

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

JULIANO DE ALMEIDA ZACARIAS

**ANÁLISE MICROESTRUTURAL DE UM PAVIMENTO ASFÁLTICO DO MUNICÍPIO DE
ALEGRETE ATRAVÉS DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS**

**Alegrete
2023**

JULIANO DE ALMEIDA ZACARIAS

**ANÁLISE MICROESTRUTURAL DE UM PAVIMENTO ASFÁLTICO DO MUNICÍPIO DE
ALEGRETE ATRAVÉS DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS**

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

Orientador: Diego Arthur Hartmann

**Alegrete
2023**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

ZZ13aa Zacarias, Juliano de Almeida

Análise microestrutural de um pavimento asfáltico do município de Alegrete através do processamento digital de imagens / Juliano de Almeida Zacarias.

80 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA CIVIL, 2023.

“Orientação: Diego Arthur Hartmann”.

1. Processamento digital de imagens. 2. Análise microestrutural. 3. Propriedades granulométricas. 4. Misturas asfálticas. 5. ImageJ. I.Título.

JULIANO DE ALMEIDA ZACARIAS

ANÁLISE MICROESTRUTURAL DE UM PAVIMENTO ASFÁLTICO DO MUNICÍPIO DE ALEGRETE ATRAVÉS DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

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

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 25 de janeiro de 2023.

Banca examinadora:

Prof. Dr. DIEGO ARTHUR HARTMANN - UNIPAMPA - Orientador

Prof. Dr. JAELSON BUDNY- UNIPAMPA

Prof. Me. MAURICIO SILVEIRA DOS SANTOS - UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **DIEGO ARTHUR HARTMANN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/02/2023, às 18:45, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **JAELSON BUDNY, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/02/2023, às 22:55, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MAURICIO SILVEIRA DOS SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/02/2023, às 16:16, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1047334** e o código CRC **4E451643**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus pela minha vida, por me propiciar muita saúde física e mental durante toda a graduação, e também, por todas as oportunidades que tive em minha trajetória até chegar à conclusão desta etapa tão importante.

Agradeço a minha família pelo apoio incondicional, sem eles eu não teria chegado até aqui. Em especial aos meus pais, Rosimar e Rosa, por terem sido a minha base para tudo, principalmente no incentivo e apoio aos estudos e a planejar meu futuro. Agradeço também ao meu irmão Lucas e a minha cunhada Rosi, pelas inúmeras caronas no traslado até a Unipampa e pelos momentos de companheirismo e descontração, fazendo eu sair um pouco da árdua rotina de estudos.

Sou extremamente grato à minha namorada Carolina, por tornar meus dias mais leves, estar sempre ao meu lado me apoiando quando preciso, e ter muita paciência e compreensão, com relação a minha ausência em vários momentos em que os estudos requeriam minha total atenção e dedicação.

Agradeço a todos os amigos que fiz durante a graduação, em especial ao Felipe Campos, Gabriel Denardin, Jacson Soares, João Vitor Brasil, Rafael Perius e Thiago Dutra. Desde o início do curso a nossa amizade só cresceu, e é graças a nossa parceria e a troca de conhecimento durante as longas rodas de estudo, que estou concluindo a graduação. Serei eternamente grato por tudo que fizeram por mim.

Agradeço a empresa Construtora Alegretense pela doação da mistura asfáltica utilizada nesta pesquisa e por permitir o acompanhamento da obra de pavimentação da via. Agradeço ao engenheiro Bento Bica, por toda a ajuda prestada durante a realização desta pesquisa, principalmente a de intermediar as conversas entre eu e a empresa, e por me auxiliar na etapa de extração das amostras em campo. E agradeço também a Prefeitura Municipal de Alegrete, por permitir a extração de amostras em via pública e por fornecer acesso aos seus projetos de infraestrutura.

Agradeço enormemente ao meu orientador, professor Dr. Diego Hartmann, pela importante participação na minha trajetória acadêmica, por dispor do seu tempo, muita paciência e atenção sempre que lhe procurei com dúvidas e por ter se tornado um grande exemplo de tutor e amigo.

Por fim, agradeço especialmente à Universidade Federal do Pampa Campus Alegrete e a todos os seus professores e colaboradores, cada um deles tem uma parcela de contribuição na minha formação acadêmica. Sempre serei grato a todos!

“Os sonhos não determinam o lugar que você vai estar, mas produzem a força necessária para o tirar do lugar em que está”.

Augusto Cury

RESUMO

Este estudo tem como objetivo, determinar a viabilidade de se utilizar o processamento digital de imagens para analisar a granulometria, orientação e distribuição de agregados em amostras de misturas asfálticas. Os corpos de prova utilizados nesta pesquisa foram obtidos de duas maneiras, 4 amostras foram moldadas em campo utilizando o método de compactação Marshall e as outras 4 foram extraídas com o auxílio de uma sonda rotativa, de um pavimento asfáltico compactado por rolos tandem e pneumáticos. Tais amostras foram levadas ao laboratório, onde foram identificadas, seccionadas em fatias finas e escaneadas em uma impressora multifuncional, onde as seções das mesmas foram digitalizadas. Após isso, as imagens foram processadas com o auxílio do software ImageJ e as propriedades de área, descrição de forma, fração de área, centroide, e diâmetro de Feret de cada uma das partículas foram obtidas, esses dados foram organizados e os resultados processados. Como resultados, a análise da granulometria das imagens das amostras mostrou que, as moldadas apresentaram granulometrias bem similares em todas as suas fatias, já as extraídas, apresentaram granulometrias mais distintas entre suas fatias e com distribuição desigual, porém, ambas as amostras tiveram curvas granulométricas que não foram coincidentes com a curva de projeto. Ambos os tipos de amostras apresentaram distribuição das orientações similares e não sofreram influência direta do método de compactação nestes parâmetros. Os resultados também mostraram que pode ter ocorrido segregação na execução do pavimento asfáltico do qual as amostras foram extraídas, mas devido a propriedades granulométricas incertas, esse fato foi considerado inconclusivo. Contudo, conclui-se que o processamento digital de imagens é um método promissor, podendo se tornar eficaz para a análise das propriedades de misturas asfálticas, porém necessita de algumas melhorias para se obter resultados ainda mais significativos e alcançar tal objetivo.

Palavras-Chave: Processamento digital de imagens; Análise microestrutural; Propriedades granulométricas; Misturas asfálticas; ImageJ.

ABSTRACT

This study aims to determine the feasibility of using digital image processing to analyze the granulometry, orientation and distribution of aggregates in samples of asphalt mixtures. The specimens used in this research were obtained in two ways, 4 samples were molded in the field using the Marshall compaction method and the other 4 were extracted with the aid of a rotary probe, from an asphalt pavement compacted by tandem and pneumatic rollers. Such samples were taken to the laboratory, where they were identified, sectioned into thin slices and scanned in a multifunctional printer, where the sections were digitized. After that, the images were processed with the help of ImageJ software and the area properties, shape description, area fraction, centroid, and Feret diameter of each of the particles were obtained, these data were organized and the results processed. As a result, the analysis of the granulometry of the images of the samples showed that the molded ones presented very similar granulometries in all their slices, whereas the extracted ones, presented more distinct granulometries between their slices and with unequal distribution, however, both samples had granulometric curves that were not coincident with the design curve. Both types of samples showed similar distribution of orientations, with no direct influence of the compaction method on these parameters. The results also showed that segregation may have occurred in the execution of the asphalt pavement from which the samples were extracted, but due to uncertain granulometric properties, this fact was considered inconclusive. However, it is concluded that digital image processing is a promising method, which can become effective for the analysis of properties of asphalt mixtures, but it needs some improvements to obtain even more significant results and achieve this goal.

Keywords: Digital image processing; Microstructural analysis; Granulometric properties; Asphalt mixtures; ImageJ.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Propriedades de forma dos agregados.	19
Figura 2 - Definição da orientação das partículas de agregados.	21
Figura 3 - Cortes em amostras para análise.	24
Figura 4 - Utilização da tomografia computadorizada para análise de vazios em amostras.	26
Figura 5 - Interface principal do ImageJ/Fiji.	30
Figura 6 - Organização dos <i>plugins</i> na interface do ImageJ/Fiji.	31
Figura 7 - Processamento digital de imagens sendo realizado.	33
Figura 8 - Distância da usina até o local da obra.	34
Figura 9 - Rua Barão do Rio Branco.	36
Figura 10 - Processo de compactação Marshall em campo.	37
Figura 11 - Extrator de amostras.	38
Figura 12 - Amostras desmoldadas e identificadas.	38
Figura 13 - Máquina extratora.	39
Figura 14 - Extração sendo realizada (A) e amostra extraída (B).	40
Figura 15 - Amostras extraídas e identificadas.	41
Figura 16 - Serra de mesa utilizada para o fatiamento das amostras.	42
Figura 17 - Amostra durante o processo de serragem (A) e após ser serrada (B). ...	42
Figura 18 - Amostra sendo digitalizada (A) e resultado da digitalização (B).	43
Figura 19 - Diagrama das etapas do processamento de imagens.	44
Figura 20 – Interface para ajuste da escala das imagens.	45
Figura 21 – Antes (A) e depois (b) da aplicação do filtro mediano nas imagens.	45
Figura 22 - Comparação entre a imagem original (A) e a binária (B).	47
Figura 23 - Seleção das propriedades a serem analisadas.	47
Figura 24 - Identificação e numeração das partículas pelo software ImageJ.	48
Figura 25 - Representação da definição de diâmetro de Feret.	49
Figura 26 - Representação do processo de fatiamento das amostras moldadas.	52
Figura 27 - Representação do processo de fatiamento das amostras extraídas.	52
Figura 28 - Curvas granulométricas das amostras moldadas.	53
Figura 29 - Curvas granulométricas das amostras extraídas.	54
Figura 30 - Sobreposição das áreas das amostras com a curva de projeto.	55
Figura 31 - Orientação das partículas das amostras moldadas.	57

Figura 32 - Orientação das partículas das amostras extraídas.	58
Figura 33 - Curvas granulométricas das médias de topo, meio e base das amostras moldadas.....	60
Figura 34 - Curvas granulométricas de médias de topo, meio e base das amostras extraídas.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Curva granulométrica de projeto e limites de tolerância.....	35
Tabela 2 - Curva granulométrica redistribuída.	50

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AIMS – *Aggregate Image Measurement System*

CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

PDI – Processamento Digital de Imagens

SGC – *Superpave Giratory Compactor*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivo geral.....	15
1.2	Objetivos específicos.....	15
1.3	Justificativa.....	15
1.4	Organização do trabalho.....	16
2	CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1	Influência da microestrutura no comportamento de misturas asfálticas..	18
2.1.1	Propriedades dos agregados e pontos de contato entre as partículas.....	19
2.1.2	Orientação e segregação das partículas de agregados.....	20
2.2	Obtenção de imagens digitais de amostras.....	23
2.2.1	Escaneamento 2D.....	23
2.2.2	Tomografia computadorizada.....	25
2.2.3	<i>Serial sectioning</i>	27
2.3	Processamento Digitais de Imagens (PDI).....	28
2.3.1	Principais técnicas de PDI.....	29
2.3.2	Software ImageJ.....	30
2.3.3	Aplicação de PDI para caracterizar agregados e misturas asfálticas....	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	Materiais.....	34
3.1.1	Ligante.....	35
3.1.2	Agregados.....	35
3.1.3	Software.....	35
3.2	Metodologia.....	36
3.2.1	Compactação da pista e das amostras Marshall.....	37

3.2.2	Extração das amostras	39
3.2.3	Tratamento das amostras	41
3.2.4	Análise das imagens	43
3.2.4.1	Processo inicial de análise	43
3.2.4.2	Análise granulométrica	49
3.2.4.3	Análise da orientação das partículas.....	50
3.2.4.4	Análise da distribuição/segregação das partículas.....	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.1	Análise granulométrica	53
4.2	Análise da orientação das partículas.....	56
4.3	Análise da distribuição/segregação das partículas.....	59
5	CONCLUSÕES	62
5.1	Considerações finais.....	62
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	63
	REFERÊNCIAS.....	64
	APÊNDICE A – DADOS E DIMENSÕES DAS AMOSTRAS MOLDADAS NO PROCESSO DE FATIAMENTO.....	67
	APÊNDICE B – DADOS E DIMENSÕES DAS AMOSTRAS EXTRAÍDAS NO PROCESSO DE FATIAMENTO.....	69
	APÊNDICE C – IMAGENS DIGITALIZADAS DAS AMOSTRAS MOLDADAS	70
	APÊNDICE D – IMAGENS DIGITALIZADAS DAS AMOSTRAS EXTRAÍDAS	74
	APÊNDICE E – CURVAS GRANULOMÉTRICAS TOTAIS DO TOPO, MEIO E BASE DAS AMOSTRAS MOLDADAS.....	78
	APÊNDICE F – CURVAS GRANULOMÉTRICAS TOTAIS DO TOPO, MEIO E BASE DAS AMOSTRAS EXTRAÍDAS.....	79
	ANEXO A – PROPRIEDADES DA MISTURA ASFÁLTICA FAIXA C	80

1. INTRODUÇÃO

Segundo Bernucci *et al.* (2006), as principais rodovias do Brasil utilizam pavimentos de concreto asfáltico para revestir e propiciar melhores condições de trafegabilidade para os veículos, fazendo com que o principal sistema modal de transporte do país seja capaz de suprir suas demandas. Para Masad (1999), essas misturas asfálticas são materiais compósitos heterogêneos constituídos de ligante asfáltico, agregados graúdos, agregados miúdos, filer e vazios. Por serem heterogêneos, o comportamento mecânico desses materiais depende das propriedades particulares de cada um de seus componentes, principalmente se tratando dos agregados, devido as suas características de forma, posição e orientação dentro da mistura.

Vasconcelos, Evangelista Jr e Soares (2005) afirmam que os agregados arrançados na mistura asfáltica formam o esqueleto mineral, que é responsável por dar sustentação ao pavimento e distribuir as cargas advindas do tráfego de veículos por meio dos pontos de contato entre as partículas. Diversos pesquisadores vêm buscando entender melhor como o comportamento individual de cada partícula influencia e representa no desempenho global do material.

Bessa (2012) diz que a caracterização dos agregados pode ser feita utilizando equipamentos simples, mas dependem de um processo manual que leva um tempo considerável para ser realizado. Esse e outros fatores fazem com que aumente a procura por processos rápidos e que sejam fáceis de acessar através do computador, e é o avanço da tecnologia que favorece o aprimoramento dessas técnicas e torna isso possível.

Uma das alternativas encontradas para resolver essas limitações práticas e otimizar o processo, é a análise digital de imagens. Nesse método, as amostras podem ser analisadas de forma geral tendo uma abrangência de toda a microestrutura granular, ou de forma com que o estudo seja focado apenas nas partículas de agregados, analisando suas propriedades microestruturais isoladamente e as atribuindo aos decorrentes comportamentos mecânicos do pavimento.

Deste modo, esta pesquisa tem como proposta a análise das propriedades microestruturais de misturas asfálticas reais, por meio do processamento de imagens digitais. Com o auxílio de um software, as propriedades granulométricas dos

agregados serão mensuradas e a caracterização do material será feita por meio de um computador.

1.1. Objetivo geral

Determinar a viabilidade de analisar as propriedades geométricas de amostras de revestimentos asfálticos por meio de processamento de imagens através do software ImageJ/Fiji, comparando-as as idealizadas no projeto de pavimentação da via analisada.

1.2. Objetivos específicos

- Verificar virtualmente a granulometria das partículas utilizando o processamento digital de imagens;
- Verificar virtualmente a orientação das partículas que compõem as microestruturas, utilizando o processamento digital de imagens;
- Analisar a influência dos métodos de compactação Marshall e com rolos na orientação e na distribuição/segregação das partículas.

1.3. Justificativa

A maioria das vias pavimentadas no Brasil empregam revestimentos asfálticos como parte da infraestrutura para facilitar o transporte de veículos e atender a população de uma forma geral. A situação da maioria das rodovias brasileiras é considerada de média a ruim, e isso se dá pela falta de manutenção das vias existentes, falta de investimento em novas vias, utilização de matéria prima de baixa qualidade, erros nos processos de dimensionamento e execução dos pavimentos, entre vários outros.

Uma das formas de verificação das propriedades e de defeitos na estrutura interna dos pavimentos existentes é através de ensaios, que em sua maioria são destrutivos e necessitam da retirada de amostras de campo. As amostras são então levadas a um laboratório para serem ensaiadas. Este processo leva tempo e requer mão de obra treinada e equipamentos específicos para ser executado.

O processamento digital de imagens é uma forma ágil de análise de amostras de pavimentos, onde se é capaz de investigar microestruturalmente a mistura e isoladamente cada partícula de agregado que a compõem. Esse tipo de estudo reduz

o tempo da investigação e pode ser realizado em um computador razoavelmente moderno, fazendo com que esse processo se torne cada vez mais chamativo para análises de misturas asfálticas.

Portanto, ter conhecimento das propriedades das misturas asfálticas e de seus componentes é de grande valia, pois nosso país tem o modal rodoviário como seu principal meio de transporte e escoamento de produtos. Logo, pesquisas relacionadas a esta área são de extrema importância, ainda mais quando se aliam conhecimentos práticos convencionais à tecnologia, como é o caso do processamento digital de imagens, eles são de grande relevância para o desenvolvimento tecnológico, social e econômico do Brasil.

1.4. Organização do trabalho

No Capítulo 1 é apresentada a introdução, objetivo geral e objetivos específicos da pesquisa, justificativa, e como a estruturação do presente trabalho foi adotada.

O Capítulo 2 contém os conceitos gerais e a revisão da literatura, onde encontra-se uma breve apresentação e descrição dos temas pertinentes ao assunto abordado.

No Capítulo 3 são expostos os materiais e métodos, onde a metodologia adotada para o estudo é descrita e toda a sequência lógica empregada no processamento das imagens também é apresentada.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos na pesquisa deste trabalho e as suas respectivas discussões.

No Capítulo 5 é onde as conclusões do estudo são feitas, abordando a análise da representatividade dos resultados e a influência da utilização do processamento digital de imagens nos mesmos.

Por fim, são citadas as referências, apêndices e anexos.

2. CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

Pavimento é a parte estrutural de uma rodovia, composto por camadas de espessuras finitas que recebe os esforços advindos do tráfego de veículos e do clima, por isso ele deve ser técnico e economicamente capaz de suportar essas cargas e proporcionar melhores condições de rolamento, segurança e conforto aos seus usuários (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Segundo o DNIT (2006), os pavimentos podem ser classificados em flexíveis, semirrígidos e rígidos. Os pavimentos flexíveis são aqueles nos quais se aplicado um carregamento, os esforços irão se distribuir em parcelas equivalentes por todas as camadas que os constituem, e conseqüentemente, todas elas irão sofrer deformações elásticas significativas. Os principais exemplos desses tipos de pavimentos são aqueles que apresentam uma base de pedra britada ou de solo pedregulhoso, revestidos por uma camada asfáltica.

O DNIT (2006) ainda afirma que, os pavimentos semirrígidos podem ser caracterizados por apresentarem uma base que utiliza algum aglutinante para realizar a cimentação da mesma, como por exemplo um solo cimento revestido por uma camada asfáltica. Já os rígidos têm por característica principal, utilizar um revestimento de elevada rigidez com relação às camadas subsequentes, e por conta disso, acaba absorvendo basicamente todas as tensões advindas dos esforços neles aplicados. As estruturas de pavimentação compostas por lajes de concreto de cimento Portland são os principais exemplos de pavimentos rígidos.

