



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES**

ARMANDO DO RÊGO LIMA FILHO

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE DO FRESADO ASFÁLTICO E SEU IMPACTO NA
PAVIMENTAÇÃO**

FORTALEZA, CE

2016

ARMANDO DO RÊGO LIMA FILHO

ANÁLISE DA VARIABILIDADE DO FRESADO ASFÁLTICO E SEU IMPACTO NA
PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do
Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Jorge Barbosa Soares, Ph.D.

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

-
- L696a Lima Filho, Armando do Rêgo.
Análise da variabilidade do fresado asfáltico e seu impacto na pavimentação / Armando do Rêgo Lima Filho. – 2016.
60 f. il. color.
- Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Departamento de Engenharia de Transportes, Graduação em Engenharia Civil, Fortaleza, 2016.
Orientação: Prof. Dr. Jorge Barbosa Soares.
1. Asfalto. 2. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). 3. Pavimentos de asfalto - Qualidade. I.
Título.

CDD 620

ARMANDO DO RÊGO LIMA FILHO

ANÁLISE DA VARIABILIDADE DO FRESADO ASFÁLTICO E SEU IMPACTO NA
PAVIMENTAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do
Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 03 / 02 / 2016

BANCA EXAMINADORA

Prof. Jorge Barbosa Soares, Ph.D. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral (Membro interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Manoel Mendonça de Castro Neto, Ph.D. (Membro interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À Deus.

À minha família, em especial minha mãe e irmã.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Edy e Armando, e à minha irmã, Raphaela, por todo o carinho, por todos os ensinamentos, e pelo incessante apoio. Com vocês pude aprender valores que levarei comigo por toda minha vida.

A minha namorada, Márcia, por todo o amor, companheirismo, incentivo e dedicação. Obrigado por toda a ajuda com este trabalho e todo apoio durante a graduação. Você me incentivou a cada dia a buscar um futuro melhor, ser uma pessoa melhor. Agradeço, também, aos seus pais, Socorro e Cícero, e seu irmão Marcus, que sempre me acolheram com muito zelo e carinho.

Aos tios, Ednyra, Edyra e Paulo Sérgio, que sempre apoiaram e buscaram auxiliar em todos os momentos da minha formação acadêmica e pessoal. De vocês aprendi a me doar para o outro, e sempre ser grato por tudo que Deus me proporcionou.

Ao professor Jorge por sua excelente orientação, sempre me motivando a buscar mais, a buscar meu verdadeiro potencial. Seu zelo pelo trabalho e pelas pessoas é um exemplo para mim e mostra que é possível ser grande sem desprezar os pequenos.

A todos os professores que contribuíram de alguma maneira para meu crescimento durante a graduação.

A todos do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da UFC, em especial ao Rômulo, que esteve sempre disposto a ajudar, fosse na realização dos ensaios ou em sugestões de como prosseguir com este estudo.

À empresa Insttale Engenharia, em especial ao Victor, por ter me proporcionado o material utilizado neste estudo.

A todos meus amigos por todo o apoio, todas as noites de estudo a alegria proporcionada.

Aos avaliadores deste trabalho, Jorge Soares, Manoel Mendonça e Eduardo Cabral pela disponibilidade e comprometimento com a participação da minha banca.

“When I was 5 years old, my mother always told me that happiness was the key to life. When I went to school, they asked me what I wanted to be when I grew up. I wrote down ‘happy’. They told me I didn’t understand the assignment, and I told them they didn’t understand life.”

John Winston Lennon

RESUMO

Reciclar o fresado asfáltico é benéfico para redução do consumo de materiais virgens, porém deve-se ter cuidado para não comprometer o desempenho do pavimento asfáltico. Uma preocupação com o uso do fresado está relacionada a variabilidade das propriedades de materiais oriundos de diferentes fontes e como esta variabilidade impacta o pavimento asfáltico. Portanto, objetivou-se nesse estudo analisar a variabilidade da granulometria, do teor de ligante e da viscosidade de fresados asfálticos da Região Metropolitana de Fortaleza e verificar o impacto mecânico e financeiro desta variabilidade. O material coletado na empresa Insttale Engenharia encontrava-se fracionado e foi posteriormente caracterizado segundo as características mencionadas. A partir dos resultados obtidos, foram analisados os impactos que a heterogeneidade causa no volume de vazios, na resistência a tração e no módulo de resiliência de misturas asfálticas. A caracterização dos dados mostrou um coeficiente de variação de 9,96% para o teor de ligante e de 7,02% para a viscosidade do ligante. A curva granulométrica, entretanto, apresentou baixa variação, indicando que com processamento adequado o material é pouco heterogêneo. Constatou-se que a variação da porcentagem de fresado não afetou os parâmetros de volume de vazios e resistência a tração. O módulo de resiliência, entretanto, mostrou-se afetado pela heterogeneidade do fresado, tendo seu coeficiente de variação aumentado de 5,21% em uma mistura sem fresado para 12,31% para uma mistura com fresado. No quesito financeiro, um processamento adequado do material mostrou-se benéfico, com diferença de 3,68% entre a maior e menor redução no custo do ligante virgem considerando que o ligante envelhecido também contribui para a mistura asfáltica.

Palavras-chave: Variabilidade. Fresado asfáltico. Reciclagem.

ABSTRACT

Reclaimed asphalt pavement (RAP) is beneficial to reducing the consumption of virgin materials, but it is necessary to be careful not to affect the performance of the asphalt pavement. A major concern with RAP relates to the variability of the material which comes from different sources, and how this variability impacts the pavement. The objective of this study was to analyze the variability of particle sizes, binder content and viscosity from RAP samples from the Fortaleza metropolitan region and to verify the mechanical and economic impact of such variability. The collected material in Insttale Engenharia was fractionated and it was later characterized according to the mentioned characteristics. From the results, the impacts caused by the heterogeneity of the material in the air voids, tensile strength and resilience modulus were analyzed. The characterization resulted in a coefficient of variation of 9.96% for the binder content and 7.02% for the viscosity. The particle size distribution, however, presented low variation which indicated that with adequate processing the material is only slightly heterogeneous. It was found that the variability of RAP's percentage in the mix did not affect air voids or tensile strength. However, the resilient modulus proved to be affected by RAP's variability with its coefficient of variation ranging from 5.21% in a mixture with no RAP to 12.31% in a mixture with RAP. With respect to economical aspects, an adequate processing of the material proved to be beneficial with a difference of 3.68% between the highest and lowest cost reduction when taking into account the contribution of the aged binder to the mixture.

Palavras-chave: Variability. Reclaimed asphalt pavement. Recycling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Diferentes profundidades de corte	15
Figura 02 – Fresadora de pavimento asfáltico	19
Figura 03 – Tipos de fresagem	20
Figura 04 – Diferentes tipos de cilindro de corte	21
Figura 05 – Reciclagem a frio	23
Figura 06 – Ilustração de uma pilha de fresado asfáltico sobre uma superfície pavimentada e inclinada	26
Figura 07 – Ilustração de um galpão com laterais abertas cobrindo uma pilha de fresado asfáltico	27
Figura 08 – Exemplo de gráfico de controle	30
Figura 09 – Critério de desempenho do z-score	31
Figura 10 – Pilha de estocagem de fresado da empresa Insttale Engenharia	33
Figura 11 – Fluxograma	34
Figura 12 – Rotarex manual	36
Figura 13 – Soxhlet	37
Figura 14 – Corpo-de-prova	39
Figura 15 – Equipamentos do ensaio de RT e MR	40
Figura 16 – Resultados – granulometria pré-extração	42
Figura 17 – Resultados – granulometria pós-extração	43
Figura 18 – Z-score – teor de ligante	44
Figura 19 – Z-score – viscosidade	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Relação entre produção em toneladas anuais de HMA e WMA (em milhões de toneladas), disponibilidade de RAP e sua utilização em novas misturas	18
Tabela 02 – Considerações para análise de custo	41
Tabela 03 – Resultados – teor de ligante	43
Tabela 04 – Resultados – viscosidade	45
Tabela 05 – Resultados – testes de normalidade da viscosidade	45
Tabela 06 – Resultados – teor de projeto	46
Tabela 07 – Resultados – RAPBR	47
Tabela 07 – Resultados – Volume de vazios – 0% de fresado	47
Tabela 09 – Resultados – Volume de vazios – 15% de fresado	48
Tabela 10 – Resultados – RT	48
Tabela 11 – Resultados – MR	49
Tabela 12 – Resultados – análise de custo	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ARRA	<i>Asphalt Recycling and Reclaiming Association</i>
CEP	Controle Estatístico de Processo
Crema	Contratos de Restauração e Manutenção Rodoviária
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
HMA	<i>Hot-Mix Asphalt</i>
LIC	Limite Inferior de Controle
LM	Linha Média
LMP	Laboratório de Mecânica dos Pavimentos
LSC	Limite Superior de Controle
MDOT	<i>Michigan Department of Transportation</i>
PAC2	Programa de Aceleração do Crescimento 2
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>
RAPBR	<i>Reclaimed Asphalt Pavement Binder Ratio</i>
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
Superpave	<i>Superior Performance Asphalt Pavements</i>
UFC	Universidade Federal do Ceará
WMA	<i>Warm-Mix Asphalt</i>

SUMÁRIO

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	14
1.1 Introdução	14
1.2 Problemática	15
1.3 Objetivos	16
<i>1.3.1 Objetivo geral</i>	16
<i>1.3.2 Objetivos específicos</i>	16
1.4 Organização do estudo	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Tipos de fresado	20
2.2 Técnicas de reciclagem	21
<i>2.2.1 Reciclagem a quente</i>	21
<i>2.2.2 Reciclagem morna</i>	22
<i>2.2.3 Reciclagem a frio</i>	22
<i>2.2.4 Limitações do processo de reciclagem</i>	23
2.3 Logística do fresado	24
2.4 Impactos do uso de fresados na mistura	27
2.5 Controle estatístico do processo	29
<i>2.5.1 Z-score</i>	31
3. MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1 Caracterização do fresado asfáltico	34
<i>3.1.1 Curva granulométrica</i>	35
<i>3.1.2 Teor de ligante</i>	35
<i>3.1.3 Viscosidade</i>	36
<i>3.1.4 Avaliação da variabilidade dos fresados asfálticos</i>	37
<i>3.1.5 Identificação das características mais variáveis</i>	38
3.2 Estudo de caso	38
<i>3.2.1 Análise do impacto da variabilidade nas características mecânicas das misturas</i>	38
<i>3.2.2 Análise do impacto financeiro da variabilidade do fresado</i>	41
4. RESULTADOS E ANÁLISE	42
4.1 Caracterização do fresado	42
<i>4.1.1 Granulometria</i>	42

<i>4.1.2 Teor de ligante</i>	43
<i>4.1.3 Viscosidade</i>	44
4.2 Estudo de caso	46
<i>4.2.1 Projeto de mistura</i>	46
<i>4.2.2 Impacto mecânico</i>	47
<i>4.2.3 Impacto financeiro</i>	49
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	50
REFERÊNCIAS	52
ANEXO A – FERRAMENTAS DO CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO	55

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 Introdução

No Brasil, de acordo com Nakamura (2011), 90% da malha rodoviária nacional pavimentada faz uso de revestimento asfáltico. Este tipo revestimento tem como constituinte mais caro o asfalto (também chamado ligante) que é obtido, no país, pelo processamento de petróleo bruto. O material do revestimento é uma mistura constituída por ligante, agregados graúdos e agregados miúdos, podendo haver acréscimo de polímeros e outros aditivos com o viés de melhorar o ligante ou a massa como um todo.

Ainda no Brasil, segundo o Ministério de Planejamento (2015), 21,6 bilhões de reais foram utilizados em obras de manutenção de rodovias. Este valor corresponde a quase um terço do montante de 58,9 bilhões cedidos para empreendimentos inclusos no Eixo de Transportes 2 do Programa de Aceleração do Crescimento 2 (PAC2). Estas obras incluem a restauração e a conservação de 50.679 km de vias contratadas nos Contatos de Restauração e Manutenção Rodoviária (Crema).

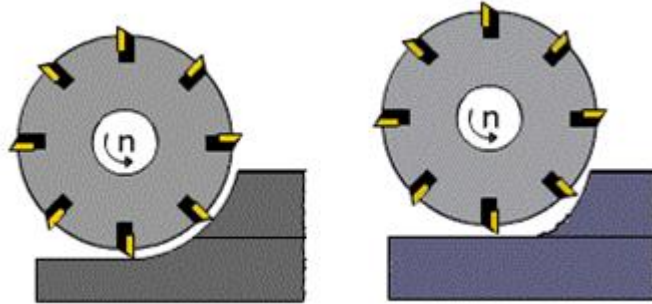
O aumento da preocupação com o meio ambiente e a otimização dos custos são fatores que incentivam a busca crescente por métodos e materiais de pavimentação menos danosos a natureza e mais acessíveis nos últimos anos. Hoje há misturas que utilizam desde a escória de aciaria e borracha de pneus descartados, até misturas que utilizam o próprio revestimento anterior, conhecido como fresado ou RAP – *Reclaimed Asphalt Pavement*. A técnica do aproveitamento do fresado asfáltico só foi reconhecida no Brasil na década de 1980, segundo Bonfim (2011).

