2,36	7,88	64,22	102,53	1169,4	678,9	490,5

C. Estabilidade e Fluência Marshall

A Tabela C-0-6, a Tabela C-0-7, a Tabela C-0-8 e a Tabela C-0-9 apresentaram os dados de estabilidade e de fluência medidos ao longo do ensaio de compressão marshall. Os dados de estabilidade foram corrigidos posteriormente segundo exigências da norma DNER-ME 043/95.

Tabela C-0-6 Estabilidade corrigida e fluência para os teores de 2,02% e 2,52% de ligante novo

Teor 2,02						Teor 2,52					
N10		N11		N12		N13		N14		N15	
Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)
0	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,61	9,16	1,17	7,61	1,28	9,31	1,16	7,35	1,00	7,26	1,96	11,26
1,98	10,00	1,47	8,43	1,78	10,09	1,61	8,17	1,30	8,11	2,51	11,82
2,61	10,83	1,88	9,24	2,79	10,88	2,27	8,97	1,76	8,95	6,33	12,40
4,19	11,61	2,60	10,04	4,57	11,62	3,19	9,77	2,50	9,78	7,72	13,18
7,06	12,32	4,26	10,76	7,06	12,30	5,46	10,51	4,42	10,55	7,37	14,05
7,44	13,05	7,82	11,38	7,57	13,02	8,54	11,21	6,32	11,31	6,57	14,93
7,92	13,84	8,98	12,07	7,92	13,83	8,90	12,01	7,17	12,12	6,50	15,81
7,74	14,69	8,94	12,87	7,92	14,66	8,20	12,82	7,44	12,94	5,55	16,70
7,23	15,52	8,90	13,72	7,42	15,50	7,84	13,66	7,48	13,77		
6,51	16,38	8,47	14,57	6,60	16,37	6,96	14,51	7,25	14,59		
5,56	17,26	8,37	15,43	5,86	17,25	5,98	15,38	6,85	15,44		
5,01	17,75	8,20	16,30	5,32	18,12	5,33	15,90	6,43	16,29		
		7,81	17,18	5,30	18,17			6,20	16,76		
		7,23	18,05								
		6,55	18,91								
		6,13	19,43								

Tabela C-0-7 Estabilidade corrigida e fluência para os teores de 3,02% e 3,52% de ligante novo

Teor 3,02						Teor 3,52					
N1		N2		N3		N4		N5		N6	
Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,12	1,16	1,09	9,58	1,07	8,94	0,92	6,56	1,69	1,90	1,61	10,18
1,60	1,97	1,43	10,39	1,31	9,75	1,16	7,41	2,30	2,71	2,35	11,01
2,77	2,74	2,09	11,21	2,61	10,58	1,46	8,26	3,92	3,48	3,94	11,77
4,78	3,44	4,26	11,93	3,64	11,39	2,07	9,10	6,81	4,22	6,94	12,44
6,23	4,17	6,67	12,65	4,81	12,12	3,48	9,89	9,56	4,95	9,35	13,15
6,52	5,01	7,39	13,44	6,51	12,88	5,67	10,64	10,17	5,73	9,96	13,88
6,15	5,91	8,90	14,28	8,83	13,68	7,33	11,39	9,62	6,55	9,70	14,72
5,63	6,72	8,91	15,14	8,37	14,51	7,75	12,21	8,60	7,39	9,14	15,56
5,11	7,57	7,93	16,02	7,79	15,36	7,26	13,05	7,42	8,25	8,02	16,53
4,48	8,44	7,09	16,91	6,93	16,22	6,60	13,90	6,54	9,13	6,96	17,34
3,95	9,31	6,46	17,79	6,28	17,08	5,76	14,76	5,72	10,01	5,77	18,33
3,54	10,23	6,17	18,35	5,64	17,94	5,32	15,24	4,94	10,88	5,18	18,95
3,10	10,97			5,33	18,42			4,27	11,75		

Teor 3,02						Teor 3,52					
N1		N2		N3		N4		N5		N6	
Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)
2,72	11,90							3,80	12,60		
2,41	12,78							3,53	13,12		
2,21	13,51										
1,94	14,49										
1,91	15,24										

Tabela C-0-8 Estabilidade corrigida e fluência para os teores de 4,02% e 4,52% de ligante novo

Teor 4,02						Teor 4,52					
N7		N8		N9		N16		N17		N18	
Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,41	9,32	1,01	8,12	1,09	6,98	1,37	6,55	1,42	6,79	1,35	8,52
2,26	10,11	1,54	8,92	1,41	7,80	1,76	7,41	1,92	7,58	1,96	9,32
3,91	10,87	2,24	9,73	2,04	8,61	2,28	8,22	2,39	8,39	3,06	10,10
7,51	11,52	3,26	10,44	3,04	9,40	3,09	9,01	3,35	9,17	5,65	10,82
10,32	12,22	6,11	11,16	5,47	10,11	5,22	9,71	5,84	9,87	9,16	11,49
10,37	13,05	8,50	11,89	7,75	10,84	7,51	10,43	9,38	10,51	11,19	12,22
9,56	13,91	8,99	12,68	8,54	11,63	9,44	11,19	11,19	11,24	11,93	13,02
8,52	14,78	8,20	13,63	8,50	12,47	9,90	12,02	11,47	12,04	11,72	13,85
7,48	15,66	6,84	14,51	8,02	13,32	9,36	12,88	10,89	12,89	11,02	14,71
6,49	16,54	5,75	15,39	7,14	14,19	8,34	13,77	9,93	13,76	10,19	15,58
5,93	17,07	5,19	15,92	5,97	15,08	7,27	14,65	8,90	14,64	9,41	16,45
				5,60	15,35	6,30	15,54	8,66	14,82	8,91	16,98
						6,06	15,84				

Tabela C-0-9 Estabilidade corrigida e fluência para os teores de 5,02% e 5,52% de ligante novo

Teor 5,02						Teor 5,52					
N19		N20		N21		N22		N23		N24	
Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,06	7,00	0,97	8,87	0,93	7,12	1,27	8,24	3,58	11,18	1,12	6,26
1,39	7,84	1,43	9,69	1,20	7,93	1,71	9,08	6,04	11,89	1,42	7,08
1,82	8,69	2,38	10,49	1,71	8,72	2,36	9,92	7,95	12,63	1,78	7,89
2,58	9,49	4,39	11,23	2,50	9,50	4,02	10,70	8,73	13,42	2,13	8,69
4,70	10,23	6,89	11,95	4,59	10,23	6,77	11,41	8,46	14,26	2,28	9,49
7,74	10,91	8,74	12,70	6,96	10,95	8,60	12,18	7,76	15,12	4,84	10,21
9,64	11,66	9,80	13,48	8,71	11,71	9,01	12,99	7,07	15,98	7,00	10,93
10,33	12,47	10,01	14,29	9,55	12,50	8,70	13,84	6,27	16,86	7,98	11,73
10,23	13,32	9,76	15,14	9,55	13,32	8,05	14,69	6,02	17,30	8,02	12,57

Teor 5,02						Teor 5,52					
N19		N20		N21		N22		N23		N24	
Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)
9,44	14,18	9,00	16,00	9,02	14,17	7,28	15,56			7,54	13,44
8,61	15,05	8,25	16,88	8,34	15,03	6,72	16,25			6,97	14,31
8,11	15,58	7,64	17,66	7,44	15,91					6,39	15,18
				6,93	16,35					5,92	15,74