Em geral, os pavimentos asfálticos são compostos por quatro camadas básicas, sendo a mais superficial o revestimento asfáltico, o qual se apoia sobre as demais camadas que são formadas geralmente por materiais granulares ou misturas de solos, que podem conter adições cimentantes ou não, essas camadas são denominadas de base, sub-base e reforço do subleito (BERNUCCI *et al.*, 2006).

A estruturação das camadas pode sofrer algumas alterações dependendo das condições de resistência do subleito e das solicitações que serão impostas na rodovia. Medina e Motta (2005) consideram o reforço do subleito uma camada adicional, que só é utilizada para melhorar a capacidade de suporte do solo de subleito e conseqüentemente, diminuir a espessura das camadas acima no processo de dimensionamento. Bernucci *et al.* (2006) afirmam que o revestimento asfáltico também pode ser formado por camadas intermediárias ou de ligação que são adicionadas sob

a camada superficial de rolamento, denominadas de binder. Essa camada adicional de ligação geralmente apresenta índices de vazios maiores que a de rolagem e tem como principal finalidade diminuir o teor de ligante e tornar a massa asfáltica economicamente mais barata.

2.1. Influência da microestrutura no comportamento de misturas asfálticas

Segundo Masad (1999), as misturas asfálticas são materiais heterogêneos compostos por ligante asfáltico, agregados finos, agregados graúdos, vazios de ar e partículas finas, onde cada um desses componentes apresentam propriedades e características diferentes quando submetidos à esforços. Wang (2010) define a microestrutura de um concreto asfáltico como sendo a composição, configuração e distribuição de três microcontínuos dentro da amostra, são eles, os agregados, ligante e vazios. Ele afirma ainda que a microestrutura asfáltica não se limita à visualização microscópica, pois um ser humano consegue distinguir a olho nu os agregados na mistura e suas fases distintas.

A microestrutura das misturas asfálticas tem influência de muitos fatores, como a qualidade do ligantes asfáltico utilizado, granulometria e forma dos agregados, e qualidade de compactação (YUE, BEKING e MORIN, 1995). O esqueleto mineral dos concretos asfálticos é formado a partir do arranjo e distribuição espacial, distribuição direcional e pontos de contato das partículas de agregados. Essas distribuições dependem diretamente das propriedades e das proporções dos materiais utilizados na mistura, além de ter uma influência direta do tipo e grau de compactação aplicado nas mesmas (VASCONCELOS, EVANGELISTA JR e SOARES, 2005).

Vasconcelos, Evangelista Jr e Soares (2005) afirmam que as propriedades mecânicas e de resistência aos defeitos encontrados nas vias, como trincas, fissuras, deformações permanentes e etc., vem sendo estudadas por inúmeros pesquisadores e são cada vez mais associadas a microestrutura das misturas asfálticas. Bessa (2012) diz que, diferentes métodos de compactação podem proporcionar microestruturas com propriedades diferentes, com relação a distribuição de vazios, orientação dos agregados e até mesmo os pontos de contato entre as partículas. Ele ainda afirma que, ao se comparar duas misturas asfálticas consideradas iguais, porém compactadas por métodos diferentes, podem ser encontradas propriedades

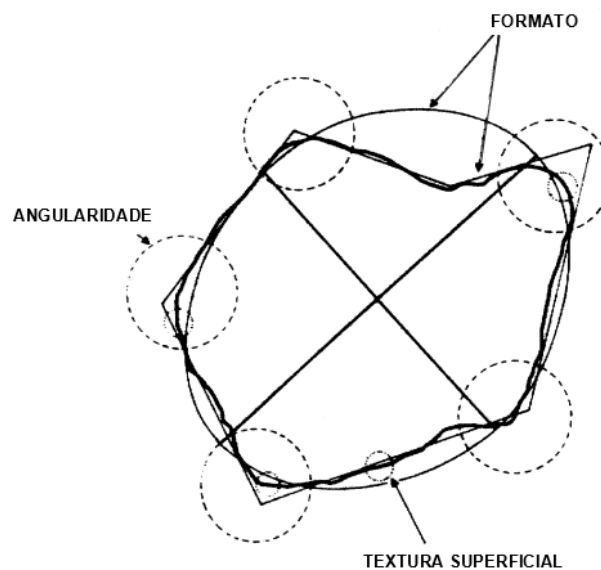
mecânicas distintas devido as suas microestruturas organizadas de maneiras diferentes.

2.1.1. Propriedades dos agregados e pontos de contato entre as partículas

Segundo Bessa, Castelo Branco e Soares (2012), os agregados que compõem a microestrutura de uma mistura asfáltica têm um papel fundamental no que diz respeito a estabilidade e capacidade de suporte dos esforços transmitidos ao esqueleto mineral das mesmas. Para eles, as propriedades destes agregados são responsáveis por caracterizar os comportamentos mecânicos, resistência e desempenho dos pavimentos, e dentre essas principais propriedades estão, as de forma, tamanho, angularidade, textura, e os pontos de contato existentes entre as partículas.

Segundo Masad (2000), uma partícula de agregado pode ter sua forma expressa através de três propriedades principais, o formato, angularidade, e textura superficial. O formato diz respeito as diferentes proporções que a partícula pode ter, a angularidade ou circularidade remete aos vértices sobrepostos do formato do agregado, e a textura descreve as irregularidades presentes na superfície, que são pequenas o suficiente para não afetar o formato da partícula, como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Propriedades de forma dos agregados.



Fonte: Adaptado de Masad (2000, p. 274).

Rao, Tutumluer e Kim (2002) afirmam que a angularidade dos agregados tem interferência na resistência ao cisalhamento de misturas asfálticas, é por meio dela que ocorre o intertravamento entre as partículas e resulta no fortalecimento do esqueleto mineral. Agregados com partículas mais angulares tendem a aumentar os seus pontos de contato com as partículas vizinhas, proporcionando uma melhor distribuição dos esforços recebidos, ao contrário das partículas arredondadas, que deslizam umas sobre as outras e promovem uma instabilidade na estrutura granular do pavimento.

Os agregados com formato lamelar devem ter aplicação limitada em misturas asfálticas, pois as partículas podem quebrar durante o processo de compactação ou até mesmo durante a ação do tráfego de veículos após a finalização do pavimento. Além disso, a lamelaridade promove a diminuição da trabalhabilidade da mistura, e é devido a esses e outros fatores que na prática os agregados cúbicos são mais aplicados (BESSA, CASTELO BRANCO e SOARES, 2009).

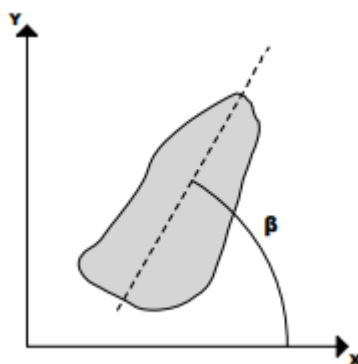
A partir das propriedades de forma dos agregados, pode-se considerar a existência de pontos de contato entre duas ou mais partículas quando elas estiverem separadas a uma distância máxima fixa. Existe uma relação direta entre a resistência à deformação permanente das misturas asfálticas e os pontos de contato entre os agregados (BESSA, 2012). Sousa *et al.* (1991) perceberam que misturas asfálticas compactadas por meio do amassamento apresentam uma maior resistência à deformação permanente quando comparadas com as compactadas por outros métodos. Isso ocorre devido ao alto número de pontos de contato presentes nessas misturas, ou seja, esse parâmetro também sofre interferência do tipo e intensidade de compactação aplicado no pavimento.

2.1.2. Orientação e segregação das partículas de agregados

Inúmeros pesquisadores vêm estudando sobre a interferência dos diferentes métodos de compactação na distribuição espacial das partículas de agregados dentro de misturas asfálticas. A compactação dita a orientação tridimensional dos agregados, e ela pode variar desde uma distribuição totalmente aleatória até uma distribuição direcional predominante, principalmente, com relação aos agregados graúdos capazes de proporcionar características quase anisotrópicas à mistura (VASCONCELOS, EVANGELISTA JR e SOARES, 2005). Hartmann (2017) empregou

a definição da orientação bidimensional dos agregados como o ângulo formado a partir do eixo principal do agregado, localizado na direção de maior dimensão da partícula, com o plano referencial horizontal, como representado na Figura 2.

Figura 2 - Definição da orientação das partículas de agregados.



Fonte: Hartmann (2017, p. 33).

Segundo Bessa (2012), existe um parâmetro capaz de quantificar a distribuição direcional das partículas dos agregados chamado de vetor magnitude, e ele leva em conta o ângulo com a horizontal de cada agregado e o número total de agregados na amostra. Esse parâmetro descreve a orientação preferencial dos agregados variando de 0 a 100%, onde 0% significa que a distribuição das partículas é completamente aleatória, e 100% significa que todas as partículas estão alinhadas na mesma direção.

Yue, Bekking e Morin (1995) estudaram a estrutura interna de amostras de campo e de laboratório, a modo de comparar seus resultados frente a diferentes métodos de compactação. Os de laboratório foram compactados utilizando o método Marshall e o *Superpave Giratory Compactor* (SGC), já os de campo foram compactados com rolo vibratório convencional. Esses pesquisadores puderam constatar que o compactador SGC produziu uma mistura com distribuição mais uniforme dos agregados graúdos, do que as compactadas pelo método Marshall e com rolo vibratório em campo.

Hunter, Airey e Collop (2004) avaliaram em seu estudo, a orientação e distribuição das partículas de agregados de misturas asfálticas compactadas em laboratório através do giro e da vibração. Eles concluíram que esses dois métodos apresentam agregados com orientação induzida pelas condições de contorno confinantes ou pelos esforços de cisalhamento entre as partículas, e que isso conseqüentemente, lhes proporciona uma maior resistência à deformação

permanente do que misturas compactadas por outros métodos, como por exemplo, em mesas compactadoras.

Vasconcelos, Evangelista Jr e Soares (2005) analisaram o vetor magnitude, média dos ângulos de inclinação com a horizontal e uniformidade da distribuição espacial dos agregados, para misturas de concretos betuminosos usinados a quente (CBUQ) compactados pelo SGC e com o compactador Marshall. Eles observaram que para os agregados miúdos, quanto menor o tamanho da partícula, mais uniforme foi a distribuição e menor a interferência do tipo de compactação. Já nos agregados graúdos, as partículas maiores que 3/8" ou 9,5 mm apresentaram uma maior tendência a anisotropia e concentração da distribuição, sendo o método Marshall o que distribuiu mais uniformemente os agregados, de forma geral.

Outra característica das misturas que pode ser relacionada com o tipo de compactação empregado é a segregação dos agregados. Bessa (2012) define a segregação como a falta de homogeneidade entre os componentes principais das misturas, basicamente ligante asfáltico e agregados, a um certo ponto onde ela pode acelerar alguns defeitos nos pavimentos.

Uma mistura asfáltica que apresenta granulometria contínua, idealmente, deve ter suas partículas distribuídas de maneira uniforme ao longo do seu volume. Mas devido ao processo de compactação isso raramente acontece, principalmente em laboratório, onde a segregação é quase inevitável devido a dificuldade de se moldar amostras de maneira uniforme. A compactação utilizando métodos giratórios e vibratórios propiciam uma maior ocorrência da segregação se comparados a outros métodos, como por exemplo o compactado por placas (HUNTER, AIREY e COLLOP, 2004).

Masad *et al.* (1999) avaliaram a segregação em amostra compactadas de diferentes formas e perceberam que as extraídas de campo apresentaram agregados mais segregados do que as compactadas em laboratório, ou seja, as misturas aplicadas em campo tinham uma distribuição menos homogêneas. Os autores ainda ressaltam que essa maior segregação encontrada em campo era algo esperado, porém indesejado, visto que misturas com agregados mais segregados tendem a apresentar um pior desempenho mecânico.

2.2. Obtenção de imagens digitais de amostras

Para a realização da análise das amostras de misturas asfálticas é preciso escolher um dos inúmeros métodos de captação de imagens, encontrar alguma forma de digitalizar as seções que se deseja analisar, para a partir daí processar as imagens obtidas e extrair as informações que se deseja, com o auxílio computacional.

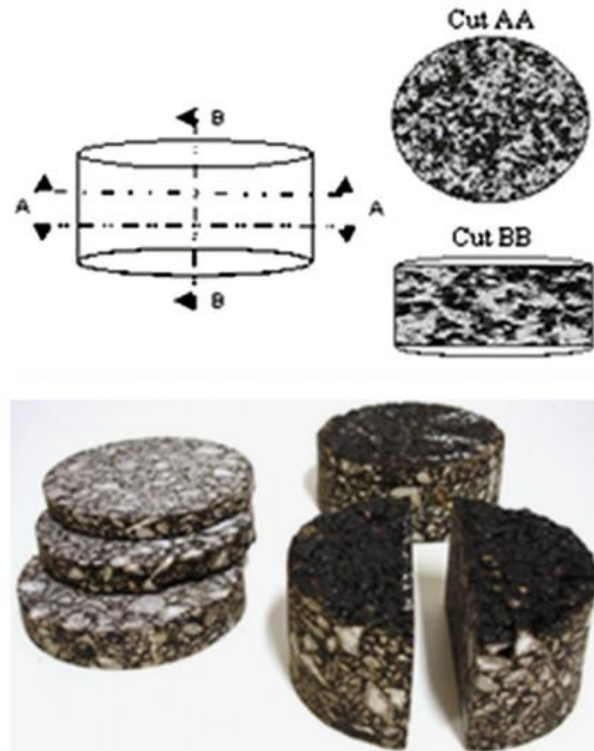
Dentre os principais métodos de obtenção de imagens estão os não destrutivos, representados pela utilização da tomografia computadorizada para escanear tridimensionalmente a amostra, e os destrutivos, representados pelo escaneamento bidimensional das seções em diferentes pontos da amostra, onde essas seções podem ser serradas ou desgastadas, como é o caso do *serial sectioning*.

2.2.1. Escaneamento 2D

A digitalização por escaneamento bidimensional de amostras de concreto asfáltico é o tipo mais comum e mais utilizado dentre os métodos de obtenção de imagens digitais, por necessitar de equipamentos fáceis de encontrar e de simples manuseio.

O processo todo se dá pelo equipamento simples que é necessário, um scanner e algum tipo de serra para seccionar as amostras. É preciso serrar o corpo de prova na direção desejada, como os exemplos representados na Figura 3, seja ele moldado em laboratório ou retirado de campo, levar as faces serradas até um scanner de mesa e digitalizar as amostras em duas dimensões. A partir da obtenção das imagens, o processamento das mesmas pode ter início com alguns procedimentos de tratamento e facilitação do realce dos agregados, e então a análise pode ser efetuada se retirando os dados necessários para se chegar aos requeridos resultados (BESSA, 2012).

Figura 3 - Cortes em amostras para análise.



Fonte: Bessa, Castelo Branco e Soares (2012, p. 5).

Vários pesquisadores já utilizaram esse tipo de procedimento para digitalização de imagens e conseqüentemente analisar a estrutura interna de misturas asfálticas. Yue, Bekking e Morin (1995) utilizaram amostras serradas com uma serra circular diamantada onde foram divididas vertical e horizontalmente para melhor analisar a mistura. A amostra inicial foi condicionada a -2° C para manter sua estrutura endurecida e foi aplicada uma camada de resina epóxi sobre a mesma para evitar o desprendimento de agregados durante o processo de corte.

Vasconcelos, Evangelista Jr. e Soares (2005) estudaram a estrutura dos agregados de três concretos asfálticos distintos através da análise de seções horizontais dos corpos de provas. As amostras foram serradas a aproximadamente 2 cm do topo e também 2 cm da base, e então foram levadas até um scanner para digitalizar as mesmas e se obter o material base para as análises digitais.

Bessa, Castelo Branco e Soares (2012) analisaram misturas asfálticas e o comportamento dos agregados nas suas microestruturas através da confecção de lajes utilizando diferentes métodos de compactação e retirando amostras cilíndricas das mesmas. Com isso, as amostras foram serradas horizontalmente a um terço do

topo e a um terço da base, e verticalmente, bem no meio das mesmas, sendo levadas na sequência até um scanner, onde foram digitalizadas.

2.2.2. Tomografia computadorizada

Tomografia computadorizada é um processo utilizado para se obter imagens em duas ou três dimensões da seção transversal de um determinado corpo através da radiação, pois quando um determinado número de projeções unidimensionais são processadas em diversos ângulos diferentes, é possível se obter a reconstrução da seção transversal do corpo analisado (BRAZ, LOPES E MOTTA, 1997).

Na medicina, a tomografia computadorizada é um exame não invasivo utilizado para reproduzir imagens dos órgãos internos de humanos a partir da combinação de equipamentos de raio x e computadores programados. Todas as imagens geradas mostram a seção transversal da área do corpo examinado, como se ele fosse cortado em fatias para mostrar todos os órgãos presentes na região. Esse tipo de técnica analisa inúmeras fatias de imagens, que podem chegar a uma espessura de 0,6 mm, onde são compiladas por softwares de computadores afim de gerar uma amostra que permite uma visão detalhada e multidimensional do interior do corpo analisado (MEDINA, 2021).

Esse método também é utilizado na engenharia civil para realização de análises na microestrutura de pavimentos. Inúmeros pesquisadores realizaram experimentos envolvendo a tomografia computadorizada como forma de obter imagens de alta resolução e elevado nível de detalhes, para analisar tridimensionalmente amostras, quantificar a distribuição de vazios, verificar a orientação de agregados, segregação e textura superficial das partículas.

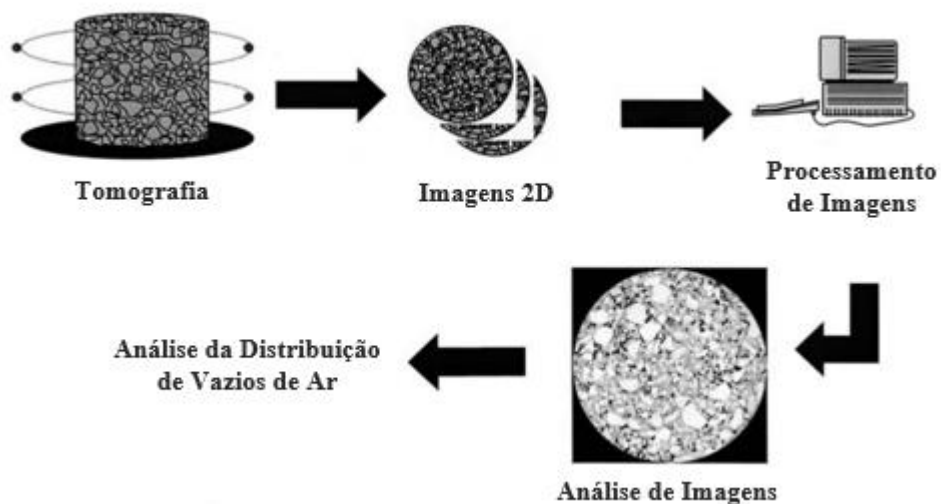
Masad (2004) analisou a distribuição e os tamanhos dos vazios em amostras de misturas asfálticas através da tomografia computadorizada, com o objetivo de desenvolver um modelo estatístico e estudar a influência dos materiais constituintes da mistura, e dos métodos e esforços de compactação no arranjo e no contato agregado/agregado, respectivamente. Com esse estudo ele pode concluir que os defeitos em pavimentos, em especial as trincas e o aumento de vazios, localizaram-se conforme a distribuição inicial desses vazios. No mesmo ano, Tashman *et al.* (2004) desenvolveram um modelo viscoelástico para poder avaliar as deformações permanentes em misturas asfálticas, a partir das propriedades de distribuição dos

agregados como de dados de entrada. Eles utilizaram a tomografia computadorizada para caracterizar a evolução dos danos na mistura e ter seus resultados como base para seu estudo.