Para a restauração do pavimento asfáltico é necessário retirar, parcialmente ou inteiramente, o revestimento antigo. O uso desse material, anteriormente descartado, é benéfico tanto para empresas, devido a vantagens econômicas, como para o meio ambiente, devido a diminuição da exploração de jazidas.

O fresado, por ser um material reciclado, possui uma grande variabilidade em suas características. De acordo com Bonfim (2011), a granulometria, por exemplo, do material varia de acordo com a profundidade do corte, o estado do pavimento quando fresado, o grau de envelhecimento do ligante existente no fresado e com a velocidade da fresadora utilizada. A

Figura 01 mostra um exemplo de diferentes profundidades de corte que uma máquina fresadora pode realizar.

Figura 01 – Diferentes profundidades de corte.



Fonte: Adaptado de <http://assets.cimm.com.br/noticias/imagem/Image/c-5157.gif>

Além das características já mencionadas, o fresado asfáltico, quando proveniente de diferentes fontes, pode apresentar também uma variação quanto à quantidade de ligante presente. Quando utilizado em reciclagens a quente ou mornas, esse ligante envelhecido irá interagir com o ligante virgem, alterando o teor de ligante final da mistura como um todo.

Portanto, com o conhecimento da representatividade do pavimento asfáltico na malha rodoviária nacional, se faz necessário ter maior conhecimento das técnicas e materiais utilizados na restauração de pavimentos asfálticos. Entender como as características do fresado variam, contribui para o melhor aproveitamento do material na pavimentação. A importância desse trabalho está na avaliação dessa variação, com a finalidade de encontrar maneiras de controlá-la, ou ao menos reduzir os problemas associados a esta variação.

1.2 Problemática

A rede de transportes de um país é um componente crítico na sua economia, além de trazer grandes impactos ambientais para região. Técnicas sustentáveis vêm sendo estudadas pela indústria da pavimentação para reduzir danos ambientais e custos. Um exemplo disso é a utilização da reciclagem do fresado (revestimento reciclado), que se mostrou de grande valia para redução do consumo de matérias primas e redução de custos em relação a outros materiais para pavimentação.

Fresados asfálticos são materiais complexos e de grande variabilidade. Por conta desta peculiaridade, são de difícil caracterização, uso e controle. A ausência de administração da homogeneidade do fresado se torna um empecilho para a sua reutilização, em proporções mais elevadas, nas camadas asfálticas de pavimentos. O desconhecimento do grau de heterogeneidade do material usado implica no seu comportamento imprevisível na pavimentação asfáltica, podendo gerar gastos excessivos ocasionados por danos prematuros.

Apesar da técnica da reciclagem do fresado na pavimentação datar do início da década de 1930 (HUANG *et al.*, 2005), são poucas as pesquisas que se reportam aos impactos da heterogeneidade do material. Após pesquisa na literatura nacional e internacional sobre o tema, pouco foi encontrado sobre a temática no Brasil, sendo necessário aprofundamento do assunto para servir de subsídio a outros profissionais ao tratarem com este material.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste projeto é analisar a variabilidade da granulometria, do teor de ligante e da respectiva viscosidade deste material nos fresados asfálticos locais, analisando seu impacto no pavimento asfáltico.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar segundo sua curva granulométrica, teor de ligante e sua viscosidade os fresados asfálticos oriundos de revestimentos fresados na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF);
- Verificar a reprodutibilidade dos ensaios realizados no estudo;
- Analisar o impacto financeiro da variabilidade das características dos fresados asfálticos nas misturas asfálticas;
- Analisar o impacto da variabilidade das características dos fresados asfálticos nas características mecânicas das misturas asfálticas;

1.4 Organização do estudo

O estudo foi organizado em cinco capítulos, conforme descrito a seguir:

Capítulo 1: apresenta as considerações iniciais do presente trabalho, contextualizando-o e apresentando seus objetivos gerais e específicos a serem atingidos ao final da monografia.

Capítulo 2: apresenta uma revisão bibliográfica que aborda o tema geral do trabalho, principalmente com foco em fresado asfáltico, reciclagem de pavimentos, análises estatísticas e controle de qualidade.

Capítulo 3: apresenta o método de pesquisa utilizado neste trabalho em um passo a passo, indicando os ensaios, equipamentos e normas usadas durante a pesquisa.

Capítulo 4: apresenta os resultados de cada ensaio realizado, a análise estatística e a discussão da relação existente entre resultados dos ensaios de caracterização do fresado e das características mecânicas da mistura asfáltica, bem como o impacto econômico da consideração do ligante do fresado na mistura asfáltica.

Capítulo 5: apresenta as conclusões obtidas neste estudo e sugestões para futuros trabalhos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Bonfim (2011), a técnica foi aplicada no Brasil na década de 1980 pela primeira vez. David (2006) afirma que, mesmo em locais com grande quantidade de recursos, reciclar o pavimento pode ser economicamente mais viável do que não reciclar, pois reduz os custos da obra devido a redução do consumo de materiais virgens. Além das vantagens econômicas, misturas que utilizam fresado como componente mostraram-se tão boas quanto as que fazem uso apenas de materiais novos (WEST *et al.*, 2009).

A Tabela 01 mostra a quantidade de fresado asfáltico disponível e o percentual dele que foi utilizado nas reciclagens a quente, também conhecidas como *Hot-Mix Asphalt* (HMA), e reciclagens mornas, também referenciadas como *Warm-Mix Asphalt* (WMA), em alguns países no ano de 2013.

Tabela 01 – Relação entre produção em toneladas anuais de HMA e WMA (em milhões de toneladas), disponibilidade de RAP e sua utilização em novas misturas.

	Alemanha	França	Itália	Turquia	EUA
Produção de HMA e WMA (milhões de toneladas)	41,0	35,4	22,3	46,2	318,1
RAP disponível (milhões de toneladas)	11,5	6,9	10,0	1,2	69,0
% de RAP disponível utilizado nas reciclagens quente e morna	90	64	20	3	92
% de RAP disponível utilizado nas reciclagens a frio	10	Sem dados	Sem dados	96	8
% de novas misturas HMA e WMA com adição de RAP	Sem dados	>65	Sem dados	1	Sem dados

Fonte: EAPA – ASPHALT IN FIGURES, 2013

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) define fresagem de pavimentos como o “desbastamento a frio ou a quente de superfícies asfálticas, como parte de um processo de reciclagem de pavimentos asfálticos”.

Quanto as possíveis fontes do material fresado, de acordo com West *et al.* (2009), existem três:

- i. Demolição profunda do pavimento asfáltico;
- ii. Usina de asfalto;

iii. Fresagem a frio, sendo esta última a fonte mais comum.

Este desbastamento é realizado por meio de máquinas fresadoras. Um exemplo de uma destas máquina se encontra na Figura 02.

Figura 02 – Fresadora de pavimento asfáltico.



Fonte: <http://asfaltodequalidade.blogspot.com.br/2012/12/fresadoras-de-asfalto.html>

Após fresado, o RAP ainda não está pronto para ser utilizado em misturas asfálticas. São necessários cuidados no desenvolvimento de misturas recicladas ao processar e misturar este material com agregados e ligantes asfálticos virgens.

Um aspecto a ser levado em consideração é a origem do material. De uma forma geral, em uma pilha de fresado asfáltico, encontram-se materiais de origens diversas, desde diferentes trechos fresados numa mesma via até materiais provenientes do desbastamento de vias distintas. Se faz, portanto, necessário caracterizar as pilhas de fresados asfálticos de forma correta com o objetivo de impedir misturas resultantes muito heterogêneas.

Lopes (2010) afirma que a heterogeneidade da mistura asfáltica com utilização do fresado pode ser ocasionada por três motivos: (i) heterogeneidade do fresado; (ii) nível de mistura entre o fresado e os materiais virgens; e (iii) nível de mistura entre o ligante envelhecido do fresado e o novo ligante.

Pode-se resumir os possíveis fatores causadores da variabilidade do fresado asfáltico em:

- O trecho fresado inclui o pavimento original e qualquer obra de manutenção ali realizada, tal como lama asfáltica usada para selagem ou massas usadas em operações tapa-buracos;

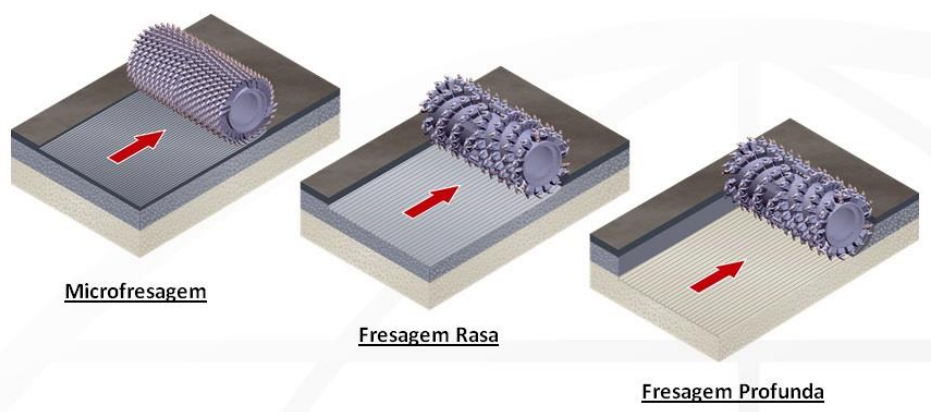
- Profundidade do corte, uma vez que quando este é muito profundo, o fresado passa a ser uma mistura de mais de uma camada do pavimento antigo;
- Fresados de diferentes fontes estocados em uma única pilha;
- Presença de outros materiais na pilha de armazenamento, como madeira, lixo, etc.

2.1 Tipos de fresado

Bonfim (2011) apresenta a classificação dos tipos de fresagem quanto a espessura do corte, podendo esta ser (i) profunda, a qual é comumente utilizada com o objetivo de corrigir problemas estruturais, podendo o corte chegar até a camada de sub-base; (ii) rasa, a qual é utilizada para corrigir problemas funcionais, podendo atingir até a camada de ligação (binder) em alguns casos; (iii) ou superficial, também conhecida como microfresagem, a qual é utilizada para correção de irregularidades na superfície.

A profundidade depende do porte da máquina fresadora e do tipo de cilindro de corte utilizado (Figura 03). Estes cilindros possuem “bits”, que são dentes de corte, e se diferenciam entre si devido ao espaçamento entre os dentes, como mostrado na Figura 04.

Figura 03 – Tipos de fresagem.



Fonte: <http://asfaltodequalidade.blogspot.com.br/2012/12/fresadoras-de-asfalto.html>

Figura 04 – Diferentes tipos de cilindro de corte.



Fonte: <http://asfaltodequalidade.blogspot.com.br/2012/12/fresadoras-de-asfalto.html>

2.2 Técnicas de reciclagem

As técnicas de reciclagem utilizadas na pavimentação asfáltica são classificadas segundo as temperaturas de produção e o local de fabricação da mistura. Quanto a temperatura, são classificadas em: reciclagem a quente, reciclagem morna e reciclagem a frio. Quanto ao local de fabricação, são classificadas em central ou *in situ*. Um breve detalhamento dos tipos de reciclagem mais comumente utilizados é apresentado a seguir.

2.2.1 Reciclagem a quente

A reciclagem a quente é o processo de mistura do fresado com os agregados virgens, o novo ligante asfáltico e, quando necessário, os agentes rejuvenescedores para produzir uma nova mistura. A técnica utiliza-se de transferência de calor com o objetivo de amolecer o ligante existente no fresado, permitindo assim que este seja misturado com os novos materiais. Quanto feito *in situ*, todo o procedimento de aquecimento e mistura ocorre no próprio local, sem a necessidade de armazenamento do fresado. Entretanto, quando a reciclagem é feita na planta central (usina), há a necessidade de estocagem do material até o momento da reciclagem.

Segundo ARRA (2014), *Asphalt Recycling and Reclaiming Association*, a reciclagem a quente em usina é o método mais utilizado do mundo. Apesar de ser o mais usado, possui limitações práticas quanto a quantidade de fresado que pode ser incorporado, estas podendo ser devido a: limitações tecnológicas da usina, propriedades físicas do ligante envelhecido, granulometria dos agregados do fresado asfáltico. Os autores citam ainda algumas

vantagens desta reciclagem, tais como: conservação de energia quando comparado a outros métodos, conservação de materiais virgens e destino útil para o material fresado que seria descartado.