Cardoso *et al.* (2005) analisaram tridimensionalmente a estrutura interna de amostras de misturas asfálticas do tipo SMA (Stone Matrix Asphalt), ou matriz pétreas asfáltica, por meio da tomografia computadorizada, para verificar o índice de vazios e a distribuição dos agregados no interior das amostras. Zelelew, Papagiannakis e Masad (2008) desenvolveram um algoritmo de processamento de imagens automatizado, e eles utilizaram a tomografia computadorizada como a forma de analisar as imagens das amostras de misturas asfálticas e terem seus dados microestruturais e de volumetria como entrada para rodar o código.

Medina (2021) utilizou a tomografia computadorizada para analisar os índices de vazios de corpos de provas moldados compostos por brita graduada simples de dois agregados distintos, para comparar os resultados encontrados em laboratório com os encontrados nas bases granulares estruturadas em campo. Por meio da Figura 4 é representado o processo de quantificação dos vazios em uma amostra de concreto asfáltico.

Figura 4 - Utilização da tomografia computadorizada para análise de vazios em amostras.



Fonte: Adaptado de Tashman (2002. p. 21).

2.2.3. Serial sectioning

O *serial sectioning*, ou seccionamento em série, é um método destrutivo de análise microestrutural de materiais. Esse procedimento é utilizado para gerar a estrutura interna de materiais em três dimensões a partir da divisão de várias seções bidimensionais que são reagrupadas e processadas em sequência. As imagens das seções ao longo da amostra podem ser obtidas a partir de ondulações, usinagem e microtomia, mas o processo mais utilizado é o polimento executado em etapas consecutivas (SPOWART, 2006).

Resumidamente, o processo de seccionamento em série é realizado de maneira manual a partir de um ciclo de moagem ou polimento da amostra, para em seguida, as seções analisadas serem fotografadas ou escaneadas. Alkemper e Voorhees (2001) afirmam que apesar de funcional, esse método feito de maneira manual requer um cuidado muito grande, leva um tempo considerável para ser executado, pode apresentar resultados imprecisos devido à dificuldade em se garantir uma distância precisa entre duas seções, no qual necessita manter a amostra alinhada durante o todo processo para evitar o registro inclinado e distorcido das seções.

Pesquisadores estudaram algumas formas de resolver os problemas envolvendo o processo manual, a fim de agilizar sua execução e aumentar sua produção, e facilitar a estabilização e o controle do polimento das seções. Uma das maneiras encontradas foi a automatização do processo de seccionamento, pois aliou-se o avanço tecnológico por meio de maquinários eletrônicos com a necessidade de melhoria nos procedimentos de análise de amostras, além de ser capaz de proporcionar uma taxa de seccionamento até 100 vezes maior que a do procedimento manual (SPOWART, 2006).

A automatização do processo de seccionamento em série é bem simples, apesar de ter alguns métodos com configurações experimentais diferentes e que utilizam equipamentos com graus avançados de tecnologia. Segundo Echlin *et al.* (2020), a ideia principal desse tipo de procedimento é posicionar corretamente a amostra no equipamento, tomando cuidado para acomodar a superfície de desgaste que servirá como base para o restante da análise longitudinal, após isso essa superfície começa a ser polida gradativamente, podendo utilizar feixe de íons, lasers ou meios mecânicos, variando conforme o equipamento e as dimensões das amostras. No decorrer do seccionamento, conforme a superfície é polida, ela é

fotografada para fim de reunir um conjunto de imagens referentes as sucessivas fatias da amostra, as quais são processadas e dão forma a uma representação tridimensional da mesma.

O seccionamento em série é utilizado por pesquisadores para analisar tridimensionalmente a estrutura interna de compósitos, metais e outros materiais constituídos de dois ou mais componentes. Alkemper e Voorhees (2001) desenvolveram um método de seccionamento em série que é capaz de analisar cerca de 20 seções por hora com espaçamentos entre elas variando poucos milímetros. O alinhamento das amostras foi feito a partir de um transformador diferencial linear variável, equipamento que permite a análise longitudinal da amostra sem precisar efetuar marcações nas mesmas, ou seja, o nivelamento e divisão das seções são feitos automaticamente pelo equipamento. Os pesquisadores utilizaram o método para analisar amostras de alumínio fundido e obtiveram resultados com erros de alinhamento, inclinação e rotação entre as seções associadas, insignificantes.

2.3. Processamento Digitais de Imagens (PDI)

Os métodos tradicionais de caracterização de agregados para verificação de algumas propriedades físicas como a forma, angularidade e textura, apresentam inúmeras dificuldades e dependem de um certo tempo para serem realizados.

Masad (2004) afirma que para analisar as características quanto à forma dos agregados é preciso apenas alguns equipamentos simples, porém o tempo que irá levar para isso é muito grande, além de ser necessária a medição manual de cada partícula para a amostra ser considerada representativa.

A análise da estrutura interna de amostras de misturas asfálticas é outro fator que apresenta inúmeras dificuldades de ser realizado pelos métodos convencionais, seja por meio da utilização de métodos destrutivos ou não, mas por se dar através de parâmetros relacionados à distribuição das partículas dos agregados e dos vazios nas misturas (BESSA, 2012).

Esses e outros fatos fazem com que aumente a procura por processos rápidos e que sejam fáceis de acessar através de imagens, o passar do tempo e o avanço tecnológico propiciam o aprimoramento dessas técnicas.

2.3.1. Principais técnicas de PDI

Diversas técnicas de processamento de imagens digitais para caracterizar agregados e misturas asfálticas podem ser utilizadas, algumas delas são mais simples, onde necessitam de apenas equipamentos fáceis de serem manuseados e algum tipo de software computacional gratuito, já outras são mais sofisticadas e mais avançadas, nas quais equipamentos mais caros e tecnologicamente desenvolvidos podem ser usados.

Yue, Bekking e Morin (1995) utilizaram um método que foi bastante inovador pra época, eles fotografaram amostras de misturas asfálticas retiradas de campo e moldadas em laboratório para analisarem suas microestruturas, afim de diferenciá-las. Usaram um software de edição de imagens para realizar o processamento digital e delinear os agregados manualmente. Após o processo realizado e as respectivas análises feitas, eles afirmaram que é possível fazer análises microestruturais com alta precisão em misturas de concreto asfáltico utilizando apenas o processamento digital de imagens.

Zezelew, Papagiannakis e Masad (2008) desenvolveram um método capaz de realizar automaticamente o processamento digital de imagens, que foi denominado algoritmo de limiarização de mínimos globais (VGM), onde se utiliza como base a volumetria de amostras tridimensionais de concreto asfáltico captadas por meio de tomografias computadorizadas, e é capaz de segmentar e diferenciar os agregados da matriz asfáltica através dos limites da escala de cinza das imagens.

Bessa, Castelo Branco e Soares (2009) realizaram o processo de caracterização de diferentes agregados com base na captação de imagens e no processamento por meio do Adobe Photoshop para realçar as bordas, segmentar e melhorar a escala de cores dos agregados, já a análise das imagens e identificação das partículas se deu com o uso do software Imagetool.

Medina (2021) aplicou o processamento digital em imagens captadas através da tomografia computadorizada em corpos de prova de bases granulares e analisou inúmeros índices físicos por meios do software ImageJ, além de usar uma extensão da plataforma chamada BoneJ para aprimorar o processamento e excluir ruídos das imagens captadas.

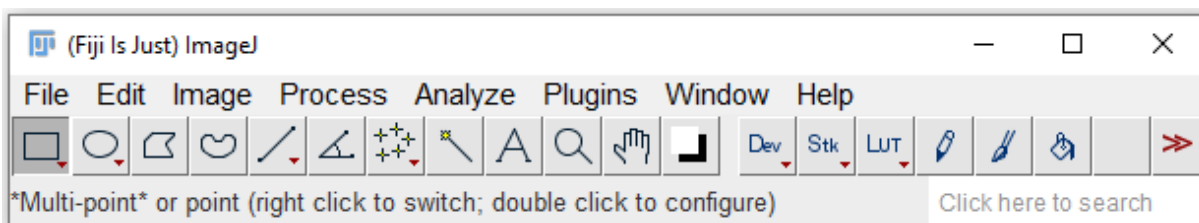
2.3.2. Software ImageJ

O ImageJ é um programa de processamento e análise de imagens com domínio público disponível para sistemas Windows, Mac OS e Linux, utiliza a linguagem de programação Java e foi desenvolvido pelo *National Institutes of Health* (NIH) para auxiliar na obtenção e análise dos resultados de tomografias e ultrassonografias realizadas em pacientes humanos. Este software é capaz de exibir, salvar, editar, analisar, imprimir e processar imagens em diferentes unidades de armazenamento, como 8, 16 ou 32 bits, além de ler inúmeros formatos de imagens como TIFF, GIF, JPEG, BMP, DICOM, FITS e raw (FERREIRA e RASBAND, 2012).

Paralelo ao ImageJ, existem vários pacotes que incluem diferentes ferramentas com aplicação para as mais diversas áreas do conhecimento, onde podem ser facilmente encontradas e associadas ao software inicial. Um desses pacotes é o Fiji, utilizado para complementar as funcionalidades básicas do ImageJ. Schindelin *et al.* (2012) descrevem o Fiji como um pacote de distribuição livre que traz consigo uma grande variedade de bibliotecas completas e organizadas, *plugins* relevantes para pesquisas científicas, linguagens de script e uma vasta documentação como forma de tutorial para facilitar a utilização de todas as suas funções.

O Fiji apresenta uma interface simples e de fácil utilização, como é ilustrada na Figura 5. Uma das razões desta simplicidade, foi a motivação de seus idealizadores em facilitar ao máximo a utilização do programa para quem não tem um conhecimento tão grande na área de programação, ou seja, por ser gratuito e de fácil acesso, qualquer pessoa consegue utilizar o software e suas inúmeras funções (SCHINDELIN *et al.*, 2012).

Figura 5 - Interface principal do ImageJ/Fiji.



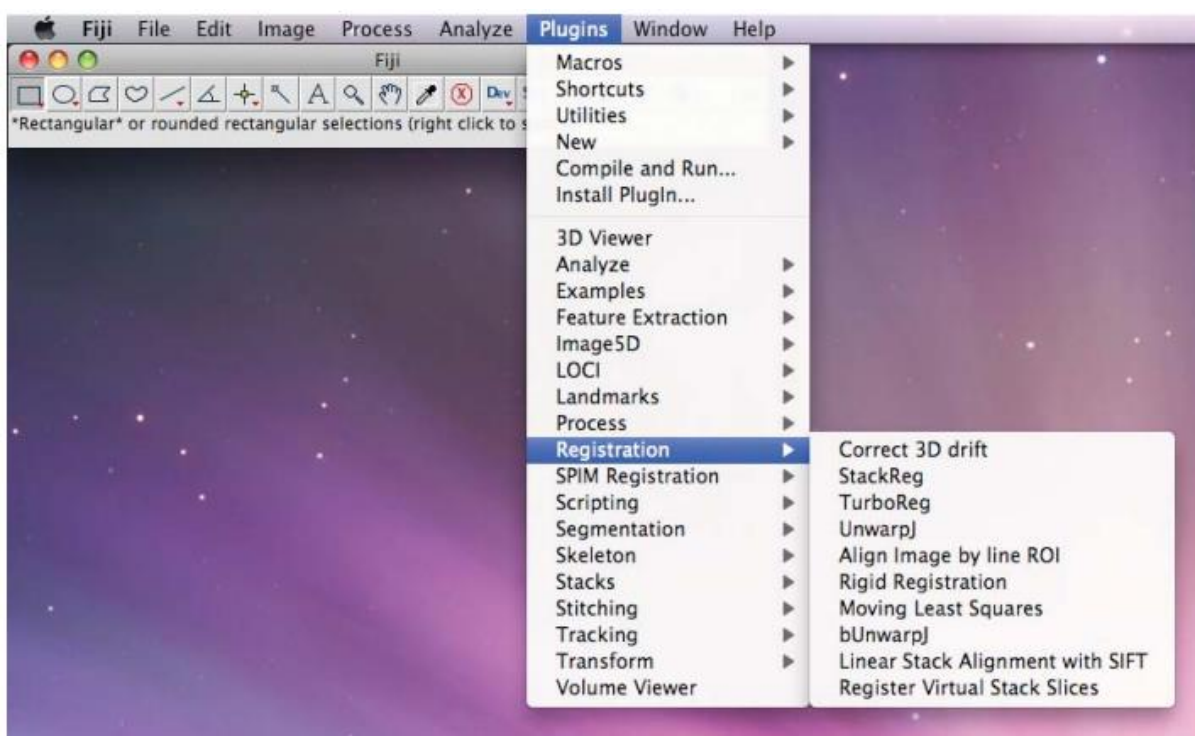
Fonte: Elaboração Própria.

As principais funções da plataforma são apresentadas na Figura 5, dentre elas estão a capacidade de anexar imagens arquivadas no computador, editar as mesmas por meio de desenhos de inúmeras formas e tamanhos, alterar a unidade de

armazenamento das imagens fazendo com que elas fiquem mais fáceis de processar, efetuar o processamento por meio de histogramas, limiarização e inversão de cores, binarização, além de disponibilizar filtros capazes de reduzir os ruídos das imagens e aumentar a precisão nas análises a serem realizadas.

Os *plugins* do Fiji são muito úteis e versáteis para inúmeros ramos da ciência, sua utilização se dá tanto por acadêmicos quanto por pesquisadores que buscam encontrar respostas rápidas e de uma maneira simples. Esses pacotes tem como função principal adicionar ferramentas que deixam o ImageJ ainda mais completo. Dentre os principais complementos está o plugin que possibilita a utilização do Java 3D, capaz de referenciar o hardware para ler e modelar arquivos em três dimensões (MEDINA, 2021). Está apresentada na Figura 6 a interface do programa com a aba dos *plugins* selecionada, nela podem ser vistas as categorias de organização dos mesmos e como é fácil de localizá-los dentro da plataforma.

Figura 6 - Organização dos *plugins* na interface do ImageJ/Fiji.



Fonte: Schindelin (2012, p. 2).

Uma das formas de se aplicar esses *plugins* capazes de processar três dimensões é por meio dos *scrips* e macros. *Scripts* é um tipo de comando que aplica alguns algoritmos e operações em sequência, onde podem ser aplicados a uma coleção de imagens, usando apenas uma linguagem de programação simples

(SCHINDELIN *et al.*, 2012). Já os macros são programas simples capazes de processar comandos em série de maneira automatizada, por meio dele é possível gravar determinados comandos em sequência e deixar salvo, ficando disponível nos arquivos para aplicar os mesmos comandos a uma série de imagens que se deseja analisar (FERREIRA e RASBAND, 2012). Com esses comandos citados acima é possível processar imagens em três dimensões, tendo como entrada uma série de imagens em 2D registradas ao longo do comprimento da amostra, que são processadas em sequência e possibilitam a geração de amostras em 3D.

2.3.3. Aplicação de PDI para caracterizar agregados e misturas asfálticas

O processamento de imagens vem ganhando espaço no meio acadêmico para identificar defeitos em pavimentos, caracterizar agregados e misturas asfálticas, e para várias outras atividades que inúmeros pesquisadores do Brasil e do mundo vêm utilizando como forma de comparar os resultados desse método digital com os convencionais que utilizam trabalho manual.

Kuo e Freeman (1998) analisaram algumas características morfológicas, como, planicidade, alongamento, forma e orientação de agregados graúdos dentro de misturas asfálticas, e também estimaram a proporção de agregados miúdos para correlacionar as propriedades da mistura de concreto asfáltico.

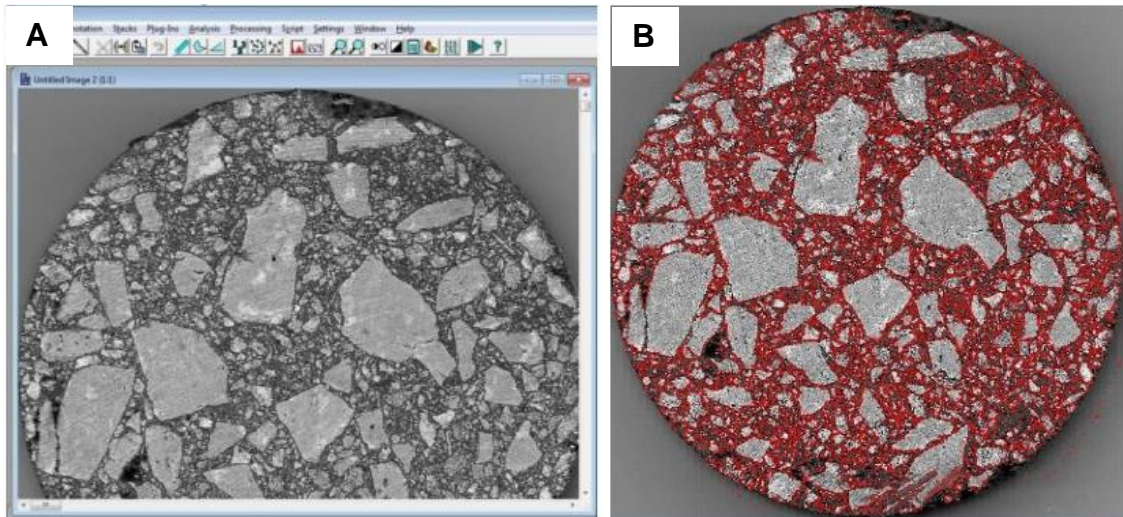
Kim *et al.* (2003) utilizaram um sistema de lasers para analisar agregados e propor uma metodologia de controle na produção desses agregados através da classificação das suas propriedades por meio de imagens. Quase no mesmo ano, Al Rousan (2004) usou o AIMS (Aggregate Image Measurement System) para caracterizar diferentes tipos de agregados e propor um método de classificação através de parâmetros advindos dos resultados desse equipamento.

Zeleeuw, Papagiannakis e Masad (2008) caracterizaram a estrutura interna de misturas asfálticas por meio de um algoritmo de processamento de imagens automatizado, eles analisaram a distribuição dos agregados, da massa asfáltica e dos vazios dentro da mistura.

Bessa (2012) avaliou o uso do PDI através da análise das propriedades de forma, angularidade e textura de agregados advindos de pedreiras diferentes, e analisou a microestrutura e as propriedades mecânicas das misturas compostas por esses agregados. Por meio da Figura 7 é exemplificada a realização de um

processamento de imagens de uma mistura asfáltica. Na Figura 7A é representada uma imagem sendo processada na interface de um software. Já na Figura 7B é ilustrada a etapa de segmentação sendo realizada, onde a matriz asfáltica é identificada e pintada de vermelho e os agregados permanecem cinza.

Figura 7 - Processamento digital de imagens sendo realizado.



Fonte: Bessa (2012, p. 71).

Guilherme *et al.* (2015) analisaram a granulometria de agregados miúdos advindos de praias arenosas por meio do software ImageJ/Fiji, e chegaram à conclusão que a aplicação de PDI, além de ser economicamente viável se comparada aos métodos convencionais, é uma excelente alternativa prática e simples que traz resultados representativos e confiáveis para caracterização granulométrica partículas.

Medina (2021) analisou os índices de vazios de bases granulares com dois tipos de agregados, ele comparou os resultados laboratoriais com os encontrados com o processamento de imagens de tomografias computadorizadas e obteve uma variação muito pequena entre os resultados, o que mostrou a eficiência da aplicabilidade de processos digitais na análise de amostras.