2.2.2 Reciclagem morna

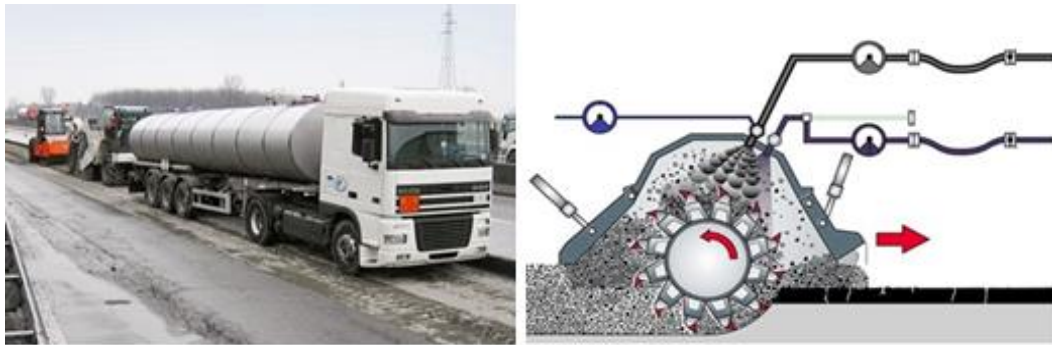
A reciclagem morna (WMA, *warm-mix asphalt*) é uma abordagem de pesquisadores com o objetivo de reduzir ainda mais o gasto de energia gerado pela reciclagem a quente. Angelo *et al.* (2008) afirmam que essa nova tecnologia pode reduzir a temperatura de produção da mistura de 20 a 55°C. Segundo os mesmos autores, algumas vantagens do uso de WMA são: (i) promoção do desenvolvimento sustentável, também chamado de construções verdes, ao reduzir o consumo de energia, resultando em uma redução da emissão de CO₂; (ii) favorecimento da compactação em campo, principalmente em climas mais frios; e (iii) e melhoramento das condições de trabalho dos operários, que trabalham sob menor risco devido a temperatura mais baixa e menor presença de gases.

Apesar das citadas vantagens, Wargha Filho (2013) afirma que não há confirmação de bom desempenho deste tipo de reciclagem a longo prazo, uma vez que a técnica ainda é recente.

2.2.3 Reciclagem a frio

Lopes (2015) afirma que a reciclagem a frio acontece quando a técnica de reciclagem e mistura dos materiais ocorre sem consumo de energia relacionada ao aquecimento dos materiais, ou seja, quando acontece a temperatura ambiente. Quando realizada *in situ*, segundo ARRA (2014), geralmente é aproveitado todo o fresado gerado durante o processo. Em usinas estacionárias, segundo Lopes (2015), a técnica consegue atingir o percentual de reaproveitamento do material reciclado de até 90% em países europeus. Quando há a necessidade de reconstrução total do pavimento ou quando se trata de uma nova construção, a reciclagem a frio ocorre em usinas estacionárias. Nas ocasiões que as reciclagens ocorrem *in situ*, entretanto, é mais comumente utilizada como camada de base, sendo necessária aplicação de um revestimento acima da camada reciclada. A Figura 05 mostra um exemplo de reciclagem a frio *in situ*.

Figura 05 – Reciclagem a frio.



Fonte: Adaptado de <http://asfaltodequalidade.blogspot.com.br/2012/12/recicladoras-de-asfalto.html>

2.2.4 Limitações do processo de reciclagem

Uma das limitações do processo de reciclagem do pavimento asfáltico é a variabilidade do material. A heterogeneidade do material se dá não somente na granulometria do material, como também no teor de ligante final e na idade do ligante envelhecido.

Segundo Zubaran (2014), o envelhecimento do ligante presente no fresado é o processo pelo qual suas propriedades químicas e reológicas sofrem uma alteração, o que resulta em um ligante mais consistente. Este processo ocorre durante a vida útil do ligante, desde a sua estocagem até a aplicação na mistura, prosseguindo ao longo do tempo de serviço do pavimento. Durante a usinagem e compactação da mistura, o envelhecimento é intensificado devido às elevadas temperaturas, podendo, ainda segundo o autor, ter um aumento de duas a quatro vezes no valor da viscosidade original do ligante em um período inferior a duas horas. Durante o tempo de serviço do pavimento asfáltico, o revestimento envelhece não mais devido a temperatura, mas devido a outros fatores, como: (i) oxidação do ligante devido a reação difusa com o oxigênio e (ii) separação devido a absorção dos componentes oleosos do ligante pelo agregado.

Quanto a granulometria, a heterogeneidade é acentuada quando mais de uma fonte de fresado asfáltico se encontra na mesma pilha. Entretanto, segundo Zubaran (2014), quando a fonte é de um único projeto, o material apresenta graduação e teor de ligante quase que constantes. Para homogeneizar fresados de diferentes fontes, segundo o mesmo autor, um método eficaz é o destorroamento do material. Ainda segundo o mesmo autor, quando bem

trabalhadas, as pilhas de estocagem de fresados asfálticos podem apresentar uma graduação menos variável que as pilhas de estocagem do material virgem.

Quanto ao teor de ligante, segundo Lopes (2015) a distribuição do ligante asfáltico de uma mistura entre seus grãos ocorre segundo a superfície específica dos mesmos, cujo valor resulta da relação entre a área total da superfície das partículas e sua massa. Deste conhecimento, entende-se que entre o material fino e graúdo da mistura, o fino é a parte onde se encontra o maior teor de ligante, pois é a parte que possui a maior superfície específica. Logo, mostra-se novamente necessário o destorroamento e o fracionamento do fresado asfáltico com o objetivo de aumentar o controle durante a dosagem.

A prática do destorroamento consiste em quebrar o material até que todo ele possua um tamanho máximo de agregado. Geralmente, segundo Zhou (2010), o material é quebrado até o tamanho de 1/2” ou de 3/8”. A prática do fracionamento, por sua vez, trata-se de separar o material em duas ou mais pilhas, dependendo de seu tamanho. Comumente o fresado é separado em frações graúdas e finas, de forma que em uma das pilhas fique todo o material retido na peneira 1/2” ou 3/8” e em outra pilha o material passante nas peneiras 1/2” ou 3/8”.

2.3 Logística do fresado

O gerenciamento logístico do fresado é um fator relacionado a potencialidade da reciclagem a quente. É necessário que durante a conservação, o material esteja livre de contaminantes, de acordo com West *et al.* (2010).

Considera-se a pilha de fresado asfáltico como um material de valia e seu gerenciamento errôneo é um dos fatores responsáveis pelos órgãos reguladores serem resistentes ao aumento da taxa de fresado incorporado à mistura.

Segundo Zubaran (2014), nos Estados Unidos, materiais fresados de projetos das próprias agências são nomeados como fresados classificados, uma vez que a origem do material é sabida. O uso de fresados não classificados é a opção de muitos órgãos não reguladores, o que significa que esses fresados foram mistos e reunidos em uma mesma pilhagem em pequenos projetos. Ainda segundo o autor, pode-se enumerar os principais objetivos do processamento de fresado em alguns tópicos:

- Criar uma pilha de armazenamento uniforme para fresados asfálticos de várias fontes;
- Quebrar ou separar fragmentos maiores ou aglomerados de fresados em tamanho adequado que possa ser eficientemente aquecido e quebrado durante a mistura com os agregados virgens;
 - Reduzir o tamanho máximo do agregado para que o fresado possa ser utilizado na camada superficial do pavimento;
 - Minimizar a geração de poeira no ambiente.

Por sua vez, Zhou *et al.* (2010) indicam que os cuidados necessários na prática de gerenciamento de fresado seriam:

1. Eliminar contaminações do material.

Contaminação pode ocorrer durante a fresagem e a estocagem do material, onde é possível encontrar vegetação, lixo e geosintéticos junto ao fresado. Eliminar a contaminação é o primeiro passo para melhorar a qualidade do fresado asfáltico.

2. Separar pilhas de fresado de diferentes fontes.

Fresados asfálticos provenientes de uma mesma fonte não precisam, normalmente, ser fracionados, uma vez que possui granulometria e teor de ligante praticamente constantes. Entretanto, materiais provenientes de diferentes fontes podem possuir características bem distintas entre si, tornando a prática de fracionamento necessária.

Ao manter separadas pilhas de diferentes origens, economiza-se tempo e dinheiro, pois evita-se o fracionamento desnecessário do material.

3. Misturar o fresado antes do processamento.

Para melhor homogeneizar pilhas de diferentes origens, é essencial que ao colher o material com a pá escavadeira use-se diferentes ângulos, de forma aleatória. Desta forma, o material será melhor misturado, acarretando maior uniformidade.

4. Processar (destorroar e fracionar) o fresado asfáltico.

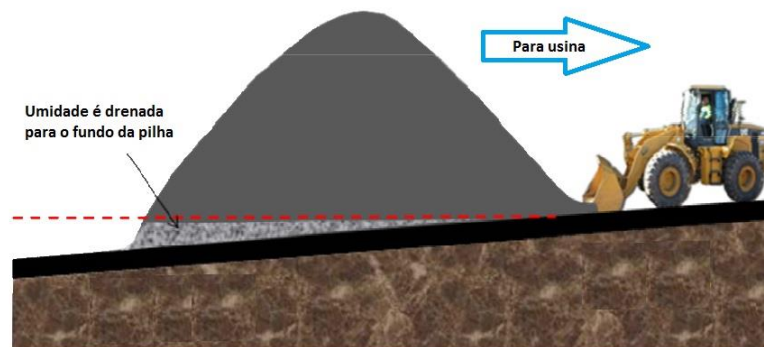
De acordo com os autores, destorroar é o tipo de processamento mais comum nas usinas. Entretanto, deve-se notar que o fracionamento do material, apesar de mais custoso, promove mais benefícios ao trazer mais flexibilidade na escolha de porcentagens de graúdos e miúdos de fresado asfáltico ao serem misturados com agregados virgens.

Os autores fazem nota a um cuidado quanto a prática de destorroamento, em vista que essa é a comumente utilizada. Ao destorroar grandes agregados, há geração de material muito fino, passante na peneira nº 200. O excesso deste material limita a quantidade de fresado que pode ser utilizado em uma nova mistura, de tal forma que é necessário evitar excesso de destorroamento do material.

5. Armazenar o fresado em um local pavimentado e inclinado.

O fresado asfáltico tende a reter umidade, o que pode limitar seu uso na mistura ou em gastos excessivos para secar o material. Ao armazenar a pilha de fresado sob uma superfície pavimentada e inclinada, a usina se beneficia com uma menor perda e contaminação de material, tal como contribui para a drenagem da água da chuva, como mostra na Figura 06, de forma que material mais seco vai para usina.

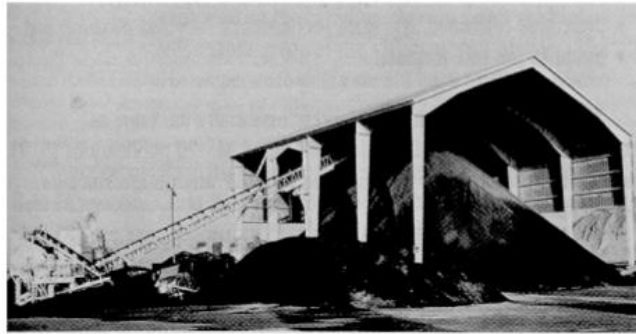
Figura 06 – Ilustração de uma pilha de RAP sobre uma superfície pavimentada e inclinada.



Fonte: Adaptada de Zhou (2010).

Outra prática para reduzir os problemas com a umidade seria armazenar o fresado asfáltico em um local coberto. Zhou *et al.* (2010) recomendam o armazenamento em galpões com laterais abertas, como mostra a Figura 07.

Figura 07 – Ilustração de um galpão com laterais abertas cobrindo uma pilha de RAP.



Fonte: Zhou *et al.* (2010).

6. Caracterizar o fresado processado e marcar as pilhas.

Para facilitar a produção de uma mistura consistente utilizando fresado, os valores médios e o desvio padrão do teor de ligante e da granulometria do material devem ser arquivados. Após a construção da pilha homogeneizada final, numerar a pilha com referência ao arquivo contendo sua caracterização é, também, uma prática recomendada.

2.4 Impactos do uso de fresados na mistura

Como indicado por Roberts *et al.* (2002), diferentes abordagens foram propostas para dosagem de misturas asfálticas. Os dois procedimentos mais conhecidos são o método de Marshall (ASTM, 1989) e o método Superpave (Asphalt Institute, 2001).

No método Marshall, a amostra é compactada por impacto, e o teor de asfalto é obtido através de relações entre a massa específica máxima teórica da mistura e a massa específica aparente da massa compactada, o volume de vazios (V_v), a porcentagem em massa dos agregados e o volume de vazios preenchidos por betume.

No método Superpave, a mistura é projetada com base na relação entre a massa específica aparente e massa específica máxima teórica em diferentes umidades, diferentes porcentagens de material e no uso estimado de tráfego (SHRP, 1994). A compactação da mistura é através de amassamento.

No Brasil, as misturas ainda são realizadas, em sua maioria, de acordo com o método de dosagem Marshall, mesmo com o fato deste método ser alvo de críticas. Motta (1998)

relata a falta de representação do método de compactação em relação ao que ocorre em campo e a influência de fatores relacionados ao preparo de corpos-de-prova. Coelho e Sória (1998) citam a grande dispersão nos resultados do método, mesmo quando sob condições idênticas de materiais entre campo e laboratório.

O Departamento de Transportes de Michigan (2011), MDOT (*Michigan Department of Transportation*), através do aditivo 12SP501(E), divide a recomendação do uso de fresado asfáltico em HMA, realizadas pelo método Marshall em três categorias baseado em uma relação entre a quantidade de fresado, o teor de ligante do fresado e o teor de ligante total da mistura. O resultado desta relação é chamado de *RAP Binder Ratio* (RAPBR) ou *Binder Replacement*, que é a proporção de ligante do fresado com relação a mistura, e o seu valor é obtido segundo a Equação 01:

$$RAPBR = \frac{P_{b_{RAP}} * P_{RAP}}{P_{b_{total}}} \quad (01)$$

Onde:

- $P_{b_{RAP}}$ é o teor de ligante do fresado asfáltico;
- P_{RAP} é o percentual de fresado na mistura;
- $P_{b_{total}}$ é o teor de ligante total da mistura.

Para projetos onde o valor do *Binder Replacement* é de até 17%, não há necessidade de ajuste no ligante virgem. Para misturas cujo RAPBR varia de 18 a 27%, o método relata como opcional, exceto para zonas metropolitanas, onde é obrigatório, a utilização de um ligante com um grau de desempenho uma categoria abaixo para a temperatura máxima média de sete dias da inicialmente recomendada para o projeto. Para misturas com RAPBR em quantidades iguais ou maiores que 28%, é sugerido a utilização de gráficos de mistura, apresentados na norma AASHTO M 323, visando determinar o grau de desempenho cujo o ligante virgem a ser utilizado no projeto deva apresentar.

2.5 Controle estatístico do processo

De acordo com Yoder e Witczak (1975), as principais áreas em que conceitos de estatística são de grande valor para o engenheiro são: (i) amostragem do material; (ii) fases de concepção e projeto do pavimento; e (iii) qualidade do material e semelhanças entre o projetado e o construído. Compreendendo a variabilidade em cada área supracitada e reconhecendo que esta é inerente do processo de produção da pavimentação, entende-se que cada mistura asfáltica tem características peculiares e cada projeto é único.

Yoder e Witczak (1975) apontam ainda que um dos maiores problemas ao desenvolver um controle de qualidade que leva em consideração essa variação estatística é que é necessário a análise de uma grande quantidade de informações e de dados. Um outro problema, segundo os mesmos autores, é a dificuldade em decidir qual a real significância de cada fator, por exemplo, quão significativa é a diferença entre 95% e 97% no percentual de compactação. Mesmo com as dificuldades apresentadas, controles de qualidade que levam em consideração a análise estatística podem oferecer vantagens a produtores e consumidores, uma vez que diminuem o risco de o produtor recusar um material aceitável e reduzem também o risco do aceite, por parte do consumidor, de um material de menor qualidade.

Ryan (2011) menciona que o conhecimento das técnicas estatísticas e suas combinações são importantes para o aprimoramento do controle de qualidade. Além disso, são necessárias para determinar variações anormais dos parâmetros monitorados e tornar possível a identificação de fatores que influenciam as características do processo produtivo.

Sanders e Reid (2012) separam o controle de qualidade estatístico em três categorias gerais: estatística descritiva, controle estatístico de processos e amostragem de aceitação. Todas as três categorias são importantes, uma vez que as ferramentas de cada categoria fornecem informações diferentes para a análise de qualidade. A mais comumente utilizada, ainda segundo os mesmos autores, é o controle estatístico de processos (CEP). De acordo com Montgomery (2011), o CEP é a combinação de sete ferramentas estatísticas (ANEXO A). Os métodos utilizados no CEP estendem o uso da estatística descritiva para monitorar a qualidade do processo e do produto. Nessa categoria é determinada a extensão da variabilidade que pode ser considerada comum para que o processo esteja dentro dos padrões aceitáveis.

O método mais comum, ainda segundo Sanders e Reid (2012), utilizado para monitorar o processo de produção são os gráficos de controle (*control charts*). Costa *et al.* (2011) indicam que gráficos de controle são utilizados para verificar processos que possuem atributo de qualidade de interesse mensurável, como por exemplo o valor do teor de ligante de uma amostra de fresado asfáltico. Para uso do gráfico de controle, é calculada a média dos valores medidos (\bar{x}), da qual se obtém o valor da linha média (LM), e a diferença entre o maior e o menor valor medido, chamado de amplitude amostral. É calculado, também, o desvio padrão da amostra (s), o limite superior de controle (LSC) e o limite inferior de controle (LIC). Estes limites são usualmente calculados por meio de uma relação entre a média e o desvio padrão como indicado nas Equações 02, 03 e 04 a seguir:

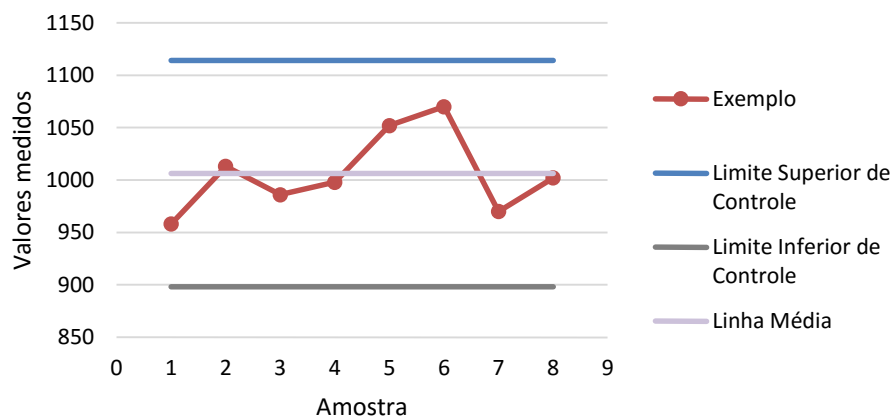
$$LSC = \bar{x} + 3 * s \quad (02)$$

$$LM = \bar{x} \quad (03)$$

$$LIC = \bar{x} - 3 * s \quad (04)$$

LM, LSC e LIC são as linhas utilizadas para determinar os limites de variação aceitáveis para uma amostra. Se o valor obtido se encontrar entre o limite inferior e o limite superior, o mesmo é aceitável do ponto de vista estatístico. Se estiver fora, se faz necessário intervir no processo de produção a fim de corrigir a causa desta variação excessiva. Um exemplo de gráfico de controle se encontra na Figura 08, no qual o valor medido pode perfeitamente ser uma variável de uma usina de asfalto como o teor de ligante, a densidade da massa compactada ou a densidade máxima teórica da mistura.

Figura 08 – Exemplo de gráfico de controle.



Fonte: Próprio autor.

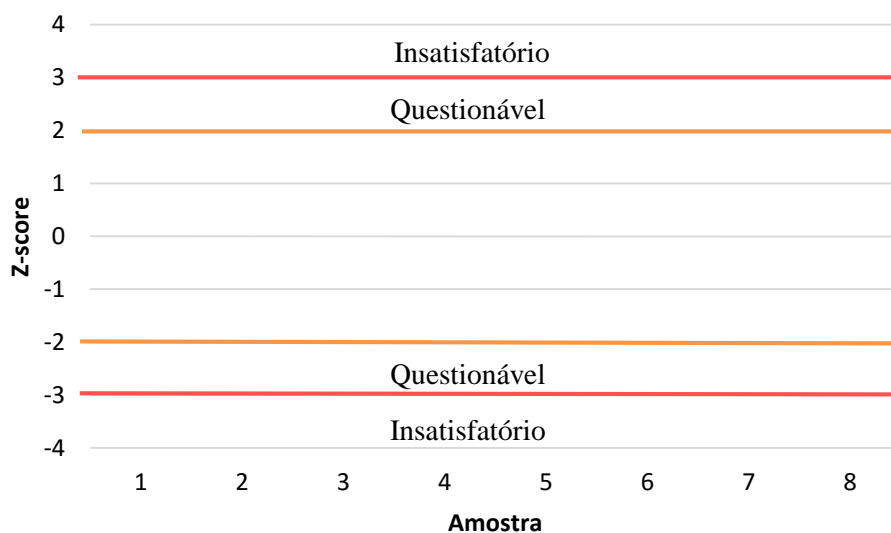
O gráfico de controle pode ser utilizado para determinar a homogeneização da pilha de fresado asfáltico com a finalidade de aumentar a precisão do cálculo do RAPBR, o que possibilita um maior uso de fresado na mistura.

2.5.1 Z-score

O z-score, segundo Eidleman (1995), é uma medida estatística da relação entre o valor de um parâmetro obtido em laboratório e um valor de referência. O método mostra quando um dado é típico ou atípico para aquele parâmetro, determinando desta forma a variabilidade dos resultados obtidos em ensaios.

O valor de z-score varia entre zonas. Os valores limites de cada zona são padronizados, sendo que valores entre -2 e 2 são aceitáveis, entre -3 e -2 e entre 2 e 3 são questionáveis e abaixo de -3 ou acima de 3 são insatisfatórios, como indicado na Figura 09. Quando um parâmetro se encontra na zona do insatisfatório, ele não deve ser levado em consideração na análise. Quando se encontra na zona questionável, o parâmetro é considerado, porém deve-se ser cauteloso uma vez que o parâmetro pode não ser representativo da população.

Figura 09 – Critério de desempenho do z-score.



Fonte: Próprio autor.

O valor de z é obtido através de uma relação entre o resultado obtido em laboratório, o valor de referência estimado, usualmente utilizado o valor médio do parâmetro, e o desvio padrão estimado através da Equação 04:

$$z = \frac{(x - \bar{x})}{s} \quad (04)$$

Onde x é valor obtido experimentalmente, \bar{x} é o valor de referência e s é o desvio padrão.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O material estudado na presente investigação foi composto pelos fresados asfálticos de diferentes fontes utilizadas pela empresa Insttale Engenharia. A empresa possui sede na cidade de Fortaleza, Ceará, e atua no setor de pavimentação asfáltica, locação de equipamentos para pavimentação, fresagem de pavimento asfáltico e locação de geradores de energia elétrica.

A coleta do material investigado ocorreu no dia 20 de julho de 2015. A empresa mantém uma única pilha de material fresado, onde todos os fresados asfálticos são estocados, de forma que não foi possível separar fresados de diferentes fontes e estas fontes não eram conhecidas (informação verbal)¹. Da pilha de fresado asfáltico, foram coletados 90kg com o objetivo de ter a quantidade requerida por norma para cada ensaio realizado neste estudo. A coleta foi feita segundo sugere Zhou *et al.* (2010), coletando o material em locais aleatórios e em diferentes ângulos. Ao manter a quantidade mínima requerida pela norma de cada ensaio realizado, garante-se a representatividade da amostra coletada perante toda a pilha de fresado. A pilha da qual o material foi coletado é mostrada na Figura 10.

Figura 10 – Pilha de estocagem de fresado da empresa Insttale Engenharia.

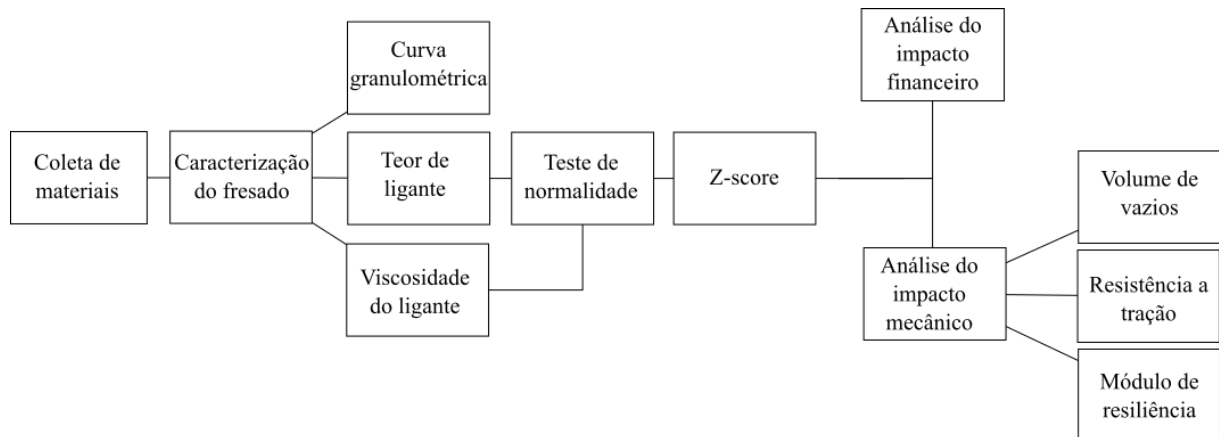


Fonte: Próprio autor.

¹ Informação fornecida pelo engenheiro Victor Mosca de Carvalho Araújo, em diálogo com o autor, realizado no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da UFC, em Fortaleza, em julho de 2015.

A Figura 11 mostra um fluxograma de como foi conduzido o estudo.

Figura 11 – Fluxograma.



Fonte: Próprio autor.