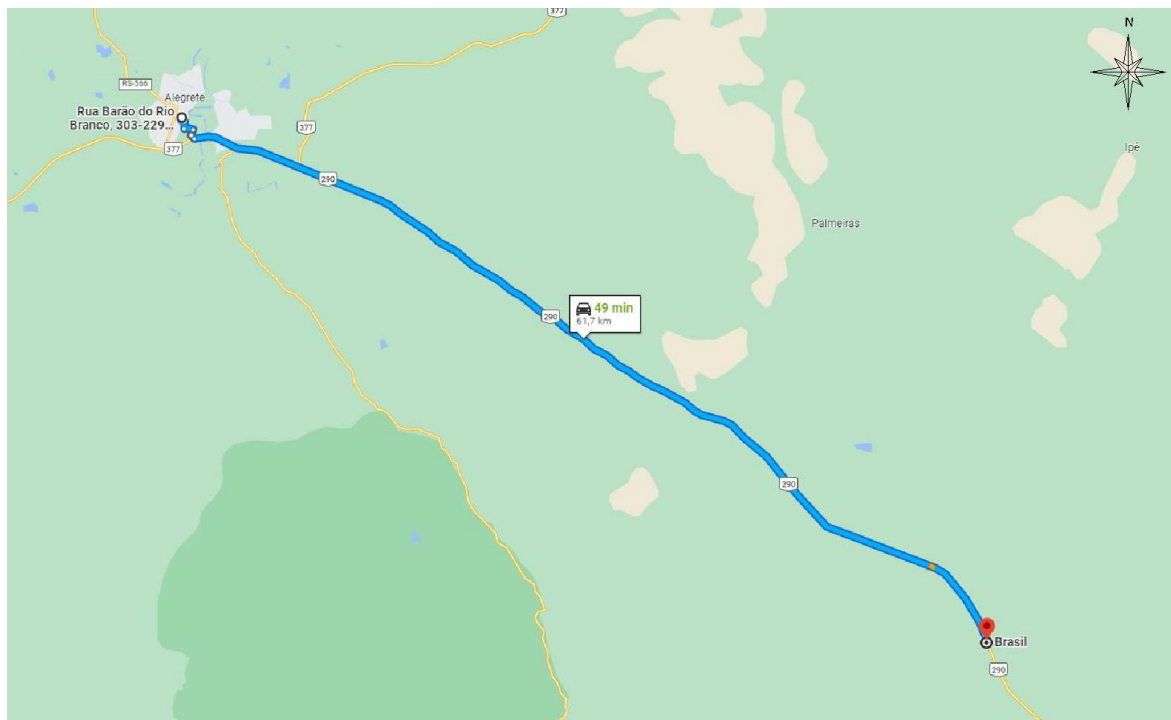
3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais, os métodos e os procedimentos que foram adotados para o desenvolvimento deste trabalho.

3.1. Materiais

A obra de pavimentação acompanhada foi executada em uma via pública do município de Alegrete/RS, portanto a maioria dos materiais utilizados foram definidos na fase de projeto pelos engenheiros do Departamento de Arquitetura e Engenharia, da Secretaria de Planejamento da Prefeitura Municipal de Alegrete. Foi especificado em projeto que a pista de rolamento seria revestida com CBUQ, e segundo traz o memorial descritivo da obra, sua escolha se deu devido a maior rapidez de execução, sendo dosada a mistura conforme é apresentado no Anexo A, seguindo o manual de pavimentação do DNIT, de 2006. O CBUQ foi dosado seguindo a metodologia de dosagem Marshall e produzido pela empresa Construtora Alegretense na sua usina localizada na BR 290, na localidade do Itapevi, município de Cacequi/RS, a aproximadamente 61,7 km de distância do local da obra, como mostrado na Figura 8.

Figura 8 - Distância da usina até o local da obra.



Fonte: Google Maps, 2022.

A faixa de temperatura de mistura utilizada estava entre os limites estipulados em projeto, entre 150 e 155 °C, com faixa de temperatura de compactação entre 139 e 143 °C.

3.1.1. Ligante

Conforme estipulado em projeto, foi utilizado um ligante com classificação do tipo CAP-50/70 da Betunel. Foi aplicado um teor de ligante de 4,80%, como apresentado no Anexo A, respeitando o limite mínimo estipulado em projeto de 2,4%.

3.1.2. Agregados

O material granular tem origem do processo de britagem realizado na pedreira associada a usina de concreto asfáltico, sendo este advindo de rochas basálticas. Na dosagem da mistura asfáltica, a curva granulométrica, apresentada no Anexo A ao final deste trabalho, encontra-se dentro dos limites de tolerância da faixa C da Norma DNIT 031/2006 – ES, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Curva granulométrica de projeto e limites de tolerância.

Série ASTM	Peneira		% passante	
	Abertura (mm)	Faixa de Projeto	Faixa C	Tolerâncias
3/4"	19,1	100	100	± 7%
1/2"	12,7	87	80 - 100	± 7%
3/8"	9,5	78,4	70 - 90	± 7%
N° 4	4,8	61	44 - 72	± 5%
N° 10	2	30	22 - 50	± 5%
N° 40	0,42	13,2	8 - 26	± 5%
N° 80	0,18	9,1	4 - 16	± 3%
N° 200	0,075	6,5	2 - 10	± 2%

Fonte: Construtora Alegretense e DNIT (2006, p. 5).

3.1.3. Software

O software utilizado nesta pesquisa foi o ImageJ, incluindo o Fiji e todos os *plugins* pertencentes a ele, como descrito no item 2.3.2.

3.2. Metodologia

Este trabalho contempla uma parcela experimental, consistindo basicamente no acompanhamento da obra de pavimentação em uma via urbana e extração de amostras do pavimento compactado, e da moldagem dos corpos de prova pelo método Marshall. Posteriormente este trabalho contempla uma análise de imagens digitais das amostras obtidas pelas metodologias supracitadas.

O trecho escolhido para a análise está situado na Rua Barão do Rio Branco, no bairro São João em Alegrete/RS, conforme destacado em amarelo na Figura 9. A escolha do trecho se deu pelo fato de sua camada de revestimento apresentar espessura suficiente para a realização dos procedimentos planejados previamente nesta pesquisa e pela disponibilidade de acompanhamento da execução do pavimento. Dentre as várias vias que foram pavimentadas no município, esta foi uma das primeiras a serem executadas do zero, ou seja, onde foi realizada a estruturação completa do pavimento com base de material granular e revestimento asfáltico, e que conseqüentemente apresentou uma espessura maior da camada asfáltica.

Figura 9 - Rua Barão do Rio Branco.



Fonte: Google Earth (2022).

3.2.1. Compactação da pista e das amostras Marshall

Ao iniciarem às obras de pavimentação, foram obtidas em campo amostras compactadas por meio de dois métodos diferentes: método Marshall e compactação na pista por rolo pneumático e tandem. Estes serviram de base para análise e comparação entre ambos com relação a distribuição e a orientação que provocaram nas partículas dos agregados.

A preparação das amostras moldadas e compactadas pelo método Marshall seguiu as recomendações da norma do DNIT 178/2018 - PRO – Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório *Superpave* ou o Marshall.

Durante o processo de compactação do pavimento foi cedida a mistura asfáltica para que as moldagens pudessem ser realizadas. Ao chegar o caminhão com a mistura usinada e pronta para a aplicação na via, foram retiradas as quantidades necessárias de material e imediatamente moldados os corpos de prova.

Para compactação da mistura, foram aplicados 75 golpes de impacto em cada face (conforme a norma), considerando uma via com tráfego pesado. Na Figura 10 observa-se a etapa de compactação sendo realizada.

Figura 10 - Processo de compactação Marshall em campo.



Fonte: Elaboração Própria.

Após finalizar a compactação, os corpos de prova foram armazenados no laboratório por um período de aproximadamente 72 horas, até serem removidos dos moldes com o auxílio do extrator, ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Extrator de amostras.



Fonte: Elaboração Própria.

Após, os corpos de prova tiveram suas dimensões verificadas e foram identificados (Figura 12).

Figura 12 - Amostras desmoldadas e identificadas.



Fonte: Elaboração Própria.

A etapa de aplicação das camadas de CBUQ foi efetuada com o auxílio de caminhões basculantes, que transportaram a mistura da usina até o local de aplicação. Ao chegar na obra, a mistura foi descarregada na caçamba de uma máquina vibroacabadora que espalhou o material na pista e logo em sequência se realizou a conformação prévia do pavimento. Logo após esse processo de distribuição da mistura na via, um rolo pneumático foi responsável pela primeira etapa da compactação com sucessivas passadas, e a finalização ocorreu com a passagem de um rolo metálico tipo tandem.

3.2.2. Extração das amostras

Após a pavimentação da via, foram extraídas amostras para serem utilizadas no processo de análise da pesquisa. Os testemunhos cilíndricos de amostras asfálticas foram retirados com o auxílio da máquina extratora da Empresa Alegretense (Figura 13), no qual a mesma é dotada de uma sonda rotativa que contém uma serra copo em sua extremidade.

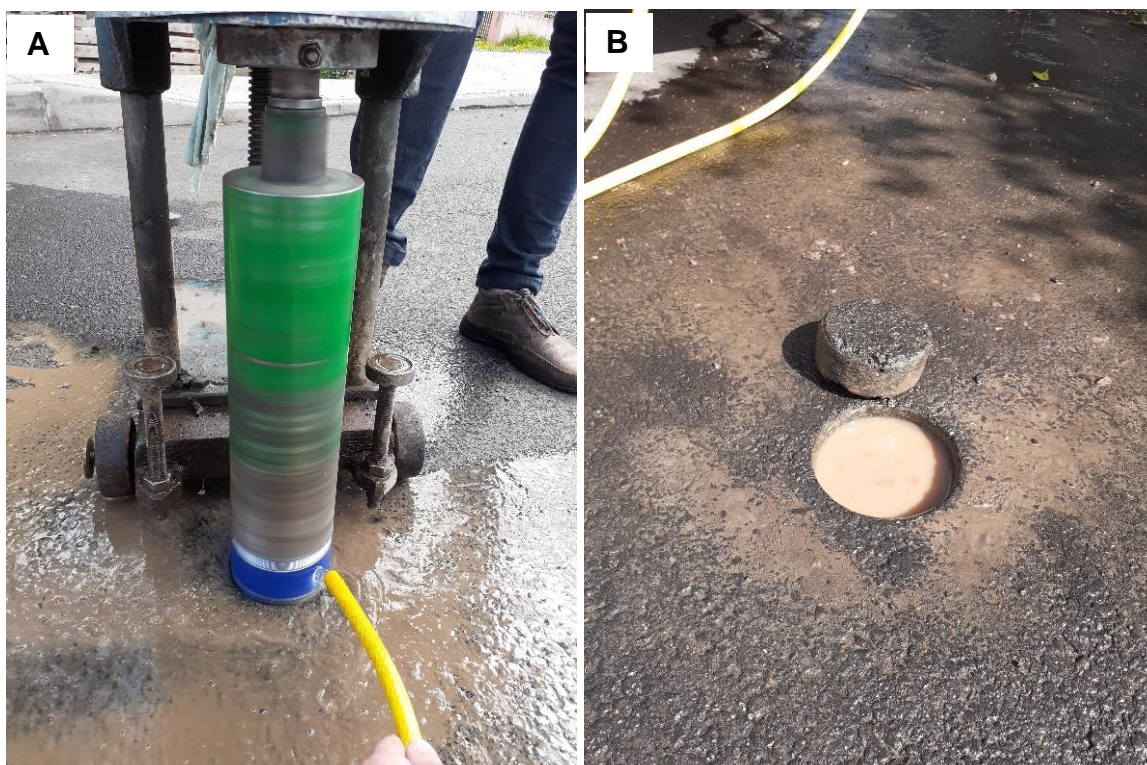
Figura 13 - Máquina extratora.



Fonte: Elaboração Própria.

Após escolhido o ponto de retirada do testemunho asfáltico, foi posicionada a máquina no local, ativado o fluxo de água na mangueira para que a mesma não perdesse sua solidez devido ao aquecimento do processo e para que a amostra não ficasse grudada na sonda, e a partir daí ligou-se a máquina e perfurou-se o ponto requerido (Figura 14).

Figura 14 - Extração sendo realizada (A) e amostra extraída (B).



Fonte: Elaboração Própria.

Extraídas as amostras, nos pontos em que a perfuração foi executada houve a necessidade de preencher os buracos a fim de não prejudicar a estrutura do pavimento. Para preencher os espaços deixados, foram utilizadas parcelas de asfalto frio ensacado para manutenção em vias asfálticas no preenchimento de buracos, onde o mesmo foi aplicado em camadas e cada uma delas foi compactada.

As amostras extraídas foram levadas até o Laboratório de Solos e Pavimentação da Unipampa, onde as mesmas foram identificadas, pesadas e tiveram suas dimensões mensuradas. Na Figura 15 estão apresentadas as amostras já identificadas no laboratório.

Figura 15 - Amostras extraídas e identificadas.



Fonte: Elaboração Própria.

3.2.3. Tratamento das amostras

As amostras foram divididas em dois grupos, onde o grupo das amostras moldadas pelo método Marshal receberam a nomenclatura de M1, M2, M3 e M4, e o das amostras extraídas da via de E1, E2, E3 e E4.

Após a identificação, as amostras foram levadas até o Laboratório de Estruturas, Materiais e Construção Civil (LEMAC) para a execução do processo de serragem, o qual se deu por meio de uma serra de mesa. A serra utilizada é a apresentada na Figura 16.

De cada amostra foram extraídas várias fatias, onde cada corte foi feito a uma distância variável, porém menor que 1 cm do outro, tirando-se fatias finas com o intuito de extrair a menor espessura possível. As espessuras de cada fatia serrada estão apresentadas nos Apêndices A e B.

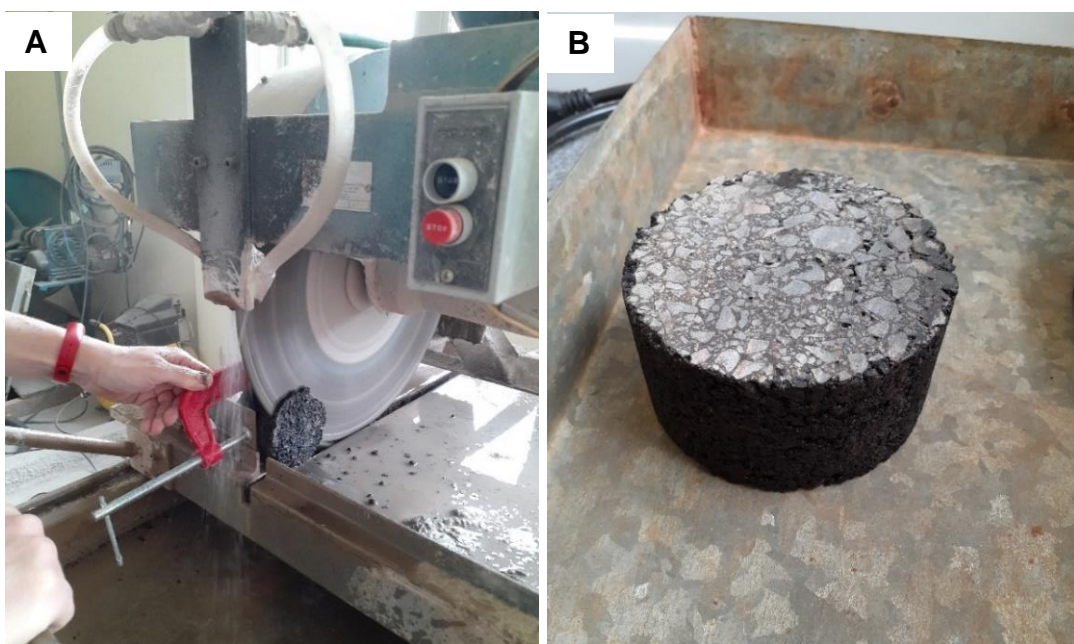
Figura 16 - Serra de mesa utilizada para o fatiamento das amostras.



Fonte: Elaboração Própria.

Essa divisão das amostras em fatias finas tem por objetivo extrair informações mais representativas sobre os agregados das amostras, pois quanto maior o número de imagens obtidas, maior o número de dados processados e analisados posteriormente. Na Figura 17 é apresentado o processo de serragem sendo executado e uma das amostras após ter uma de suas superfícies serrada.

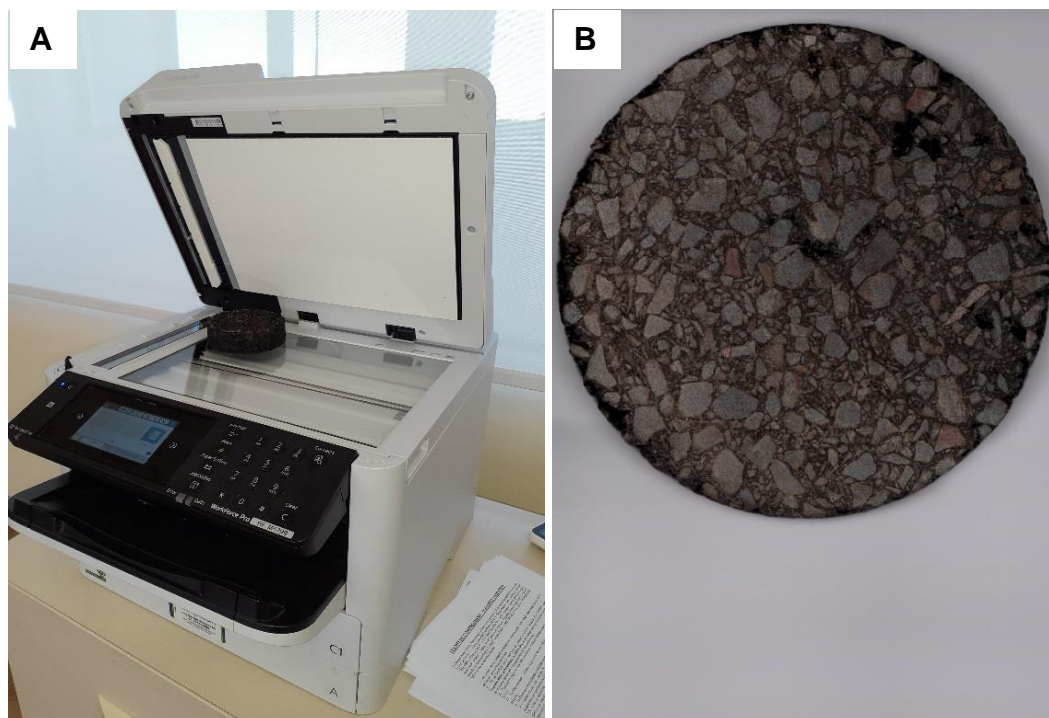
Figura 17 - Amostra durante o processo de serragem (A) e após ser serrada (B).



Fonte: Elaboração Própria.

Realizada a extração de cada fatia, após um período de secagem, as amostras eram levadas para a digitalização das seções. Cada amostra era posicionada no *scanner* de mesa, onde a seção serrada era escaneada (Figura 18).

Figura 18 - Amostra sendo digitalizada (A) e resultado da digitalização (B).



Fonte: Elaboração Própria.