3.1 Caracterização do fresado asfáltico

O material coletado foi homogeneizado por quarteamento. A partir deste material, foram analisadas as seguintes características:

- Granulometria;
- Teor de ligante;
- Viscosidade do ligante envelhecido.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da Universidade Federal do Ceará (UFC). Decidiu-se realizar para cada ensaio, granulometria, teor e viscosidade do ligante, sete amostras, mais que o requerido pelas normas de cada um deles, para obter um maior número de resultados e maior representatividade.

Após a coleta dos resultados, foi realizada uma análise estatística dos dados obtidos, com a finalidade de averiguar a hipótese de que a distribuição estatística destas características estudadas tende a normalidade, ou seja, obedecem a curva de Gauss (normal).

Em seguida são descritos brevemente os procedimentos de cada ensaio realizado ao longo da pesquisa.

3.1.1 Curva granulométrica

A granulometria do material fresado foi analisada por meio de peneiramento antes e após a extração do ligante e se classificou segundo o DNER-ME 083/98 Agregados – Análise granulométrica.

3.1.2 Teor de ligante

A determinação do teor de ligante foi feita por meio da relação entre os pesos das amostras antes e depois de sua extração segundo a Equação 05:

$$T = \frac{P_f - P_0}{P_f} * 100 \quad (05)$$

Onde:

- T – teor de ligante em porcentagem;
- P_f – massa da amostra antes da extração do ligante, em gramas;
- P_0 – massa da amostra após a extração do ligante, em gramas.

A extração foi feita através do uso de um Rotarex, tal como indicado na norma ABNT NBR 16208/2013 – Misturas Asfálticas – Determinação do teor de betume pelo Soxhlet, pelo Rotarex e pelo reflexo duplo. O fresado asfáltico foi dividido em amostras de aproximadamente 750g. Cada amostra foi colocada na estufa durante 20 minutos para facilitar a ação do solvente. Após os 20 minutos, a amostra foi submergida em gasolina durante 20 minutos. Após este período, ainda imerso em gasolina, a amostra foi rotada no Rotarex. Uma foto do equipamento utilizado se encontra na Figura 12.

Figura 12 – Rotarex manual.



Fonte: Próprio autor.

O procedimento de extração foi realizado seis vezes para cada uma das sete amostras, de forma a retirar o máximo possível de ligante do material.

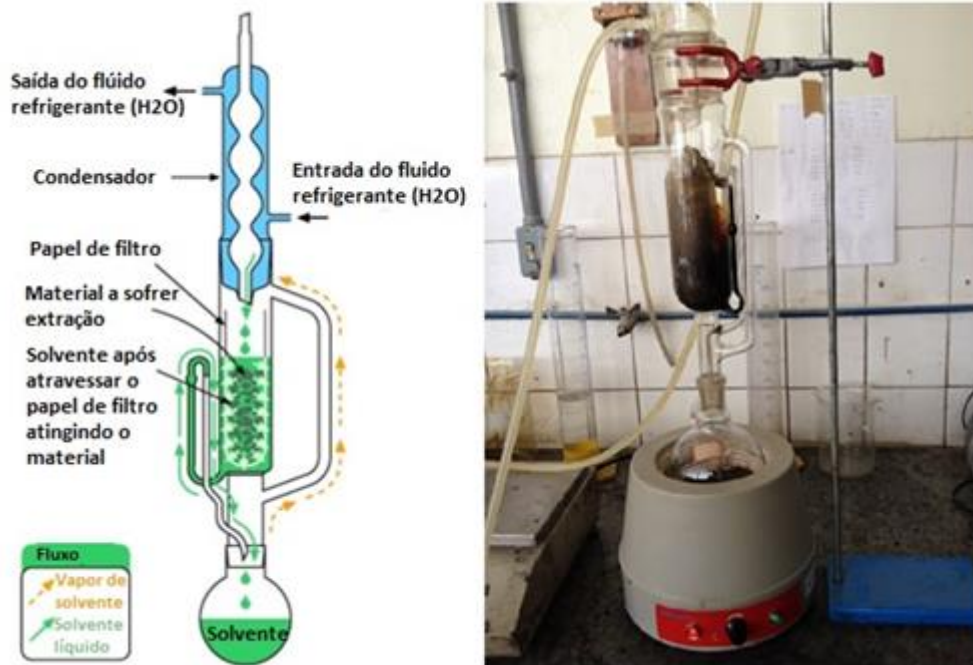
3.1.3 Viscosidade

A viscosidade foi avaliada tal como indicado na norma ABNT NBR 15184/2004 – Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional.

A extração do ligante utilizado no ensaio de viscosidade foi realizada com o uso do solvente D-limoneno. O fresado asfáltico foi dividido em amostras de aproximadamente 270g. Cada amostra foi envolvida em papel de filtro e inserida em um Soxhlet. Com o uso de uma manta, o solvente utilizado foi aquecido até o ponto de ebulição. Em forma de gás, o solvente sobe na vidraria indo de encontro a uma passagem resfriada por água à 18°C. Ao ser resfriado, o solvente condensa e cai sobre o papel de filtro que envolve o fresado, arrastando consigo o

ligante do material. A Figura 13 mostra uma imagem esquemática de como o equipamento funciona à esquerda e o equipamento em uso à direita.

Figura 13 – Soxhlet.



Fonte: Adaptado de <https://hardwarecosmetica.files.wordpress.com/2015/02/soxhlet2.jpg>

3.1.4 Avaliação da variabilidade dos fresados asfálticos

Os resultados obtidos dos ensaios anteriores foram analisados utilizando a ferramenta Statistical Package for Social Sciences (SPSS) versão 22 (SPSS, 2013). O objetivo do uso da ferramenta foi verificar se as distribuições dos dados obtidos seguem ou diferem de uma distribuição normal. A análise da normalidade foi realizada uma vez que as técnicas de CEP são mais eficientemente aplicadas quando a hipótese é verdadeira. Foi efetuado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk, com grau de confiança de 95%, ou seja, α (nível de significância) de 5%.

Os testes utilizados fornecem o parâmetro significância (valor-p), que é visto como o grau de concordância entre os valores testados e a hipótese nula (H_0), que afirma que a distribuição é normal. Quanto menor for o valor da significância, menor é a compatibilidade entre os dados e a H_0 . Logo, para conferir a normalidade, segue a seguinte regra de decisão:

- Se $\text{valor-p} \leq \alpha$, rejeita-se a hipótese nula, não podendo ser confirmada a normalidade dos dados estudados;
- Se $\text{valor-p} > \alpha$, a hipótese nula não é rejeitada, de forma que se assume que os dados obedecem a uma distribuição normal.

Feita a análise da normalidade dos testes, foi feita a avaliação do z-score das características estudadas para verificação se há *outliers* no material testado e se o processo pode ser reproduzido de maneira que resultados semelhantes possam ser encontrados.

3.1.5 Identificação das características mais variáveis

Após a validação do modelo de distribuição estatístico, seguiu-se uma análise das características do fresado asfáltico estudado. Algumas características possuem maior variabilidade do que outras, fazendo com que elas se sobressaiam na influência sobre a mistura. A princípio, duas questões nortearam esta etapa:

- Qual das características estudadas, granulometria, teor e viscosidade do ligante, possui uma maior variabilidade?
- Como isso afeta a mistura?

3.2 Estudo de caso

3.2.1 Análise do impacto da variabilidade nas características mecânicas das misturas

Para verificar o impacto da variabilidade do fresado asfáltico na mistura, optou-se por analisar seu volume de vazios, sua resistência a tração (RT) e seu módulo de resiliência (MR) e verificar se o grau da variação destas características é dependente do percentual de fresado asfáltico na mistura.

Inicialmente haviam sido definidas misturas com três percentuais diferentes de fresado, sendo eles 0%, 15% e 30%. Entretanto, devido a disponibilidade limitada de agregados, optou-se por fazer somente as misturas com 0% (Mistura 1) e 15% (Mistura 2) de fresado. A

Figura 14 mostra um dos corpos-de-prova deste estudo. Optou-se por realizar a amostra com 15% de fresado devido a ser o valor comumente utilizado na RMF.

Figura 14 – Corpo-de-prova.



Fonte: Próprio autor.

Para cada mistura foram produzidos seis corpos-de-provas, dos quais três foram destinados para realizar o ensaio de RT e os três restantes para o ensaio de MR.

O teor de ligante do projeto foi determinado ao fazer misturas com 4,0%, 4,5% e 5,0% de teor de ligante e realizando a medição de volume de vazios de cada mistura. O teor de projeto escolhido foi aquele cujo volume de vazios das misturas era 4,0%, com uma tolerância de 0,4% para mais e para menos.

O volume de vazios foi determinado segundo a Equação 06:

$$V_v = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} * 100 \quad (06)$$

Onde:

- V_v – volume de vazios;
- G_{mm} – massa específica máxima teórica;
- G_{mb} – massa específica aparente de uma mistura asfáltica compactada.

A Gmm foi determinada através do ensaio descrito na norma ASTM 2041, enquanto a Gmb foi determinada através do ensaio descrito na norma ASTM D 1188.

Foi verificado também os valores de RAPBR para verificar a necessidade do uso de um ligante menos viscoso ou não na mistura, segundo indica o MDOT (2011).

Após encontrado o teor de projeto e os valores de RAPBR, seis novos corpos-de-prova para cada teor de projeto foram compactados. Foi realizado, então, o procedimento para obter o volume de vazios desses corpos-de-prova.

O ensaio de RT foi feito segundo a norma ABNT NBR 15087/2012 – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral e o ensaio de MR foi realizado segundo a norma ABNT NBR 16018/2011 – Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida. A Figura 15 mostra, à esquerda, o equipamento utilizado para o ensaio de RT e, à direita, o equipamento utilizado para o ensaio de MR.

Figura 15 – Equipamentos do ensaio de RT e MR.



Fonte: Próprio autor.

3.2.2 Análise do impacto financeiro da variabilidade do fresado

Al-Qadi *et al.* (2009) afirmam que a prática comum do Departamento de Transportes de Illinois é considerar o ligante do fresado asfáltico 100% funcional, ou seja, todo o ligante do fresado contribui para o teor de ligante total da mistura. Através destas informações e a fórmula do RAPBR, foi possível determinar o quanto o ligante do fresado contribui para a mistura.

Com o valor da contribuição do fresado, foi feita uma análise econômica de uma mistura que se utiliza dos valores reais do teor de ligante do fresado comparado a uma na qual se utiliza somente a média. O objetivo da análise é relacionar o fator econômico a não utilização de pilhas para fresados asfálticos de diferentes fontes. O custo do ligante foi obtido da Insttale Engenharia no dia 22/11/2015.

Para o estudo, foi definida uma mistura cujo teor de ligante final é de 5,5%. A mistura utilizou 15% de fresado, e o valor do teor de ligante do fresado foi feito conforme os resultados obtidos no ensaio de teor de ligante. Verificou-se, também, o valor do RAPBR para determinar se é necessária a utilização de um ligante com grau de desempenho diferente do inicialmente projetado. As considerações para esta análise se encontram na Tabela 02.

Tabela 02 – Considerações para análise de custo.

Extensão do trecho (km)	Largura do trecho (m)	Densidade do ligante	Custo do ligante virgem (R\$/ton)	Espessura do revestimento (cm)	% de RAP na mistura	Ligante funcional do RAP (%)	Teor de ligante da mistura (%)
5	24	1,03	1.900,00	7	15	100	5,5

Fonte: Próprio autor.

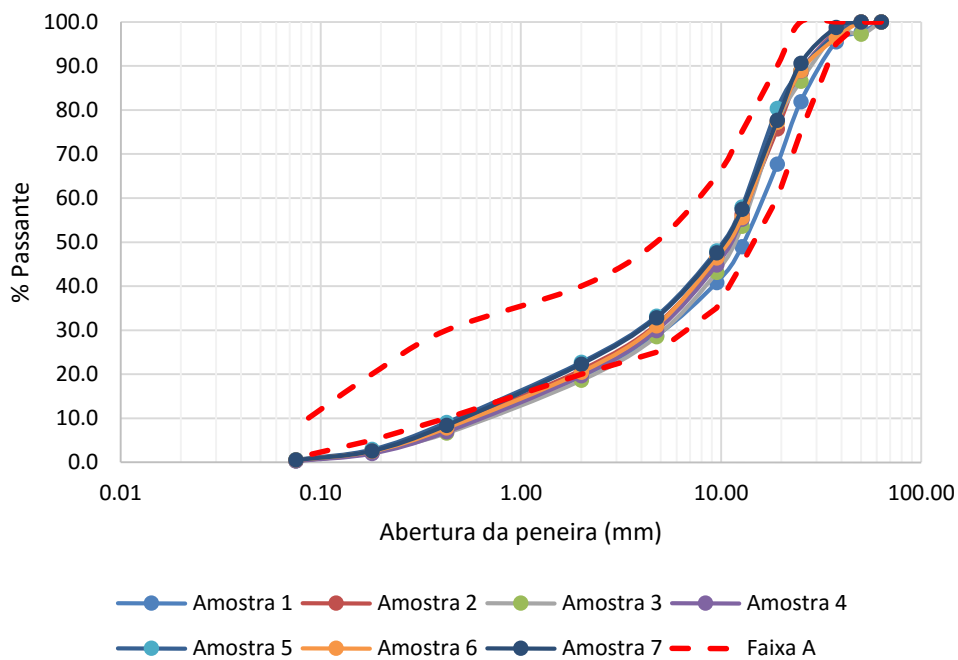
4. RESULTADOS E ANÁLISE

4.1 Caracterização do fresado

4.1.1 Granulometria

Os resultados dos ensaios de granulometria do fresado antes da extração do ligante se encontram na Figura 16. É possível verificar pelo gráfico a semelhança granulométrica entre as amostras, embora estas sejam de diferentes fontes. Verifica-se que a amostra se aproxima da faixa A proposta pelo DNIT.

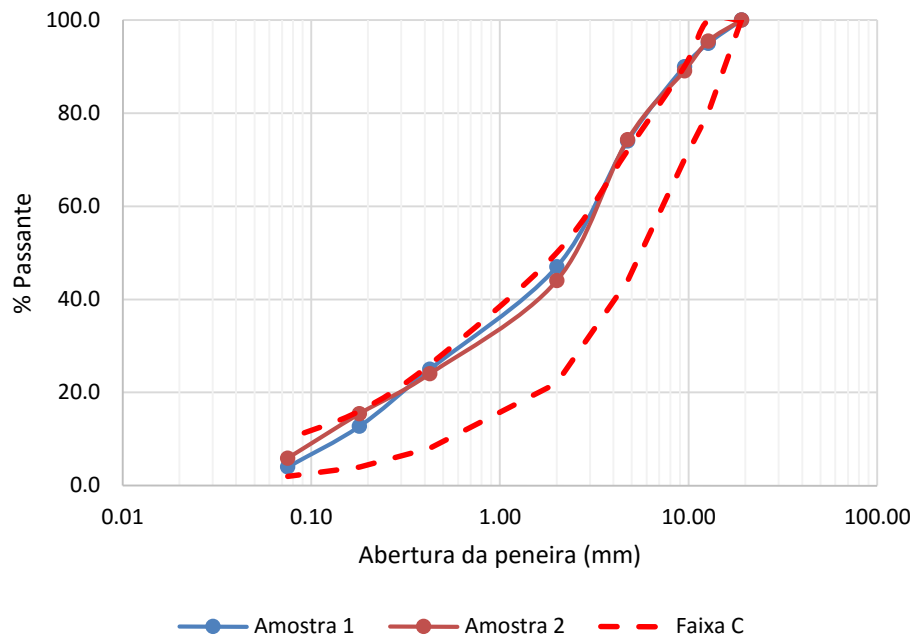
Figura 16 – Resultados – granulometria pré-extração do ligante.



Fonte: Próprio autor.

As curvas granulométricas do fresado após a extração do ligante se encontram na Figura 17. Devido a dificuldades na extração de ligante, não foi possível realizar o ensaio para sete amostras, mas somente para duas. Da mesma forma como antes da extração, é possível notar que há pouca variação entre as amostras. Verifica-se que as amostras se encontram dentro da faixa C, usualmente utilizada na cidade de Fortaleza.

Figura 17 – Resultados – granulometria pós-extração.



Fonte: Próprio autor.

4.1.2 Teor de ligante

Os resultados obtidos do ensaio de teor de ligante se encontram na Tabela 03. Pode-se observar a partir dos resultados obtidos que o teor de ligante de fresados de diferentes fontes é variável, como esperado.

Tabela 03 – Resultados – teor de ligante.

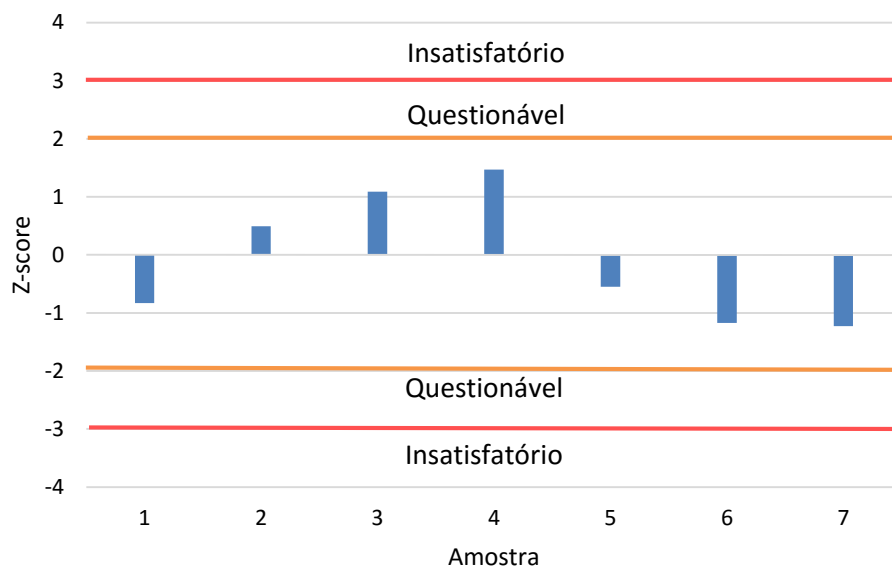
Amostra	Massa anterior a extração (g)	Massa posterior a extração (g)	Teor de ligante (%)
1	646,2	615,2	4,80
2	798,5	754,9	5,46
3	755,5	712,0	5,76
4	670,8	630,9	5,95
5	874,7	831,5	4,94
6	695,8	663,6	4,63
7	837,3	798,8	4,60
Média (%)			5,16
Desvio padrão (%)			0,51
Coeficiente de variação (%)			9,96

Fonte: Próprio autor.

De acordo com o parâmetro valor-p do teste, cujo valor foi de 0,383, a distribuição estatística dos dados de teor de ligante obtidos neste experimento seguem a curva de Gauss para $\alpha = 0,05$.

Os resultados do z-score, para a indicação de reprodutibilidade dos ensaios realizados, se encontram na Figura 18. Todos os valores de z-score calculados encontram-se na faixa aceitável, o que confirma que os dados são aceitáveis e seus valores podem ser reproduzidos se forem repetidos os procedimentos aqui realizados.

Figura 18 – Z-score – teor de ligante.



Fonte: Próprio autor.

4.1.3 Viscosidade

As viscosidades obtidas através do viscosímetro Brookfield encontram-se na Tabela 04. Foi observado que o material coletado possui ligantes em diferentes estados de envelhecimento, o que era esperado. Os resultados indicam, também, que um mesmo tipo de ligante deve ter sido utilizado em todas as fontes, pois apesar das disparidades nos resultados, não houve variação brusca da viscosidade, o que geralmente ocorre ao comparar um ligante com aditivos a um ligante sem aditivos.

Tabela 04 – Resultados – viscosidade.

Amostra	Viscosidade 135°C (Pa*s)	Viscosidade 150°C (Pa*s)	Viscosidade 177°C (Pa*s)
1	848	394	143
2	943	438	125
3	973	446	126
4	945	438	127
5	941	501	138
6	970	422	148
7	1,036	453	148
Média (Pa*s)	951	442	136
Desvio padrão (Pa*s)	60	30	10
Coefficiente de variação (%)	6,28%	6,81%	7,02%

Fonte: Próprio autor.

Foi analisada também a normalidade dos valores obtidos, tal como a repetitividade dos mesmos. Os resultados dos testes de normalidade se encontram na Tabela 05, enquanto os resultados dos z-scores calculados para cada temperatura, 135°C, 150°C e 177°C, se encontram, respectivamente, na Figura 19.

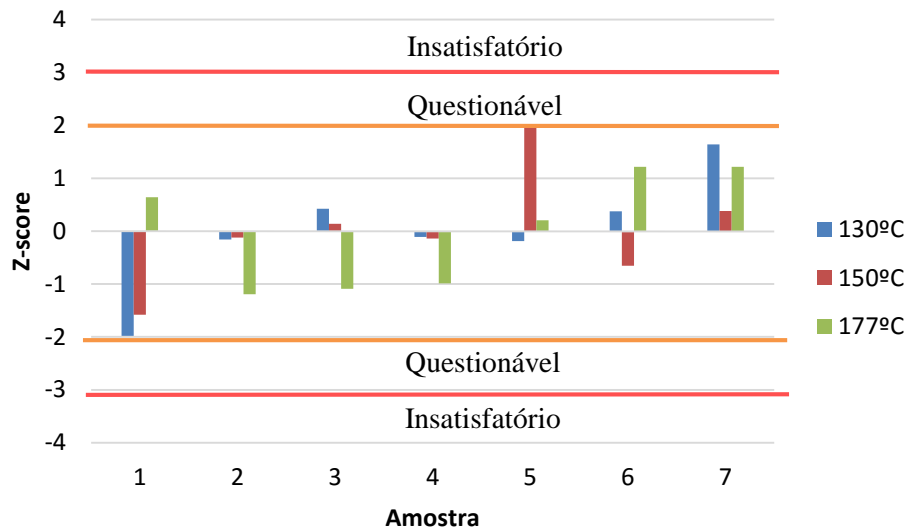
Tabela 05 – Resultados – testes de normalidade da viscosidade.

Shapiro-Wilk			
Temperatura	135°C	150°C	177°C
valor-p	0,014	0,028	0,001

Fonte: Próprio autor.

Os resultados dos testes de normalidade foram negativos para todas as temperaturas, o que rejeita a hipótese de normalidade dos dados de viscosidade. De posse dos resultados do z-score, é possível verificar que não há *outliers* dentro da amostra ensaiada.

Figura 19 – Z-score – viscosidade.



Fonte: Próprio autor.

4.2 Estudo de caso

4.2.1 Projeto de mistura

O teor de ligante de projeto foi escolhido a partir dos resultados apresentados na Tabela 06. Feito o ensaio de volume de vazios para três teores de ligantes diferentes, verificou-se para qual teor de ligante que o volume de vazios ficava na faixa de $4 \pm 0,4\%$

Tabela 06 – Resultados – teor de projeto.

Teor de ligante (%)	0% de fresado		15% de fresado	
	Amostra	V _v (%)	Amostra	V _v (%)
4,0	1	8,0	1	4,4
	2	7,1	2	4,3
4,5	3	5,5	3	3,1
	4	6,4	4	3,8
5,0	5	3,7	5	3,8
	6	4,1	6	2,6

Fonte: Próprio autor.

Os teores de projeto escolhidos foram de 5,0% para a mistura com 0% de fresado e de 4,0% para a mistura com 15% de fresado.

Os resultados de RAPBR estão apresentados na Tabela 07. Estes indicam que não há necessidade de alterar o ligante virgem inicialmente projetado, pois nenhum dos resultados foi maior que 17%, limite estipulado pelo MDOT (2011) para que não haja necessidade do uso de um ligante menos viscoso.

Tabela 07 – Resultados – RAPBR.

Amostra	Teor de ligante do RAP (%)	RAPBR (%)
1	4,80	13,08
2	5,46	14,89
3	5,76	15,70
4	5,95	16,22
5	4,94	13,47
6	4,63	12,62
7	4,60	12,54

Fonte: Próprio autor.

4.2.2 Impacto mecânico

Os volumes de vazios para a mistura com 0% de fresado se encontram na Tabela 08.

Tabela 08 – Resultados – Volume de vazios – 0% de fresado.

Teor de projeto		5,0%	Massa específica máxima		2,385
Amostra	Massa seca (g)	Massa imersa (g)	Massa saturada com superfície seca (g)	Massa específica aparente (g/cm ³)	Volume de vazios (%)
1	1140,6	645,9	1142,6	2,2964	3,7
2	1136,7	642,0	1138,7	2,2885	4,1
3	1142,8	645,7	1144,6	2,2906	4,0
4	1146,5	648,1	1149,5	2,2866	4,1
5	1145,3	647,2	1149,7	2,2792	4,4
6	1142,0	642,4	1145,1	2,2717	4,8
Média (%)					4,2
Desvio padrão (%)					0,3
Coeficiente de variação (%)					8,0

Fonte: Próprio autor.

Nota-se que apenas uma das amostras teve um volume de vazios fora do limite, enquanto para a mistura com 15% do fresado, duas amostras ultrapassaram o limite, como indicado na Tabela 09. Apesar de ter uma amostra a mais que ultrapassou o limite, a mistura com 15% de fresado mostrou-se com um volume de vazios tão variável quanto a mistura com 0% de fresado. O resultado vai contra o esperado, que seria haver uma maior variação no volume de vazios devido a variação no teor de ligante do fresado.

Tabela 09 – Resultados – Volume de vazios – 15% de fresado.

Teor de projeto		4,0%	Massa específica máxima		2,395
Amostra	Massa seca (g)	Massa imersa (g)	Massa saturada com superfície seca (g)	Massa específica aparente (g/cm ³)	Volume de vazios (%)
1	1139,3	644,9	1142,6	2,2891	4,4
2	1140,3	646,9	1144,3	2,2925	4,3
3	1143,4	643,8	1147,5	2,2700	5,2
4	1142,2	643,1	1144,5	2,2780	4,9
5	1145,6	648,1	1148,1	2,2912	4,3
6	1143,3	646,6	1145,2	2,2930	4,3
Média (%)					4,6
Desvio padrão (%)					0,4
Coeficiente de variação (%)					7,9

Fonte: Próprio autor.