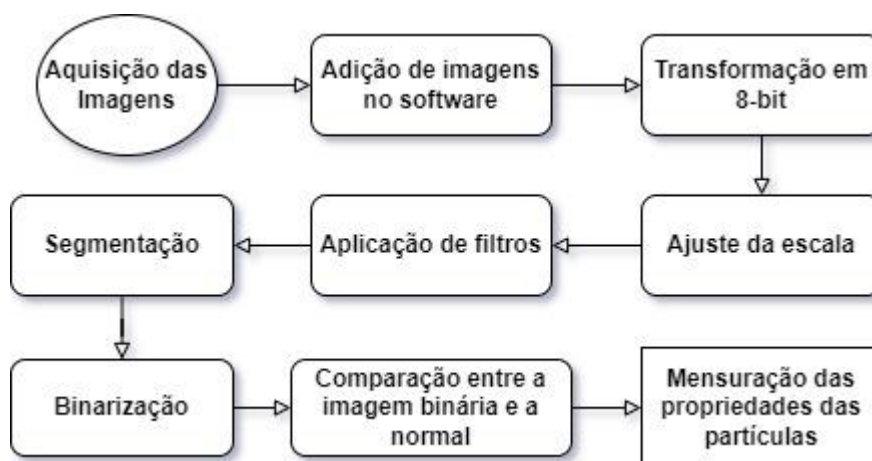
As imagens digitalizadas representam na análise computacional a distribuição dos agregados na estrutura interna das amostras, e por meio delas é que todos os processos digitais através do software ImageJ/Fiji foram feitos. Todas as imagens obtidas são apresentadas nos Apêndices C e D.

3.2.4. Análise das imagens

3.2.4.1. Processo inicial de análise

Após a digitalização das imagens das seções das amostras, se deu início ao processamento e análise digital por meio do software ImageJ/Fiji. Na Figura 19 são apresentados esquematicamente os passos básicos necessários que foram seguidos para a aplicação do processo, que vai desde o tratamento das imagens até a quantificação dos parâmetros físicos das misturas asfálticas.

Figura 19 - Diagrama das etapas do processamento de imagens.



Fonte: Elaboração própria.

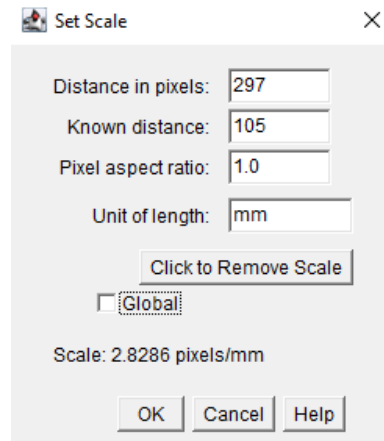
Para realizar a manipulação e preparo das imagens, serão utilizadas inúmeras ferramentas disponibilizadas pelo programa e os passos citados a seguir.

Passo 1 – Adição das imagens no software: com o programa já iniciado, na tela inicial as imagens foram adicionadas através das funções *FILE > OPEN*, ou apenas arrastando a imagem requerida para a interface do programa.

Passo 2 – Transformação dos bits das imagens: as imagens digitalizadas por meio de scanners normalmente apresentam um esquema de coloração dos pixels mais intensa e variada. Para facilitar o processo e diminuir quantidade de cores, que otimizam as etapas seguintes, principalmente a de segmentação das fases da mistura, as imagens foram transformadas em 8 bits pois elas se baseiam apenas em escalas de tons de cinza.

Passo 3 – Ajuste da escala: a escala das imagens analisadas foi ajustada, e para isso utilizou-se as funções *ANALYSE > SET SCALE*, por meio delas determinou-se a unidade de medida que a mensuração fora feita. Para se realizar a adequação da escala, durante a digitalização das amostras foi utilizada uma impressora multifuncional, e por meio desta, foi possível escolher a dimensão das imagens. As amostras foram digitalizadas com a dimensão de uma folha A6 que é de 105x148 mm, portanto, ao saber a proporção das imagens o ajuste da escala foi realizado utilizando-se uma destas medidas dada em pixels pelo software e por meio da função *set scale*, entrou-se com o valor desejado em milímetros para que a conversão pudesse ser feita. Um exemplo desse processo é representado por meio da Figura 20.

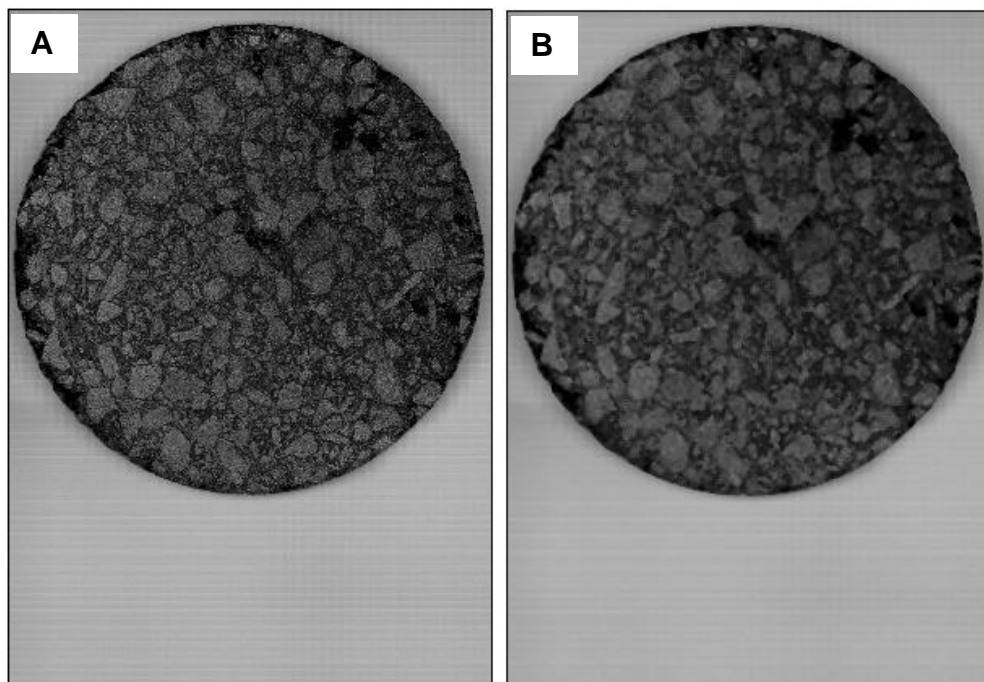
Figura 20 – Interface para ajuste da escala das imagens.



Fonte: Elaboração Própria.

Passo 4 – Aplicação de filtros: como uma forma de reduzir os ruídos das imagens originados no processo de digitalização, foram utilizados filtros. Existem vários tipos de filtros disponíveis no software, mas o utilizado nas imagens foi o filtro Mediano, que realiza uma mediana entre as cores dos pixels e uniformiza a imagem excluindo pequenos pontos que atrapalham no processo de análise ao confundirlos com alguma partícula de agregado. Na interface do programa o filtro foi acessado pelas funções *PROCESS > FILTERS > MEDIAN*.

Figura 21 – Antes (A) e depois (b) da aplicação do filtro mediano nas imagens.



Fonte: Elaboração Própria.

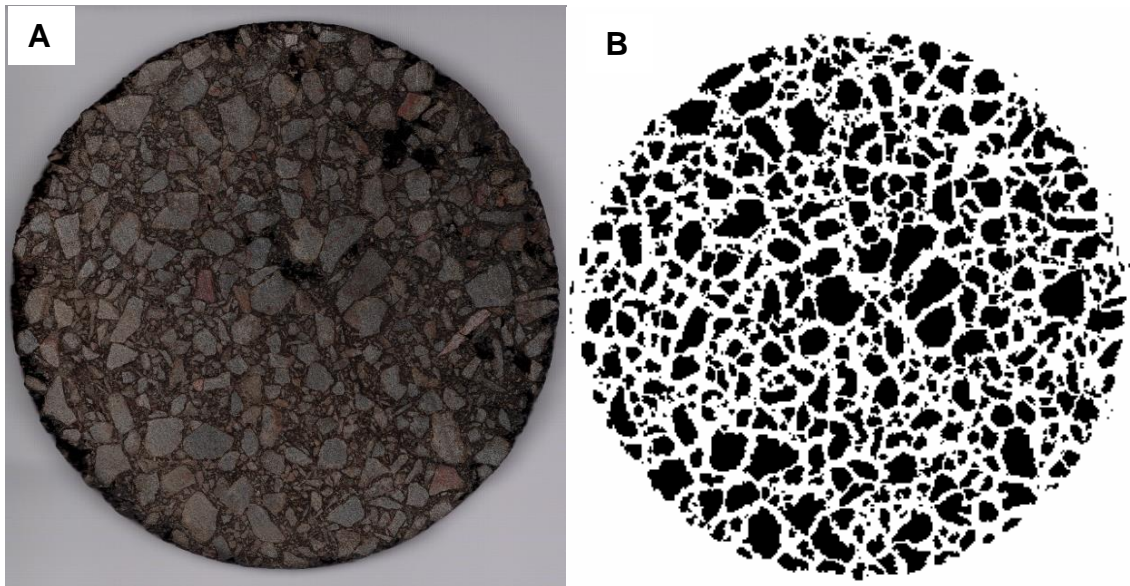
Passo 5 – Segmentação: o processo de segmentação é a identificação e separação dos componentes da mistura, principalmente pela diferenciação dos agregados graúdos da matriz asfáltica. A segmentação adotada nesta pesquisa consistiu na limiarização das imagens, que por meio de histogramas permite a identificação das fases e as transformam em imagens binária. Ao binarizar uma imagem foi possível controlar os níveis de domínio das partículas por meio dos histogramas até se obter a separação desejada das fases da mistura. No menu do programa a limiarização foi acessada através das funções *IMAJE > ADJUST > TRESHOLD*.

Passo 6 – Binarização: a etapa de binarização ocorreu quase que simultaneamente com o processo de segmentação, e a partir disso a imagem foi tratada em duas cores distintas, onde os agregados foram identificados na cor preta e o fundo da imagem que representa a matriz asfáltica, na cor branca. Esse processo foi executado para melhor se distinguir os dois componentes e destacar os agregados na mistura, com o objetivo de facilitar a mensuração por parte do software.

Após a binarização ter sido realizada, para o tratamento de algumas partículas de agregados com vazios em seu interior e/ou com uma de suas metades comprometidas devido a algum problema ou falha na etapa de digitalização, utilizou-se as funções *PROCESS > BINARY > FIL HOLES* para preencher os espaços do agregado. Outro problema muito comum de acontecer em processamentos digitais é a sobreposição de partículas, quando agregados são distribuídos na mistura pelo processo de compactação e ficam muito próximos ou entrando em contato. Para resolver esses problemas foram utilizadas as funções *PROCESS > BINARY > WATERSHED*, onde o programa usa inteligência artificial para identificar os limites das partículas e separá-las.

Passo 7 – Comparação entre a imagem normal e a binária: após todas as etapas de processamento citadas acima, obteve-se as imagens prontas para a análise. Mas antes de realizar a mensuração final, foi preciso conferir todas as partículas identificadas na imagem binária, de modo que, após todo o tratamento realizado nenhum erro ou defeito pudesse atrapalhar as etapas finais. E para isso, foi preciso comparar as imagens originais e as binárias e verificar as partículas. As Figura 22A e 22B mostram a diferença entre uma imagem original e um imagem binária.

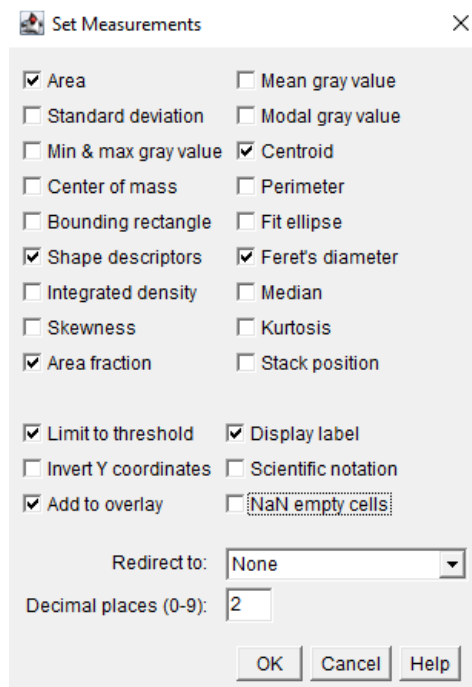
Figura 22 - Comparação entre a imagem original (A) e a binária (B).



Fonte: Elaboração Própria.

Passo 8 – Mensuração das propriedades das partículas: a etapa final e a mais importante de todo processo de análise das imagens é a quantificação dos agregados e a aferição das propriedades granulométricas dos mesmos. O software ImageJ/Fiji é capaz de analisar inúmeras propriedades, conforme mostra a Figura 23.

Figura 23 - Seleção das propriedades a serem analisadas.



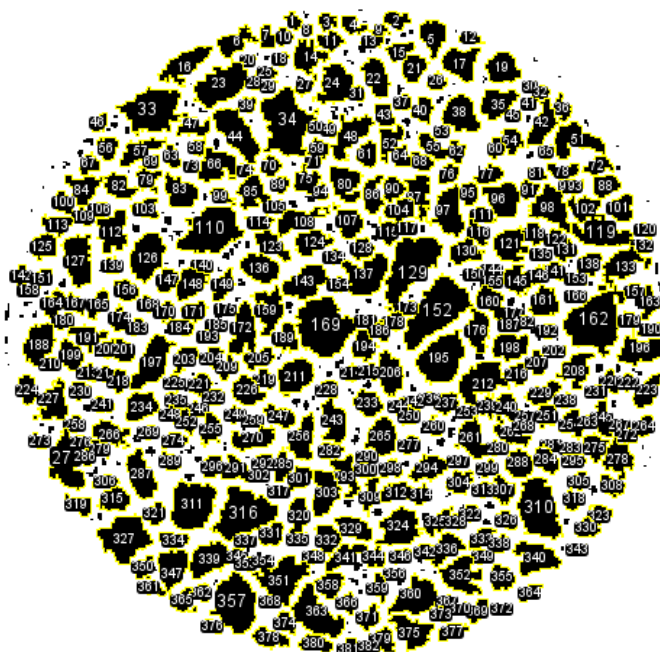
Fonte: Elaboração Própria.

Para selecionar as propriedades no programa, foram utilizadas as funções *ANALYSE > SET MEASUREMENTS*, e então escolhidos os parâmetros processados. Ao realizar a seleção, o software contabiliza o número de agregados e processa todas as partículas para extrair os dados requeridos. Para a pesquisa apresentada neste trabalho foi avaliada, a área, descrição de forma, fração de área, centroide, e diâmetro de Feret de cada uma das partículas, como estão selecionadas na imagem anterior.

Após a seleção das propriedades analisadas, utilizou-se das funções *ANALYSE > ANALYSE PARTICLES*, onde o software reconhece todas as partículas de agregados presentes da imagem, as numera e fornece uma tabela com todos os dados previamente selecionados de cada uma das partículas identificadas por ele.

Para o processo de análise, o software permite ao usuário escolher um valor mínimo de área de uma partícula a ser considerado, ou seja, é possível analisar todas as partículas que tiverem um valor de área maior do que o estipulado. Como uma forma de eliminar as partículas muito pequenas, foi definido um valor de área mínimo de 1,4 mm², pois considerar agregados menores do que isso geraria uma incerteza na análise e processamento dos dados, devido a consideração por parte do software de pequenas manchas ou ruídos que não puderam ser eliminados nos processos de filtragem e segmentação. Na Figura 24 é apresentada uma imagem recém analisada pelo ImageJ com todas as partículas numeradas.

Figura 24 - Identificação e numeração das partículas pelo software ImageJ.

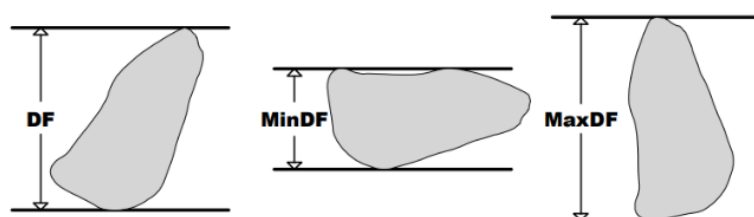


Fonte: Elaboração Própria.

3.2.4.2. Análise granulométrica

Após obter os dados das análises das partículas nas imagens de cada uma das amostras, estas foram organizadas para facilitar a obtenção dos resultados. Dentre os vários parâmetros analisados está o diâmetro de Feret, que fora utilizado como referência para a análise granulométrica. Hartmann (2017) define o diâmetro de Feret como a distância entre dois planos paralelos que restringem um polígono. Quando a menor distância entre dois planos que limitam uma partícula é determinada, pode se dizer que o menor diâmetro de Feret (MinDF) foi obtido. E seguindo essa mesma lógica, a maior distância entre os planos é o diâmetro de Feret máximo (MaxDF). Por meio da Figura 25 é possível entender melhor esse parâmetro.

Figura 25 - Representação da definição de diâmetro de Feret.



Fonte: Hartmann (2017, p. 44).

Os valores de MinDF foram utilizados para estimar a granulometria da mistura. A partir do conhecimento da dimensão das aberturas das peneiras padrões do DNIT, foi possível fazer uma comparação entre o MinDF de cada agregado analisado e a granulometria do material. Por meio dessa comparação, determinou-se em quais peneiras a partícula passaria e em qual ela ficaria retida, como um processo de “peneiramento virtual”. Foram tomadas como base as peneiras: 3/4" (19,1 mm), 1/2" (12,7 mm), 3/8" (9,5 mm), #4 (4,8 mm), #10 (2 mm) e #40 (0,42 mm).

Foram analisadas as peneiras com abertura maior do que a #40 (0,42 mm) devido a limitação proposta na análise das partículas, não levando em consideração agregados com granulometria menor do que esta. Com a não consideração das peneiras #80 e # 200, que foram consideradas na dosagem da mistura asfáltica que foi utilizada, houve a necessidade de realizar a redistribuição das porcentagens das partículas passantes nas peneiras analisadas. Foi estipulado um valor fixo de massa, e a partir daí, a faixa granulométrica foi recalculada com base nas porcentagens retidas de material em cada peneira. Então, essa nova curva passou a ser a referência

utilizada para analisar e comparar as granulometrias obtidas por imageamento com a de projeto. A faixa redistribuída está apresentada na Tabela 2, juntamente com a faixa original.

Tabela 2 - Curva granulométrica redistribuída.

Peneira		% passante	
Série ASTM	Abertura (mm)	Faixa Original	Faixa Redistribuída
3/4"	19,10	100,00	100,00
1/2"	12,70	87,00	85,00
3/8"	9,50	78,40	75,1
N° 4	4,80	61,00	55,1
N° 10	2,00	30,00	19,35
N° 40	0,42	13,20	0,00
N° 80	0,18	9,10	-
N° 200	0,075	6,50	-

Fonte: Elaboração Própria.

Após o peneiramento virtual, a porcentagem de partículas retidas em cada peneira foi calculada levando em consideração o somatório das relações entre a área individual de cada partícula retida na peneira em questão e a área total de agregados presentes em cada imagem. Com base nas porcentagens retidas, foram encontradas as porcentagens passantes em cada peneira, e esses valores foram utilizados para plotar as curvas granulométricas, relacionando as porcentagens retidas com a abertura de cada respectiva peneira. A partir delas, a análise granulométrica foi efetuada comparando-se as curvas das amostras com a curva granulométrica referência que é a de projeto da mistura.

3.2.4.3. Análise da orientação das partículas

Nos dados obtidos nas análises das partículas, o parâmetro orientação também foi obtido por meio da determinação do ângulo formado a partir do eixo principal de cada agregado, localizado na direção de maior dimensão da partícula, com o plano referencial horizontal. Seguindo essa lógica de verificação, os valores que foram medidos pelo software vão de 0 a 179° e os mesmos foram utilizados para plotar gráficos que relacionam a orientação com a porcentagem de partículas.