Os resultados do ensaio de resistência a tração de ambas as misturas se encontram na Tabela 10. Nota-se um ganho de resistência no experimento quando houve adição de fresado na mistura, o que é esperado devido a ser um material mais rígido. Ambas as misturas apresentaram uma variação próxima uma da outra, o que indica que a variabilidade do fresado não afetou este ensaio específico.

Tabela 10 – Resultados – RT.

Amostra	% RAP	RT (MPa)	Amostra	% RAP	RT (MPa)
1	0	1,68	4	15	1,80
2		1,75	5		1,75
3		1,63	6		1,85
Média (MPa)		1,68	Média (MPa)		1,80
Desvio Padrão (MPa)		0,05	Desvio Padrão (MPa)		0,04
Coeficiente de variação (%)		2,85	Coeficiente de variação (%)		2,16

Fonte: Próprio autor.

No ensaio de MR (Tabela 11), houve, um acréscimo na resistência, porém ao contrário do ensaio de RT, houve um aumento da variabilidade com a adição do fresado.

Tabela 11 – Resultados – MR.

Amostra	% RAP	MR (MPa)	Amostra	% RAP	MR (MPa)
1	0	5638	4	15	8269
2		5192	5		10050
3		5895	6		7522
Média (MPa)		5575	Média (MPa)		8614
Desvio Padrão (MPa)		290	Desvio Padrão (MPa)		1060
Coeficiente de variação (%)		5,21	Coeficiente de variação (%)		12,31

Fonte: Próprio autor.

4.2.3 Impacto financeiro

A partir das considerações feitas para o estudo financeiro (Tabela 02), o volume de ligante necessário para cobrir todo o trecho é de 462m³, calculado através da extensão e da largura do trecho, da espessura do revestimento e do teor de ligante da mistura. A partir do valor de contribuição considerado para o ligante do fresado, calcula-se a quantidade necessária de ligante virgem para todo o trecho. Os resultados se encontram na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados – análise de custo.

Amostra	Massa do ligante do RAP (t)	Massa do ligante virgem (t)	Custo do ligante virgem (R\$)
1	62,26	413,60	785.841,80
2	70,86	405,00	769.494,36
3	74,72	401,14	762.157,60
4	77,19	398,67	757.464,03
5	64,10	411,76	782.351,19
6	60,06	415,80	790.021,61
7	59,67	416,19	790.752,81
Média	66,98	408,88	776.869,06

Fonte: Próprio autor.

O custo que o ligante teria caso o ligante do fresado não fosse considerado seria de R\$904.134,00. Ao considerar o ligante do fresado, o custo reduz, em média, 14,08%. Ao levar em consideração pilhas separadas de ligante, entretanto, o custo pode reduzir ainda mais, uma vez que se pode usar uma quantidade menor de ligante em pilhas de fresado com maiores teores. A maior redução de custo, 16,22%, se mostrou na amostra 4, enquanto a menor esteve na amostra 7, de 12,54%.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Segundo o estudo realizado sobre o fresado asfáltico proveniente da RMF, foi possível notar que há necessidade de melhora quanto ao armazenamento e uso deste material a fim de otimizar e possibilitar o seu maior uso em revestimentos asfálticos. Estão listados a seguir as principais conclusões que foram observadas com a análise da variabilidade do fresado asfáltico.

- Os resultados do ensaio de teor de ligante do fresado mostraram que existe uma diferença considerável de teores dentro de um mesmo material. A amostra 7 apresentou o valor mais baixo, 4,60%, enquanto a amostra 4 apresentou o valor mais alto, 5,95%. Esta variação de teor de ligante e sua não consideração na mistura asfáltica pode levar a mesma a ter um excesso de ligante, o que, por sua vez, pode gerar exsudação.
- O ensaio de viscosidade do ligante envelhecido mostrou que, por serem de diferentes fontes, os ligantes presentes nos fresados apresentaram um grau de envelhecimento diferente, possuindo um coeficiente de variação de até 7,02% na temperatura de 177°C. A variabilidade da viscosidade acarreta uma dificuldade no aumento do uso do fresado asfáltico, pois o ligante envelhecido apresentará uma maior resistência à compactação quando comparado com o ligante virgem, fazendo com que seja necessário aumentar a temperatura de compactação.
- Os resultados do volume de vazios e da resistência a tração indireta indicaram que a variação da percentagem do fresado não interferiu nestes parâmetros, ao contrário do resultado de módulo de resiliência, que foi afetado pelo uso do fresado. Devido ao número restrito de corpos-de-prova e de material, entretanto, não foi possível confirmar se estes resultados são representativos, sendo necessário ensaiar um maior número de amostras.
- Os resultados do estudo financeiro mostraram que há um ganho ao utilizar fresados asfálticos com teor de ligante conhecido na reciclagem a quente e na reciclagem morna. O estudo, apesar de suas limitações, uma vez que não leva em consideração a contribuição do fresado asfáltico como agregado, ou seja, a redução na quantidade de agregado virgem devido ao fresado, e não leva em consideração outros aspectos, tal como custo logístico, mostra uma diferença de 3,68% entre a maior e a menor redução de custo. Esta diferença mostra o benefício

econômico de um melhor controle de qualidade do processamento e armazenamento do fresado asfáltico.

Muitas variáveis devem ser levadas em consideração ao analisar materiais da pavimentação asfáltica e, como observado no estudo, há necessidade de maior cuidado com determinados materiais, tal como o fresado asfáltico. Com o intuito de ampliar o conhecimento sobre o material, são propostas algumas sugestões para trabalhos futuros.

- Analisar de forma aprofundada parâmetros volumétricos e mecânicos de misturas asfálticas compostas por fresados com diferentes teores de ligante.
- Analisar a viabilidade físico-financeiro do uso do controle estatístico de qualidade do fresado asfáltico.
- Comparar a variabilidade do fresado asfáltico com a variabilidade de materiais virgens.

REFERÊNCIAS

- [CURVA NORMAL]. Altura: 512 pixels. Largura: 757 pixels. 39kb. Formato JPEG. Disponível em: <<http://alexandreprofessor.blogspot.com.br/p/probabilidade-e-distribuicoes-de.html>> Acesso em: 01 jun. 2015
- [MÁQUINA FRESADORA]. Altura: 413 pixels. Largura: 1049 pixels. 135kb. Formato JPEG. Disponível em: <<http://asfaltodequalidade.blogspot.com.br/2012/12/fresadoras-de-asfalto.html>> Acesso em: 15 mai. 2015
- [TIPOS DE CILINDRO DE CORTE]. Altura: 293 pixels. Largura: 867 pixels. 87kb. Formato JPEG. Disponível em: <<http://asfaltodequalidade.blogspot.com.br/2012/12/fresadoras-de-asfalto.html>> Acesso em: 15 mai. 2015
- [TIPOS DE FRESAGEM]. Altura: 380 pixels. Largura: 867 pixels. 82kb. Formato JPEG. Disponível em: <<http://asfaltodequalidade.blogspot.com.br/2012/12/fresadoras-de-asfalto.html>> Acesso em: 15 mai. 2015
- 11º Balanço do PAC2. **Ministério do Planejamento**. Disponível em: <<http://www.pac.gov.br/sobre-o-pac/divulgacao-do-balanco/balanco-completo>>. Acesso em: 05 mai. 2015.
- ADCOCK, M. *et al.* **A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary**. National Cooperative Highway Research Program Report 673, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- AL-QADI, I. *et al.* **Reclaimed asphalt pavement – a literature review**. 2007.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 2041**: Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures. West Conshohocken, PA, 2003.
- _____. **ASTM D 1188**: Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Bituminous Mixtures Using Coated Samples. West Conshohocken, PA, 2007.
- D'ANGELO, J. *et al.* **Warm-Mix Asphalt: European Practice**. Alexandria, VA, 2008.
- ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION. **Basic Asphalt Recycling Manual**. Annapolis, MD, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15087**: Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2012.
- _____. **NBR 15184**: Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 16018**: Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida. Rio de Janeiro, 2011.
- _____. **NBR 16208**: Misturas Asfálticas – Determinação do teor de betume pelo Soxhlet, pelo Rotarex e pelo reflexo duplo. Rio de Janeiro, 2008.

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica – Formação básica para engenheiros.** 1º ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2010.

BONFIM, V. **Estudo da granulometria resultante da fresagem de revestimentos asfálticos com vistas à reciclagem “in situ” a frio.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, São Paulo, 1999.

BONFIM, V. **Fresagem de pavimentos asfálticos.** São Paulo, SP, 2011.

CASTILLO, D.; CARO, S.; SÁNCHEZ-SILVA, M. **Methodology to Model the Uncertainty of Material Properties in Asphalt Pavements.** 2014. Journal of Materials in Civil Engineering, American Society of Civil Engineering, Bogotá, Colômbia.

COSTA, A. F. B.; EPPRECHT, E. K.; CARPINETTI, L. C. R. **Controle estatístico de qualidade.** 2.ed. São Paulo: Atlas, 2011.

DAVID, D. **Misturas asfálticas recicladas a frio: estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsionado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNER-ME 083: Agregados – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1998.

EIDLEMAN, G. J. **Z scores – A guide to failure prediction.** The CPA Journal, 1995.

HUANG, B. *et al.* **Laboratory Investigation of Mixing Hot-Mix Asphalt with Reclaimed Asphalt Pavement.** Transportation Research Record 1929, 2005

LOPES, M. M. **Avaliação de durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado.** Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2015.

LOPES, M. M. **Programa interlaboratorial de agregados e misturas asfálticas da rede asfalto N/NE.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

MICHIGAN DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **15SP501 (E):** Recycled hot mix asphalt mixture on local agency projects. Michigan, 2014

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos.** 2. ed. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2015.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade.** 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

NAKAMURA, J. Pavimentação asfáltica. **PINI.** São Paulo, v. 16, 2011. Disponível em <<http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/16/pavimentacao-asfaltica-os-tipos-de-revestimentos-o-maquinario-necessario-260588-1.aspx>>. Acesso em: 05 mai. 2015.

OLIVEIRA, J. A. **Avaliação do desempenho de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e em campo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

PINTO, C. S. **Reutilização de material asfáltico fresado: avaliação da potencialidade de utilização em aterros rodoviários.** 2010. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

RYAN, T. P. **Statistical Methods for Quality Improvement.** 3ª ed. Nova Jersey: JOHN WILEY & SONS, INC. 2011.

SANDERS, N. R; REID, R. D. **Operations Management.** 5ª Ed. Nova Iorque: JOHN WILEY & SONS, INC., 2012.

TRIOLA, M. F. **Introdução à Estatística.** 10ª Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC.

WARGHA FILHO, N. **Avaliação da influencia da redução das temperaturas de usinagem e de compactação no comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

WEST, R, C. **Reclaimed Asphalt Pavement Management: Best Practices.** NCAT Report. Auburn University, 2010.

WEST, R.; KVASNAK, A.; TRAN, N.; POWELL, B.; TURNER, P. **Testing of Moderate and High Reclaimed Asphalt Pavement Content Mixes.** Transportation Research Record 2126, 2009.

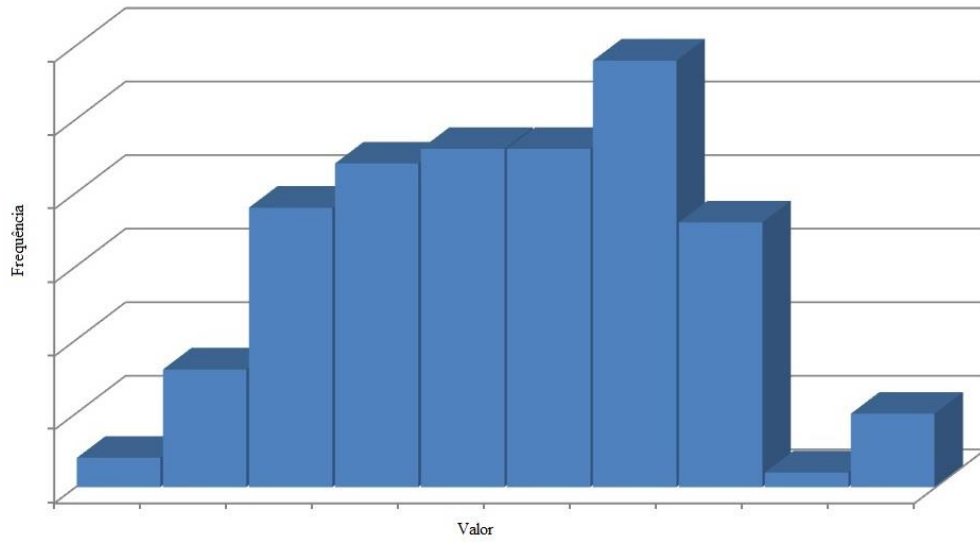
YODER, E. J; WITCZAK, M. W. **Principles of Pavement Design.** 2ª ed. Nova Iorque: JOHN WILEY & SONS, INC., 1975.