Esta plotagem foi efetuada a partir da organização dos dados, onde as orientações dos agregados foram ordenadas em sentido crescente e divididas em intervalos de 15 em 15°, e a porcentagem de partículas de cada imagem das fatias das amostras com orientações referentes a esses intervalos, foi determinada. Essa porcentagem foi encontrada a partir da soma do número de partículas orientadas em cada intervalo dado (0 a 15°, 15 a 30°, ... , 165 a 179°), e a quantidade total de partículas em cada imagem.

Foram plotados gráficos para cada uma das amostras dos diferentes tipos, moldadas e extraídas, a fim de realizar a comparação entre eles e verificar a influência que o método de compactação utilizado teve na orientação das partículas na mistura.

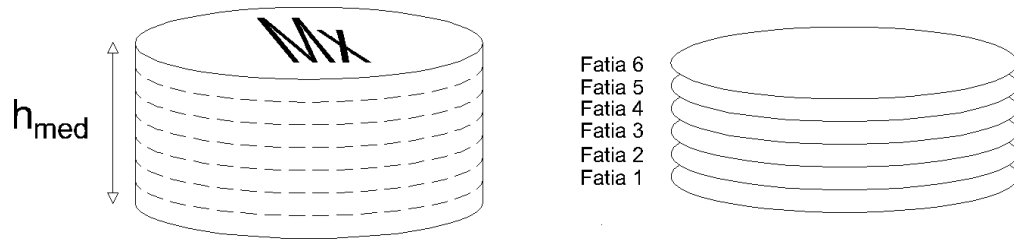
3.2.4.4. Análise da distribuição/segregação das partículas

A análise da distribuição das partículas nas amostras foi realizada para verificar a ocorrência de segregação durante os processos de compactação da mistura. Essa etapa de análise foi efetuada com base nas curvas granulométricas já citadas acima, a partir da verificação e comparação entre as médias das granulometrias do topo, do meio e da base dos corpos de prova. Com isso, foi possível conferir se os agregados mais graúdos da mistura estão localizados na base das amostras, o que indica a ocorrência de segregação, ou se essas partículas estão idealmente distribuídas de maneira uniforme ao longo do volume das amostras.

As amostras foram seccionadas em fatias durante o processo de serragem, e com base na ordem e na localização em que esse fatiamento foi executado é que foi definido onde era o topo, o meio e a base dos corpos de prova. A identificação das amostras, realizada após a obtenção das mesmas, ocorreu sempre nas faces superiores, ou seja, no topo. Nas amostras moldadas, a identificação se deu na face de contato com o compactador Marshall durante o processo de moldagem. Já nas amostras extraídas, a identificação ocorreu na face referente a parte superior da pista de rolamento do pavimento.

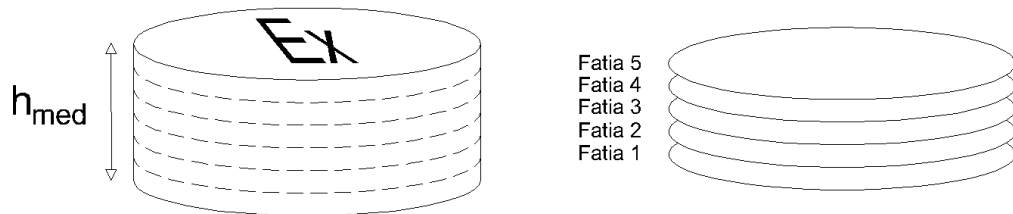
Portanto, tendo como referência essas identificações, as fatias começaram a ser extraídas sempre pelo lado oposto a elas, ou seja, pela base. Através da Figura 26 está representada a ordem de como o fatiamento foi efetuada nas amostras moldadas, e da Figura 27 a ordem do fatiamento nas amostras extraídas.

Figura 26 - Representação do processo de fatiamento das amostras moldadas.



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 27 - Representação do processo de fatiamento das amostras extraídas.



Fonte: Elaboração Própria.

Para a composição dos gráficos referentes as amostras moldadas, a curva granulométrica do topo foi plotada com os valores da média da granulometria de todas as “fatias 6” dos quatro corpos de prova, para a do meio com as “fatias 3” e para a da base com as “fatias 1”. Já para as extraídas, a curva do topo foi plotada com a média de todas as “fatias 5” dos quatro corpos de prova, para a do meio com as “fatias 3” e para a da base com as “fatias 1”.

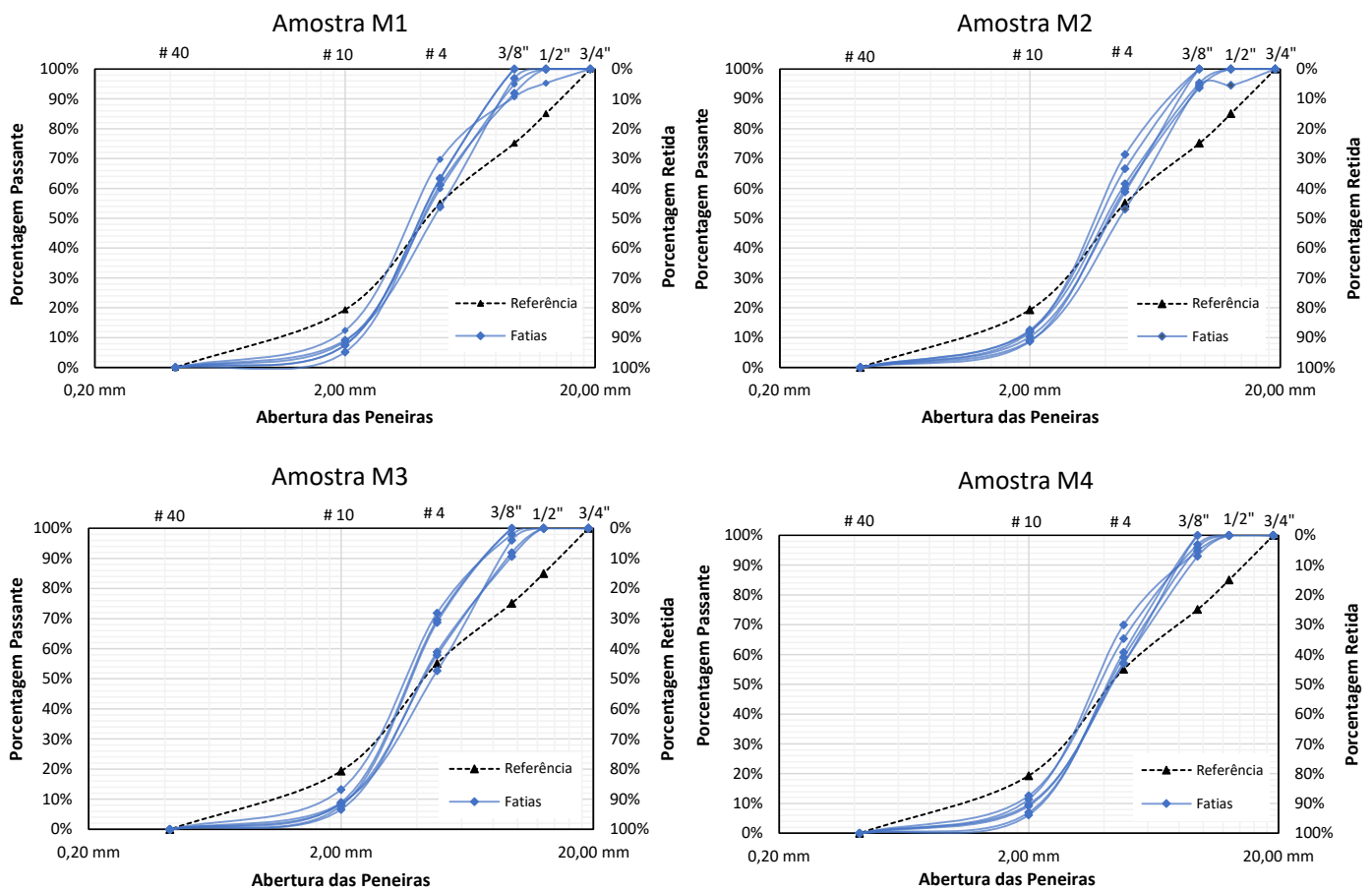
Essas plotagens estão organizadas e divididas conforme o tipo de obtenção das amostras, para identificar qual dos dois métodos de compactação da mistura proporcionou uma maior segregação de agregados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Análise granulométrica

A curva de referência foi plotada com as demais curvas, e para cada amostra, foram plotadas as curvas de cada fatia a modo de retratar a distribuição da granulometria de uma forma representativa, como apresentado na Figura 28.

Figura 28 - Curvas granulométricas das amostras moldadas.



Fonte: Elaboração Própria.

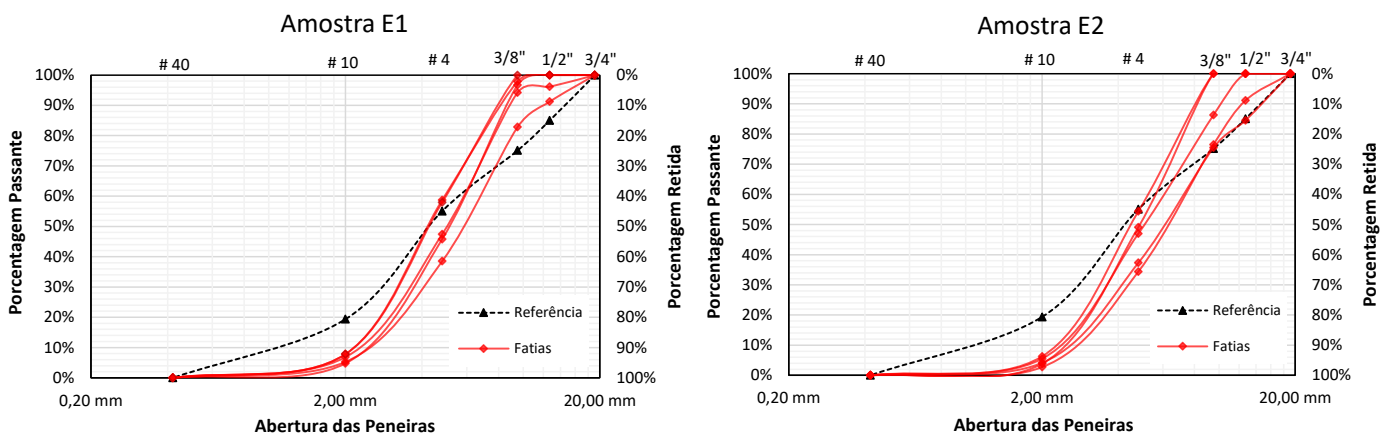
Em todas as amostras, as curvas granulométricas das fatias apresentaram forma diferente da curva de projeto. Nota-se a partir da análise das curvas granulométricas que a curva de projeto indica um material mais bem graduado se comparado as curvas por imageamento. Houve, porém, boa repetibilidade entre as análises das imagens realizadas. Alguns dos motivos possíveis para essa divergência estão elencados a seguir.

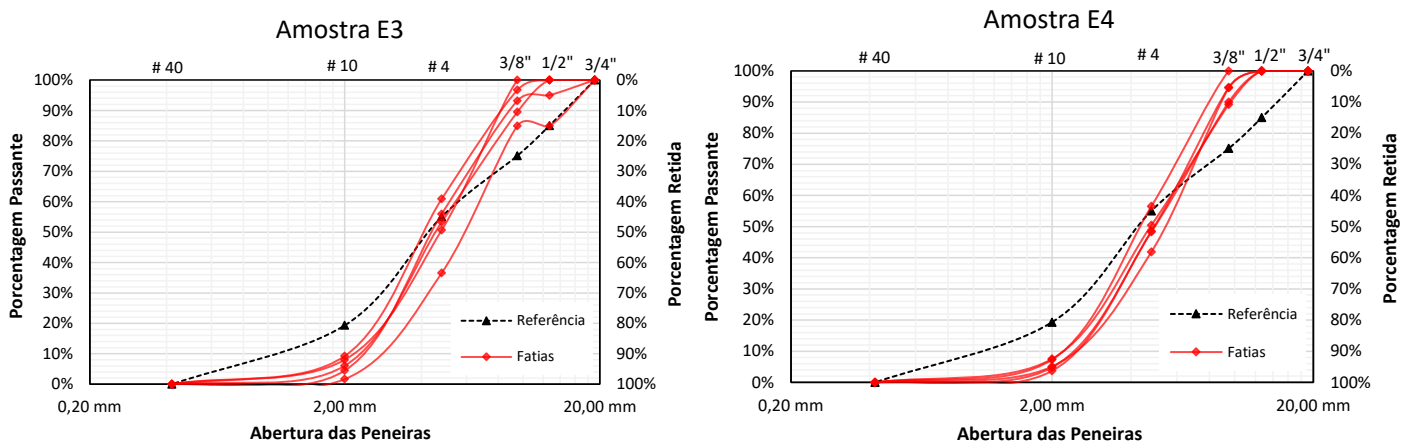
O primeiro deles, e talvez o principal, é o fato de a análise das granulometrias serem realizadas com base em imagens bidimensionais, a partir de dimensões das seções dos agregados. Com o fatiamento dos corpos de prova e o imageamento apenas de uma face bidimensional, a granulometria das partículas acabou sendo modificada.

O segundo, leva em consideração algumas falhas no processamento digital de imagens. Tal falha ocorreu durante o processo de segmentação, onde o software encontra dificuldades de delimitar as partículas e leva em consideração que alguns agregados maiores estão divididos em fragmentos menores. As principais causadoras disso são mudanças na tonalidade das cores das partículas ou manchas originadas no processo de serragem das fatias. Esse fato ocasiona a diminuição da quantidade de partículas de maior granulometria, e conseqüentemente, o aumento das partículas menores. Um exemplo disso pode ser observado nos gráficos, na peneira #10 foram identificados vários pontos das curvas abaixo da curva de projeto, e nas peneiras 3/8" e 1/2", acima.

A curva granulométrica de projeto também foi plotada juntamente com curvas das fatias das amostras extraídas, a fim de realizar a análise granulométrica e comparar com os resultados das moldadas. A seguir, na Figura 29 são apresentados os gráficos com as curvas referentes as amostras extraídas.

Figura 29 - Curvas granulométricas das amostras extraídas.



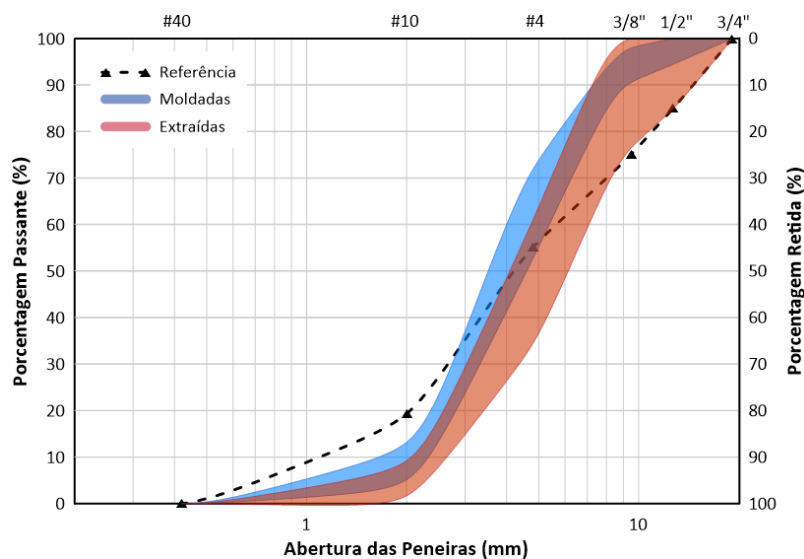


Fonte: Elaboração Própria.

Como ilustrado na Figura 29, assim como nas moldadas, todas as curvas granulométricas por imageamento das amostras extraídas apresentaram forma diferente da curva de projeto. Diferentemente das amostras moldadas onde as curvas das fatias encontravam-se mais próximas umas das outras, nas fatias extraídas as curvas apresentam-se mais afastadas, e isso caracteriza uma distribuição de granulometria mais desigual nestas amostras.

Para comparar as faixas granulométricas, foi plotado um gráfico com as faixas de proporção de área referentes a todas as curvas moldadas, todas as extraídas e a curva de projeto (Figura 30).

Figura 30 - Sobreposição das áreas das amostras com a curva de projeto.



Fonte: Elaboração Própria.

Conforme ilustrado na Figura 30, as proporções das áreas das amostras moldadas e extraídas se sobrepõem em uma região do gráfico em que as granulometrias se assimilam, porém, ambas as faixas representam curvas que se diferem da curva de projeto.

Também é possível perceber, que as amostras moldadas ocupam uma proporção de área no gráfico menor, apresentando curvas granulométricas mais próximas, indicando repetibilidade dos resultados e que a granulometria destas amostras é semelhante em boa parte das fatias dos corpos de prova. De forma oposta, as amostras extraídas ocupam uma proporção de área maior, e isso significa que as curvas das fatias se apresentam mais distantes umas das outras.

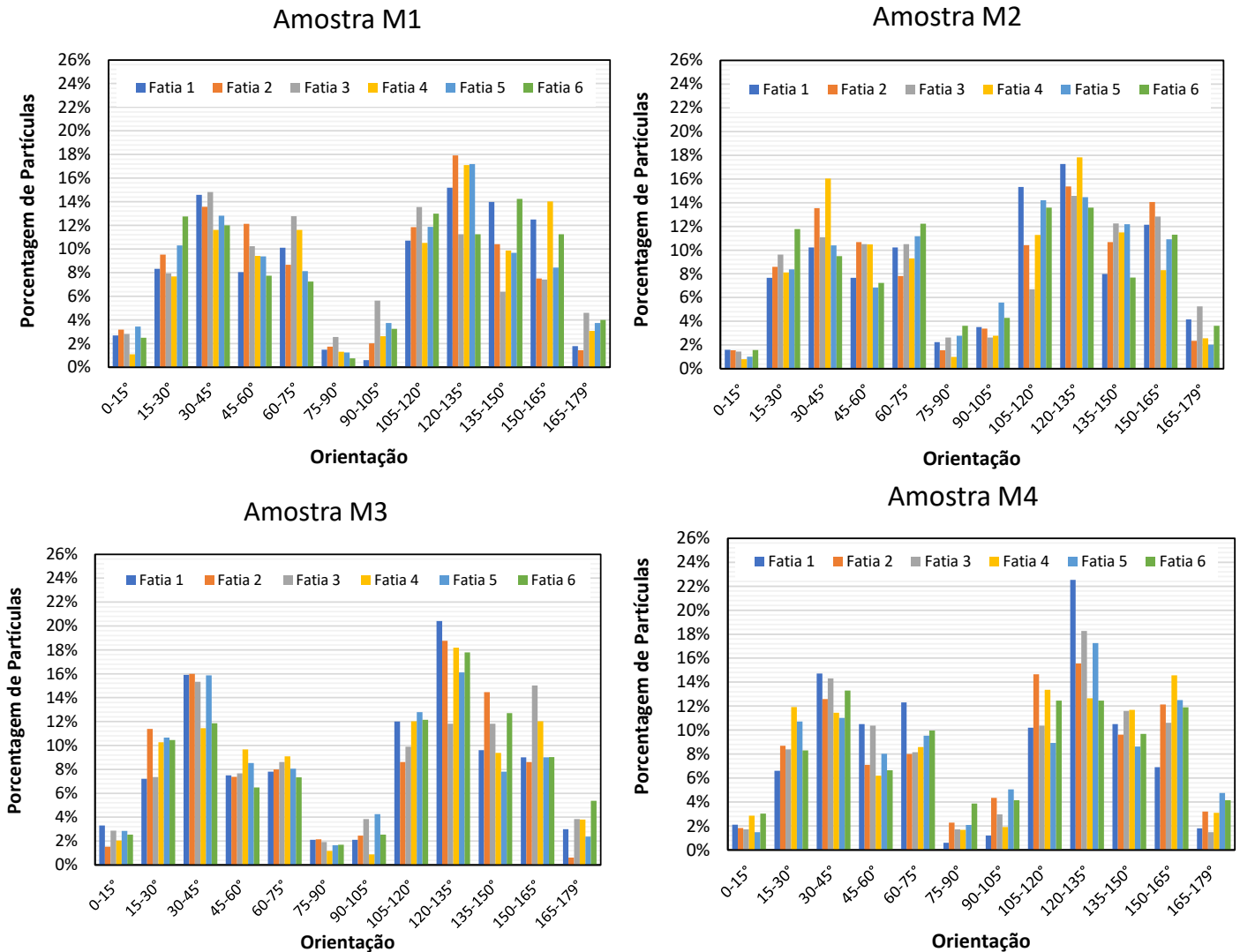
Tal variabilidade granulométrica pode ser explicada se for levado em consideração que essas amostras foram retiradas de alguns pontos ao longo de um trecho de aproximadamente 100 metros, apesar de um mesmo traço de mistura ser usado para a via, pode que pequenas variações granulométricas sejam encontradas para trechos longos assim. Outro fato que também pode ser considerado, é a possibilidade de ter ocorrido segregação durante a etapa de compactação ou até mesmo de ter sido executada uma compactação malfeita da mistura.