ZHOU, F. *et al.* **RAP Stockpile management and processing in Texas: State of the practice and proposed guidelines.** Texas Transportation Institute Project 0-6092-1, 2010.

ZUBARAN, M. **Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e usina de asfalto.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

ANEXO A – FERRAMENTAS DO CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO

1. Histograma



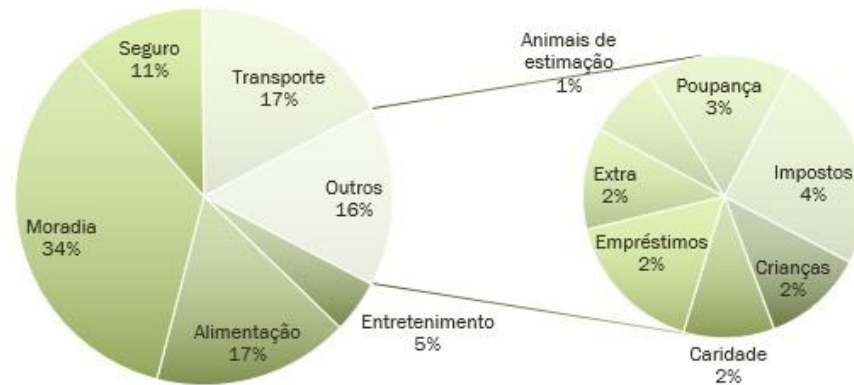
Fonte: Adaptado de <http://citisystems.com.br/wp-content/uploads/2012/12/histograma-industria.png>.

2. Folha de controle

Visão geral do orçamento

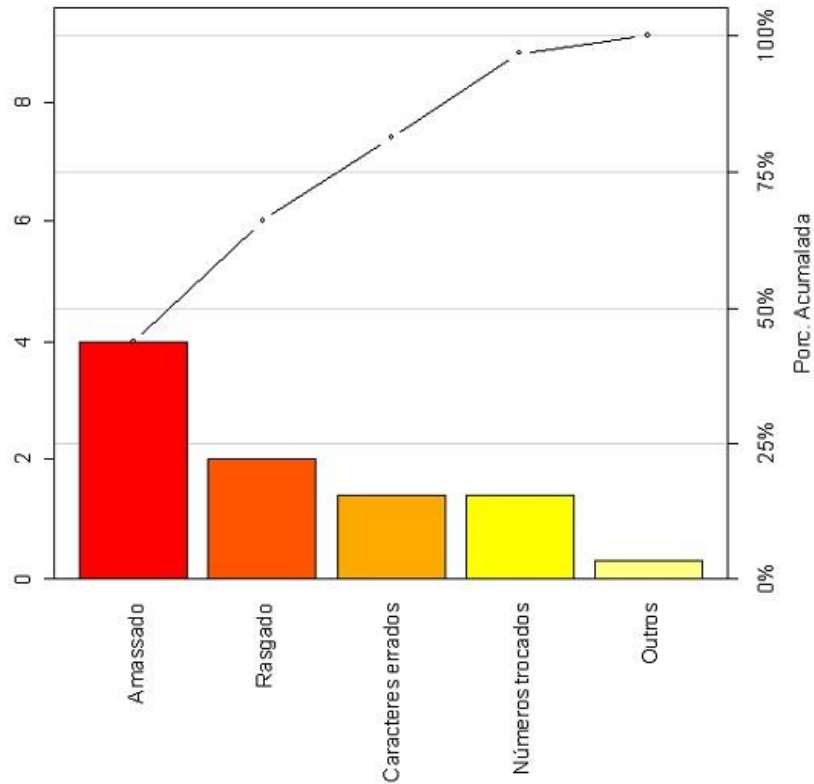
Saldo		
Saldo projetado (R\$)	(Projetado menos despesas)	1585.00
Saldo real (R\$)	(Atual menos despesas)	1740.00
Diferença	(Atual menos projetado)	155.00

Renda		Despesas	
Real	Renda 1 (R\$)	5800.00	Real (R\$)
	Renda 2 (R\$)	2300.00	
	Renda extra (R\$)	1500.00	
	Renda Total (R\$)	9600.00	
Projetada	Renda 1 (R\$)	6000.00	Projetada (R\$)
	Renda 2 (R\$)	1000.00	
	Renda extra (R\$)	2500.00	
	Renda Total (R\$)	9500.00	



Fonte: Próprio autor.

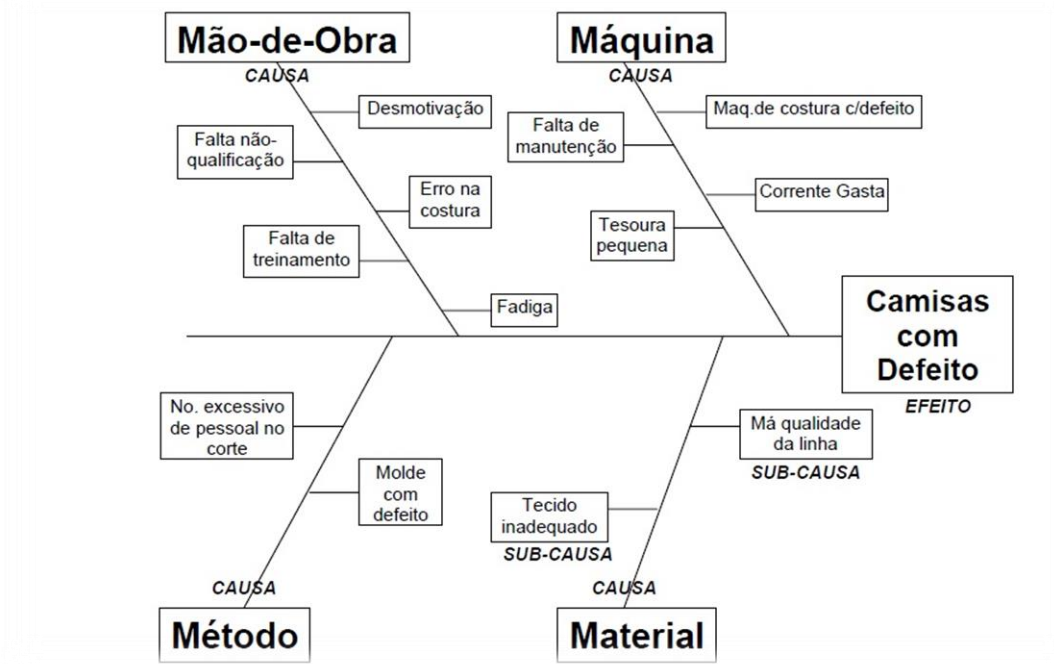
3. Gráfico de pareto



Fonte:

http://www.portalaction.com.br/sites/default/files/EstatisticaBasica/figuras/nocoos/Pareto_custos.PNG

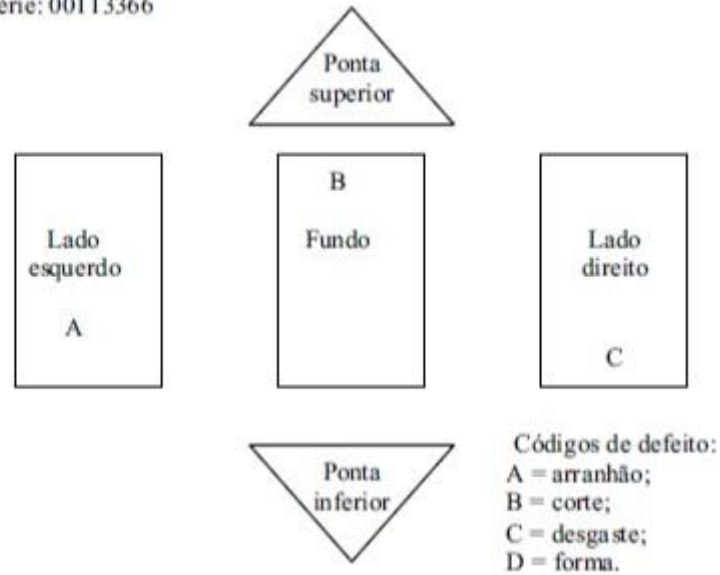
4. Diagrama de causa-e-efeito



Fonte: <https://ferramentasadministrativas.files.wordpress.com/2012/05/causa-e-efeito.jpg>

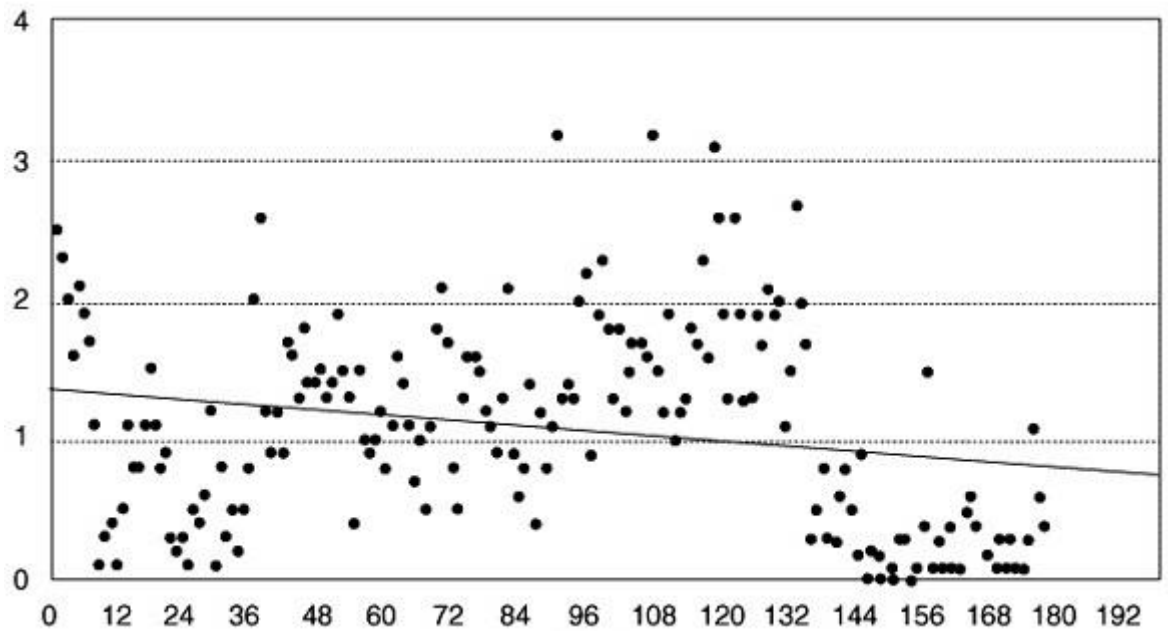
5. Diagrama de concentração de defeito

Número do tanque: 0617
Número de série: 00113366



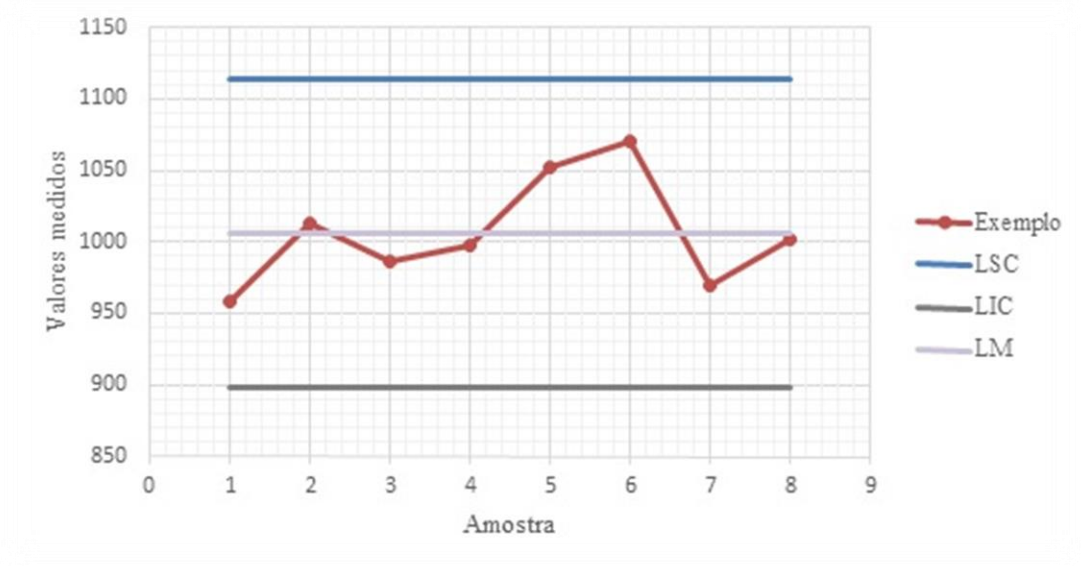
Fonte: http://www.professores.uff.br/luciane/images/stories/Arquivos/ECQ/ecq_1.pdf.

6. Diagrama de dispersão



Fonte: Adaptado de <http://www.scielosp.org/img/fbpe/rpsp/v1n5/0413f2.gif>.

7. Gráfico de controle



Fonte: Próprio autor.