4.2. Análise da orientação das partículas

Para analisar as orientações das partículas, plotagens referentes a orientação e a porcentagem de partículas foram preparadas. Partindo disso, o objetivo é realizar a comparação entre os mesmos e verificar a influência que o método de compactação utilizado teve na orientação das partículas na mistura.

A seguir, estão apresentados na Figura 31, os gráficos referentes as orientações das partículas nas fatias das amostras moldadas, que representam a compactação dos agregados na mistura utilizando o método Marshall.

Figura 31 - Orientação das partículas das amostras moldadas.



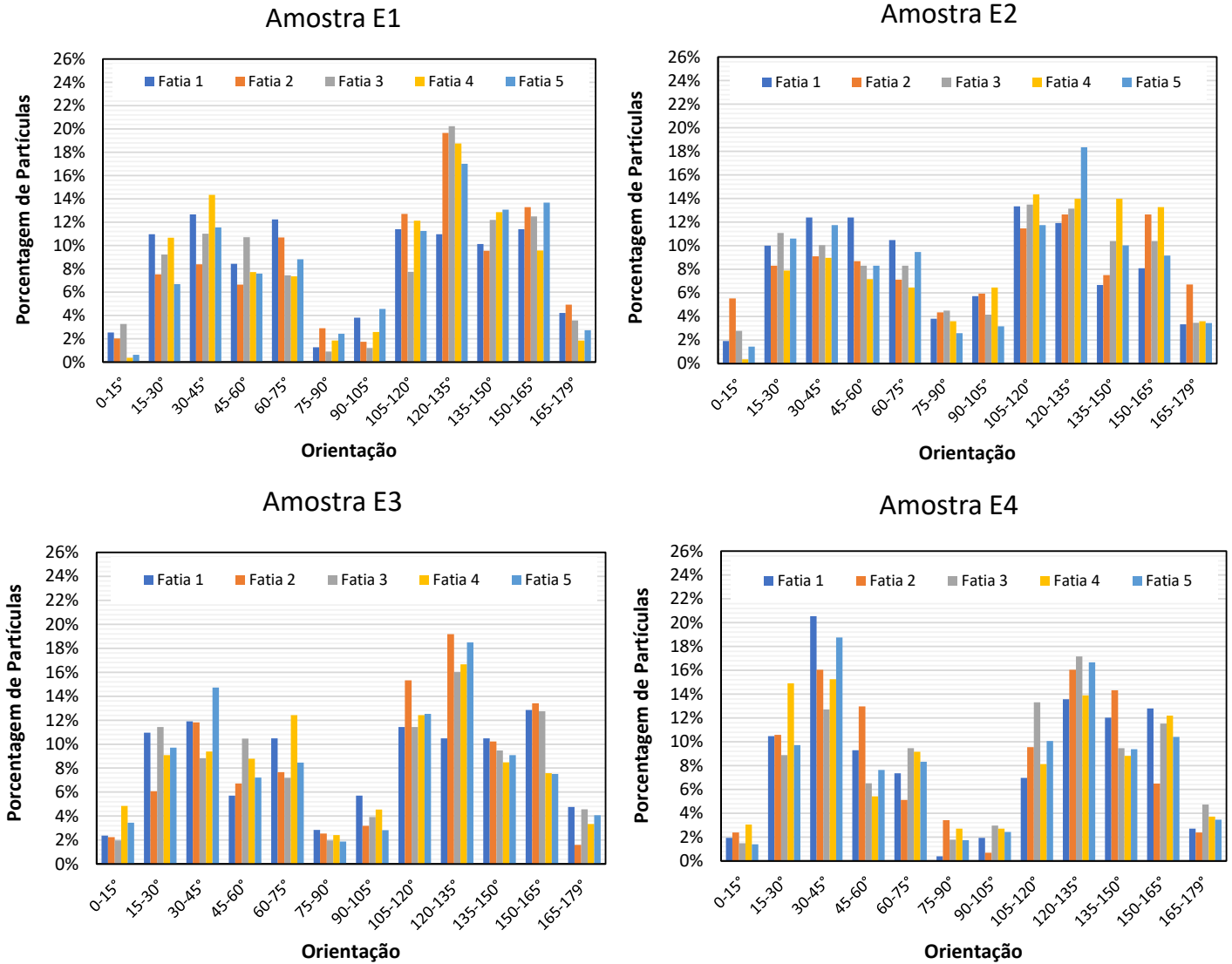
Fonte: Elaboração Própria.

Com base nos gráficos da Figura 31, percebe-se que em todas as amostras houve similaridade nas orientações. Em todas as fatias foram observadas regiões de baixas porcentagens e dois trechos onde tem-se uma porcentagem alta de partículas, nos intervalos de 15 a 75° e de 105 a 165°. Essas baixas porcentagens significam que dentre todas as amostras analisadas, uma parcela muito pequena de agregados apresentou orientações menores do que 15°, maiores do que 165° e presentes no intervalo entre 75 e 105°.

Para verificar a orientação das partículas das amostras extraídas, foram plotados gráficos análogos aos apresentados acima, que serviram de comparação com os mesmos e como forma de tentar compreender os resultados obtidos até então.

Os gráficos expostos na Figura 32 representam as orientações dos corpos de prova extraídos de campo.

Figura 32 - Orientação das partículas das amostras extraídas.



Fonte: Elaboração Própria.

Observa-se que o comportamento dos gráficos é similar ao das amostras moldadas, tendo trechos com porcentagens baixas e que indicam uma quantidade pequena de agregados com orientações no intervalo de angulação requerida, e trechos com aumento das porcentagens de partículas.

Em ambos os tipos de amostras foram detectadas pequenas quantidades de partículas orientadas em um intervalo de 75° a 105°, menores do que 15° e maiores

do que 165° , e as análises teóricas no intuito de tentar entender este comportamento se mostraram ineficazes.

Assim como para o caso anterior, a análise da orientação se deu de maneira bidimensional, então a consideração de cada partícula ocorreu a partir da angulação de uma seção do corte feito no agregado, com base em um plano referencial horizontal. Ao não analisar tridimensionalmente a partícula, não se leva em consideração o seu formato, e conseqüentemente, não se considera a orientação com base no seu eixo central/principal, que representa a orientação do agregado como um todo, e não com base em seções de corte feitas no mesmo.

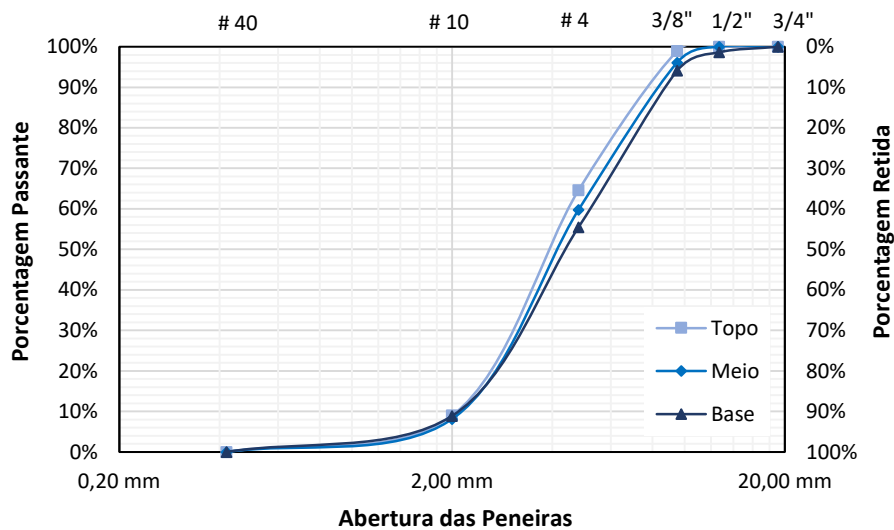
Quando comparados os métodos de compactação e as respectivas orientações dos agregados proporcionadas por eles, não houve uma diferença significativa com relação a este parâmetro.

4.3. Análise da distribuição/segregação das partículas

A análise da distribuição das partículas nas amostras foi efetuada com base nas médias das granulometrias para o topo, meio e base dos corpos de prova a partir da verificação e comparação entre as respectivas curvas granulométricas. Dessa forma foi possível identificar ao longo das amostras, quais as regiões que apresentavam maiores granulometrias, afim de constatar a ocorrência de segregação.

As plotagens das curvas estão organizadas e divididas conforme o tipo de amostra, moldadas e extraídas, para identificar qual dos dois métodos de compactação da mistura proporcionou a maior segregação dos agregados. As curvas totais, das quais foram extraídas as médias, são divulgadas nos Apêndices E e F. A seguir, são apresentados por meio da Figura 33, os gráficos relativos às moldadas.

Figura 33 - Curvas granulométricas das médias de topo, meio e base das amostras moldadas.



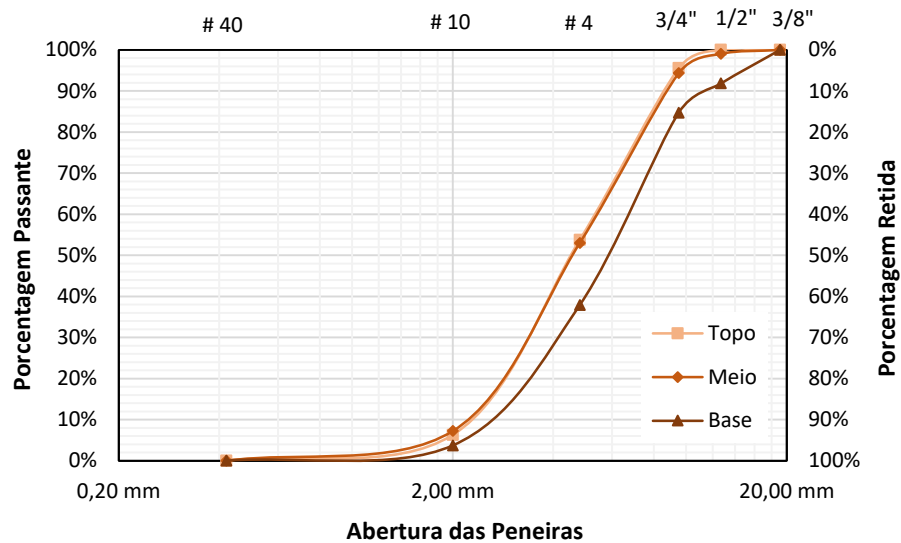
Fonte: Elaboração Própria.

Por meio da Figura 33 é possível verificar que as curvas apresentam quase o mesmo traçado, não havendo diferenças significativas entre a distribuição de granulometria dos agregados nas mesmas. Na peneira #4 há uma leve diferença nas granulometrias entre o topo e a base, onde as fatias de base apresentam cerca de 10% a mais de partículas retidas. O mesmo caso é observado na peneira de 1/2", onde a porcentagem de partículas retidas na curva da base é cerca de 5% maior do que a do topo.

Apesar destes leves aumentos nas porcentagens de agregados na curva da base, no geral, as curvas granulométricas apresentam valores com proporções bem semelhantes. Com isso, não é possível afirmar que os agregados destes corpos de prova sofreram segregação, porém como tem se observado, o corte seguido do imageamento bidimensional cria uma espécie de média da granulometria, então também não é possível concluir que não houve segregação.

Análogos aos gráficos apresentados acima, foram plotadas as curvas médias das fatias das amostras extraídas, e as mesmas estão apresentadas na Figura 34.

Figura 34 - Curvas granulométricas de médias de topo, meio e base das amostras extraídas.



Fonte: Elaboração Própria.

Com base na Figura 34 é possível verificar que as curvas das fatias do topo e meio estão quase sobrepostas, representando basicamente a mesma granulometria para ambas. Em compensação, há uma diferença clara entre os traçados destas curvas com a curva da base, onde a porcentagem retida de agregados graúdos é maior em boa parte das peneiras.

Na peneira #4, a curva da base possui cerca de 15% a mais de partículas retidas, se comparada com o topo e o meio. O mesmo caso é observado nas peneiras 3,4" e 1/2", em que as porcentagens retidas na curva da base também apresentam valores maiores do que os encontrados nas curvas do meio e do topo, cerca de 10%.

Estes resultados podem indicar que houve segregação na execução do pavimento asfáltico do qual as amostras foram extraídas.

5. CONCLUSÕES

5.1. Considerações finais

O presente trabalho teve como principal objetivo a determinação da viabilidade em analisar propriedades de amostras de revestimentos asfálticos por meio do processamento de imagens através do software ImageJ/Fiji, comparando-as as idealizadas no projeto de pavimentação da via analisada.

De forma geral, as propriedades da mistura asfáltica foram determinadas e seus respectivos resultados mostraram que o processamento digital de imagens é um método promissor, podendo se tornar eficaz para tal fim, porém necessita de algumas melhorias para se obter resultados ainda mais significativos.

As melhorias se referem, principalmente, à utilização de outras metodologias que permitam a análise tridimensional das partículas, pois a aplicação do processo de serragem nas amostras fez com que as propriedades dos agregados fossem analisadas a partir das seções expostas pelo fatiamento, e isso acabou alterando consideravelmente as propriedades geométricas das partículas.

Na verificação da granulometria, o processo de serragem interferiu na determinação das dimensões dos agregados, acarretando em curvas granulométricas diferentes da de projeto, o que impossibilitou a aplicação da técnica de imageamento como forma de verificação da granulometria. A comparação entre a curva granulométrica das amostras moldadas e extraídas indicou que de forma geral as amostras moldadas levaram a uma granulometria com partículas de menor dimensão se comparadas as amostras extraídas. O motivo para tal observação, porém, não ficou claro.

Quanto a análise de orientação, foi observada boa repetibilidade entre as análises, sendo os resultados das amostras moldadas os mais consistentes. Observou-se que menos partículas apresentavam-se orientadas em ângulos menores que 15° , entre 75° e 105° e maiores que 165° , sendo em sua maioria as partículas orientadas em ângulos intermediários a estes.

E a análise da distribuição/segregação das partículas teve como base as médias das curvas granulométricas do topo, meio e base das amostras, onde se identificou nas amostras extraídas a possibilidade de segregação, mas estudos adicionais são necessários para garantir maior poder de afirmação.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar a tomografia computadorizada nas amostras, a fim de proporcionar uma análise tridimensional das partículas e verificar as propriedades reais de cada uma delas;
- Utilizar as imagens provenientes da tomografia computadorizada no software ImageJ, pois o mesmo apresenta plugins capazes de gerar amostras virtuais tridimensionais a partir do processamento de várias imagens em sequência.

REFERÊNCIAS

ALEGRETE. **Memorial descritivo de pavimentação, sinalização e acessibilidade de via urbana**. Departamento de Arquitetura e Engenharia. Secretaria de Planejamento. Prefeitura Municipal de Alegrete, 2021.

ALKEMPER, J.; VOORHEES, P. W. **Quantitative serial sectioning analysis**. *Journal of Microscopy*, v. 201, pt. 3, p. 388-394, 2001.

AL ROUSAN, T. M. **Characterization of Aggregate Shape Properties Using a Computer Automated System**. Tese (Doutorado em Filosofia, com tema principal Engenharia Civil) – *Department of Civil Engineering, Texas A&M University, College Station Texas*, 2004.

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. PETROBRAS: ABEDA. Rio de Janeiro, 2006.

BESSA, I. S. **Avaliação do processamento digital de imagens como ferramenta para caracterização de agregados e misturas asfálticas**. Tese de Mestrado em Engenharia de Transportes – Universidade Federal do Ceará. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2012.

BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B. **Caracterização de agregados convencionais e alternativos utilizando técnicas de processamento digital de imagens**. XXIII Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes – ANPET, 2009.

BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B. **Evaluation of Different Digital Image Processing Software for Aggregates and Hot Mix Asphalt Characterizations**. *Construction & Building Materials*, v. 37, p. 370-378, 2012.

BRAZ, D.; LOPES, R. T.; MOTTA, L. M. G. **Avaliação estrutural de amostras asfálticas de campo e de laboratório usando a tomografia computadorizada**. IV Encontro Nacional de Aplicações Nucleares, v. 2, p. 710-714, 1997.

CARDOSO, E. R. *et al.* **Análise Estrutural de Misturas Asfálticas de Alto Desempenho Utilizando Tomografia Computadorizada**. *International Nuclear Atlantic Conference – INAC*. Santos, 2005.

DNIT. **Manual de Pavimentação**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 3.ed - Rio de Janeiro, 2006.

DNIT. **Norma 178/2018 – PRO - Pavimentação asfáltica – Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall – Procedimento**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2018.

DNIT. **Norma 031/2006 – ES - Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificações de serviço**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2006.

ECHLIN, M. P. *et al.* **Serial sectioning in the SEM for three dimensional materials science**. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, v. 24, n. 2, p. 100817, 2020.

FERREIRA, T.; RASBAND, W. S. **ImageJ User Guide** – IJ 1.46, [imagej.nih.gov / ij / docs /](http://imagej.nih.gov/ij/docs/), 2012.

GUILHERME, P. D. B. *et al.* **Análise granulométrica de sedimentos arenosos de praias através de imagens digitais – Descrição de um protocolo de mensuração de partículas no software ImageJ-Fiji**. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, v. 19, n. 2, p. 23-32, 2015.

HARTMANN, D. A. **Um gerador de amostras virtuais de misturas asfálticas: desenvolvimento e aplicabilidade em simulações microestruturais**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

HUNTER, A. E.; AIREY, G. D.; COLLOP, A. C. **Aggregate orientation and segregation in laboratory compacted asphalt samples**. *Transportation Research Record*, v. 1891, n. 1, p. 8-15, 2004.

KIM, H.; HAAS, C. T.; RAUCH, A. F. **Image Texture Based Quality Control of Aggregate Production**. International Center for Aggregates Research 11th Annual Symposium: Aggregates – Asphalt Concrete, Bases and Fines. Austin, Texas, 2003.

KUO, C. Y.; FREEMAN, R. B. **Image Analysis Evaluation of Aggregates for Asphalt Concrete Mixtures**. *Transportation Research Record*, v. 1615, p. 65-71, 1998.

MASAD, E.; BUTTON, J. W. **Unified imaging approach for measuring aggregate angularity and texture**. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, v. 15, n. 4, p. 273-280, 2000.

MASAD, E. *et al.* Quantifying laboratory compaction effects on the internal structure of asphalt concrete. *Transportation Research Record*, v. 1681, n. 1, p. 179-185, 1999.

MASAD, E. **X-ray computed tomography of aggregates and asphalt mixes**. *Materials Evaluation*, v. 62, n. 7, p. 775-783, 2004.

MEDINA, G. S. **Análise de imagens tomográficas de corpos de prova compostos por agregados de BGS por meio do software ImageJ**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Maria. Departamento de Transportes, Santa Maria, 2021.

MEDINA, J. MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. Universidade Federal do Rio de Janeiro – COOPPE. Rio de Janeiro, 2005.

RAO, C.; TUTUMLUER, E.; KIM, E. T. **Quantification of coarse aggregate angularity based on image analysis**. *Transportation Research Record*, v. 1787, n. 1, p. 117-124, 2002.

- SCHINDELIN, J.; ARGANDA-CARRERAS, I.; FRISE, E. *et al.* ***Fiji: na open-source platform for biological-image analysis.*** *Nat Methods*, v. 9, p. 676-682, 2012.
- SOUSA *et al.* ***Evaluation of laboratory procedures for compacting asphalt – aggregate mixtures.*** *Strategic Highway Research Program - SHRP-A-UWP, Nacional Research Council*, p. 91-523, 1991.
- SPOWART, J. E. ***Automated serial sectioning 3D analysis of microstructure.*** *Scripta Materialia*, v. 55, n. 1, p. 5-10, 2006.
- TASHMAN, L. *et al.* ***X-ray tomography to characterize air void distribution in superpave gyratory compacted specimens.*** *The International Journal of Pavement Engineering*, v. 3 (1), p. 19-28, 2002.
- TASHMAN, L.; MASAD, E.; LITTLE, D. HUSSEIN, Z. ***A Microstructure-Based Viscoplastic Model for Asphalt Concrete.*** *International Journal of Plasticity*, 2004.
- VASCONCELOS, K. L.; EVANGELISTA JR, F.; SOARES, J. B. ***Análise da Estrutura Interna de Misturas Asfálticas.*** XVII Congresso Brasileiro de Pesquisa e Ensino em Transportes, Recife, 2005.
- WANG, L. ***Mechanics of asphalt: microstructure and micromechanics.*** McGraw-Hill Education. 1 ed, 2010.
- YUE, Z. Q.; BEKKING, W.; MORIN, I. ***Application of digital image processing to quantitative study of asphalt concrete microstructure.*** *Transportation Research Record*, v. 1492. p. 53-60, 1995.
- ZELELEW, H. M.; PAPAGIANNAKIS, A. T.; MASAD, E. ***Application of digital image processing techniques for asphalt concrete mixture images.*** 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), p. 119-124, 2008.

APÊNDICE A – DADOS E DIMENSÕES DAS AMOSTRAS MOLDADAS NO PROCESSO DE FATIAMENTO

	Massa	Diâmetro	Dimensões Originais					
			h_1	h_2	h_3	h_4	h_{med}	
M_1	1090,41 g	9,90 cm	M_1	5,52 cm	5,51 cm	5,52 cm	5,53 cm	5,52 cm
M_2	1112,05 g	9,88 cm	M_2	5,53 cm	5,54 cm	5,59 cm	5,51 cm	5,54 cm
M_3	1159,86 g	9,80 cm	M_3	6,20 cm	6,51 cm	6,52 cm	6,53 cm	6,44 cm
M_4	1105,97 g	9,88 cm	M_4	5,51 cm	5,58 cm	5,58 cm	5,52 cm	5,55 cm

11/nov às 9h	Dimensões - 1ª Serragem					Espessura da Fatia Serrada
	h_1	h_2	h_3	h_4	h_{med}	
M_1	5,48 cm	5,53 cm	5,25 cm	5,17 cm	5,36 cm	0,16 cm
M_2	5,33 cm	5,39 cm	5,46 cm	5,43 cm	5,40 cm	0,14 cm
M_3	5,68 cm	5,34 cm	5,62 cm	5,81 cm	5,61 cm	0,83 cm
M_4	5,22 cm	5,12 cm	4,92 cm	5,20 cm	5,11 cm	0,43 cm

16/nov às 14h	Dimensões - 2ª Serragem					Espessura da Fatia Serrada
	h_1	h_2	h_3	h_4	h_{med}	
M_1	4,84 cm	4,83 cm	4,59 cm	4,79 cm	4,76 cm	0,59 cm
M_2	4,72 cm	4,89 cm	4,64 cm	4,55 cm	4,70 cm	0,70 cm
M_3	4,80 cm	4,87 cm	4,93 cm	4,89 cm	4,87 cm	0,74 cm
M_4	4,34 cm	4,67 cm	4,60 cm	4,30 cm	4,48 cm	0,64 cm

16/nov às 18h	Dimensões - 3ª Serragem					Espessura da Fatia Serrada
	h_1	h_2	h_3	h_4	h_{med}	
M_1	3,84 cm	3,81 cm	4,11 cm	4,16 cm	3,98 cm	0,78 cm
M_2	4,21 cm	4,13 cm	4,15 cm	4,31 cm	4,20 cm	0,50 cm
M_3	4,41 cm	4,19 cm	4,11 cm	4,43 cm	4,28 cm	0,59 cm
M_4	4,07 cm	4,01 cm	3,94 cm	4,08 cm	4,02 cm	0,45 cm

17/nov às 14h	Dimensões - 4ª Serragem					Espessura da Fatia Serrada
	h_1	h_2	h_3	h_4	h_{med}	
M_1	3,31 cm	3,42 cm	3,28 cm	3,21 cm	3,31 cm	0,68 cm
M_2	3,44 cm	3,49 cm	3,37 cm	3,37 cm	3,42 cm	0,78 cm
M_3	3,60 cm	3,50 cm	3,55 cm	3,51 cm	3,54 cm	0,75 cm
M_4	3,24 cm	3,45 cm	3,30 cm	3,17 cm	3,29 cm	0,73 cm

17/nov às 18h	Dimensões - 5ª Serragem					Espessura da Fatia Serrada
	h_1	h_2	h_3	h_4	h_{med}	
M_1	2,61 cm	2,84 cm	2,82 cm	2,76 cm	2,76 cm	0,55 cm
M_2	2,68 cm	2,64 cm	2,47 cm	2,56 cm	2,58 cm	0,83 cm
M_3	2,91 cm	2,90 cm	2,93 cm	2,93 cm	2,92 cm	0,62 cm
M_4	2,59 cm	2,73 cm	2,85 cm	2,71 cm	2,72 cm	0,57 cm

18/nov às 9h	Dimensões - 6ª Serragem					Espessura da Fatia Serrada
	h_1	h_2	h_3	h_4	h_{med}	
M_1	1,54 cm	1,65 cm	1,57 cm	1,63 cm	1,60 cm	1,16 cm
M_2	1,71 cm	1,65 cm	1,63 cm	1,65 cm	1,66 cm	0,93 cm
M_3	1,73 cm	1,76 cm	1,84 cm	1,76 cm	1,77 cm	1,14 cm
M_4	1,70 cm	1,82 cm	1,86 cm	1,83 cm	1,80 cm	0,92 cm

APÊNDICE B – DADOS E DIMENSÕES DAS AMOSTRAS EXTRAÍDAS NO PROCESSO DE FATIAMENTO

	Massa	Diâmetro	Dimensões Originais					
			h_1	h_2	h_3	h_4	h_{med}	
E ₁	744,79 g	9,40 cm	E ₁	4,30 cm	4,40 cm	4,31 cm	4,19 cm	4,30 cm
E ₂	797,07 g	9,25 cm	E ₂	4,35 cm	4,36 cm	4,41 cm	4,51 cm	4,41 cm
E ₃	780,02 g	9,40 cm	E ₃	4,60 cm	4,68 cm	4,45 cm	4,68 cm	4,60 cm
E ₄	661,26 g	9,30 cm	E ₄	3,80 cm	3,91 cm	4,30 cm	4,20 cm	4,05 cm

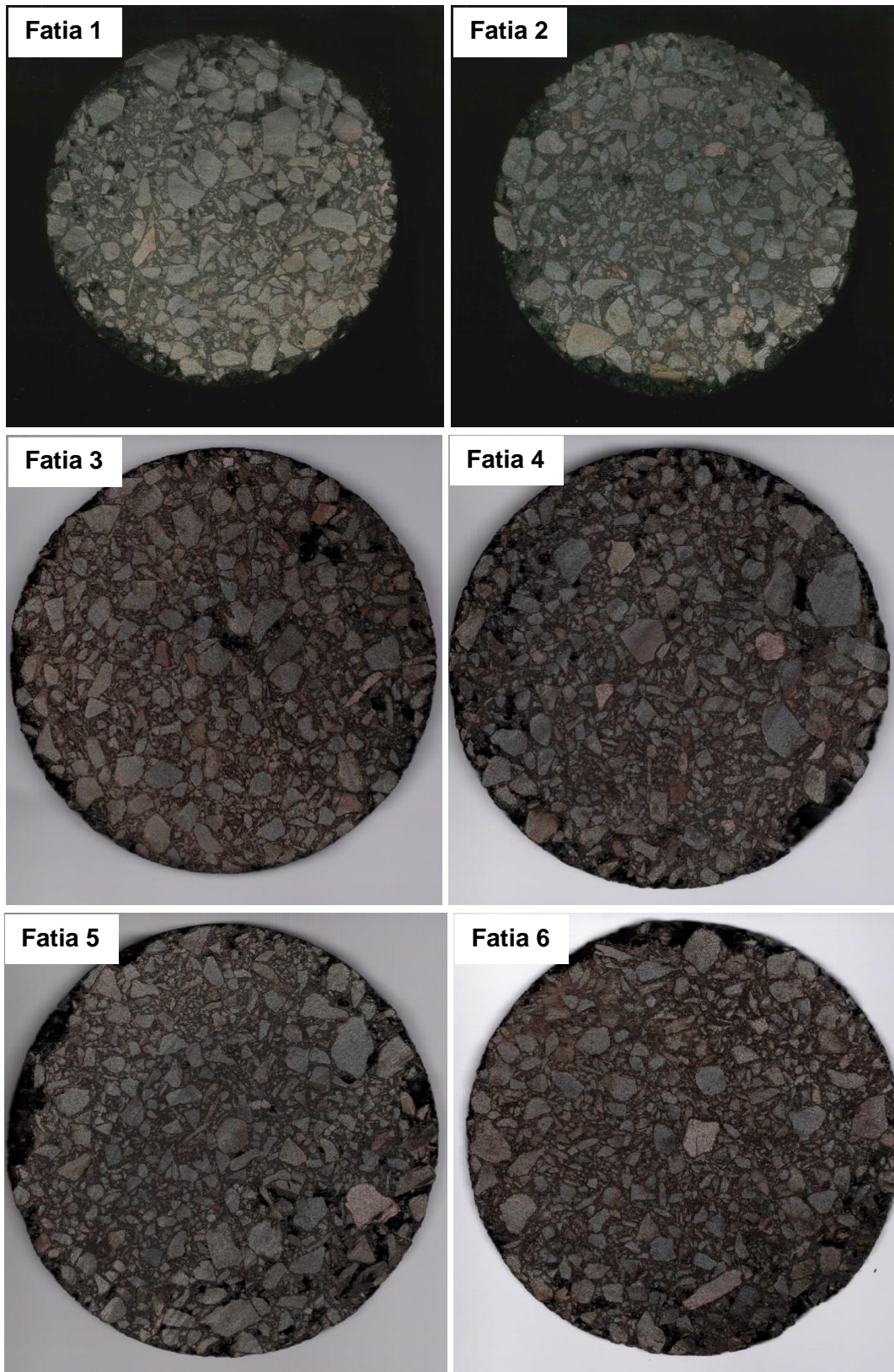
22/nov às 17:30h	Dimensões - 1ª Serragem					
	h_1	h_2	h_3	h_4	h_{med}	Espessura da Fatia Serrada
E ₁	4,28 cm	3,99 cm	3,89 cm	4,07 cm	4,06 cm	0,24 cm
E ₂	3,90 cm	4,03 cm	3,65 cm	3,58 cm	3,79 cm	0,62 cm
E ₃	3,97 cm	4,09 cm	4,02 cm	3,91 cm	4,00 cm	0,60 cm
E ₄	3,74 cm	3,55 cm	3,67 cm	3,87 cm	3,71 cm	0,35 cm

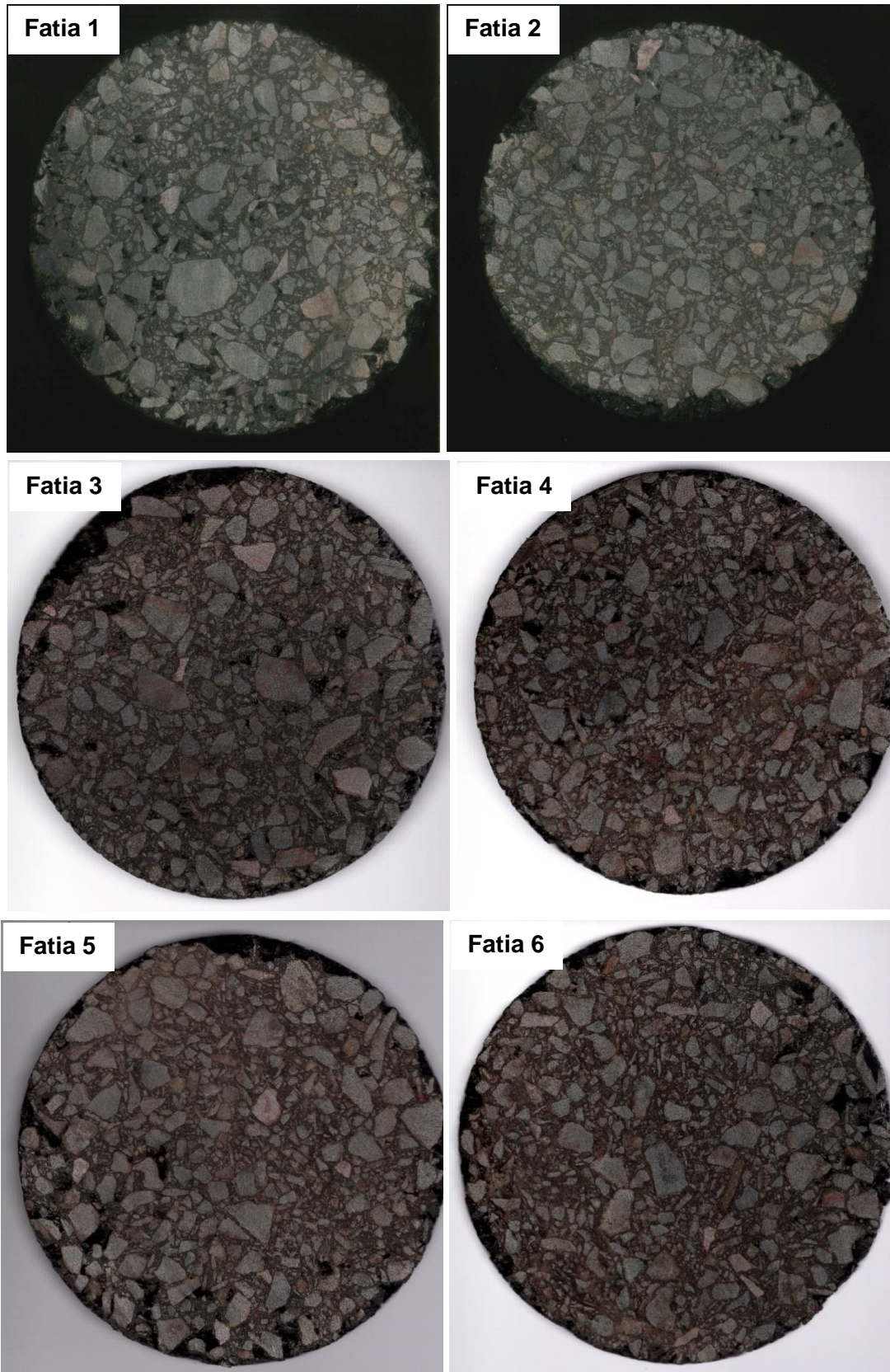
23/nov às 14h	Dimensões - 2ª Serragem					
	h_1	h_2	h_3	h_4	h_{med}	Espessura da Fatia Serrada
E ₁	3,53 cm	3,32 cm	3,35 cm	3,50 cm	3,42 cm	0,63 cm
E ₂	3,30 cm	3,28 cm	3,42 cm	3,40 cm	3,35 cm	0,44 cm
E ₃	3,31 cm	3,23 cm	3,29 cm	3,34 cm	3,29 cm	0,71 cm
E ₄	3,15 cm	3,13 cm	3,07 cm	3,07 cm	3,10 cm	0,60 cm

23/nov às 18h	Dimensões - 3ª Serragem					
	h_1	h_2	h_3	h_4	h_{med}	Espessura da Fatia Serrada
E ₁	2,88 cm	2,83 cm	2,84 cm	2,87 cm	2,85 cm	0,57 cm
E ₂	2,77 cm	2,78 cm	2,68 cm	2,70 cm	2,73 cm	0,62 cm
E ₃	2,57 cm	2,57 cm	2,58 cm	2,59 cm	2,58 cm	0,71 cm
E ₄	2,48 cm	2,57 cm	2,55 cm	2,52 cm	2,53 cm	0,57 cm

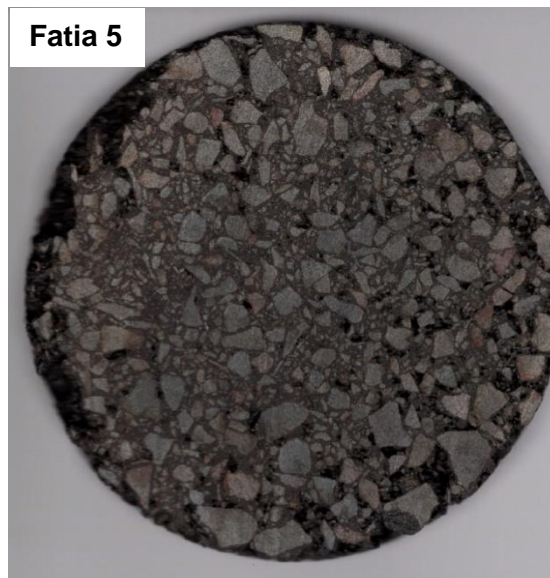
24/nov às 9h	Dimensões - 4ª Serragem					
	h_1	h_2	h_3	h_4	h_{med}	Espessura da Fatia Serrada
E ₁	2,26 cm	2,14 cm	2,14 cm	2,18 cm	2,18 cm	0,67 cm
E ₂	2,14 cm	2,10 cm	2,10 cm	2,14 cm	2,12 cm	0,61 cm
E ₃	1,94 cm	1,84 cm	1,91 cm	2,00 cm	1,92 cm	0,65 cm
E ₄	1,85 cm	1,83 cm	1,86 cm	1,92 cm	1,86 cm	0,67 cm

24/nov às 14h	Dimensões - 5ª Serragem					
	h_1	h_2	h_3	h_4	h_{med}	Espessura da Fatia Serrada
E ₁	1,62 cm	1,48 cm	1,49 cm	1,58 cm	1,54 cm	0,64 cm
E ₂	1,50 cm	1,54 cm	1,46 cm	1,40 cm	1,48 cm	0,64 cm
E ₃	1,36 cm	1,39 cm	1,33 cm	1,34 cm	1,36 cm	0,57 cm
E ₄	1,38 cm	1,32 cm	1,34 cm	1,39 cm	1,36 cm	0,51 cm

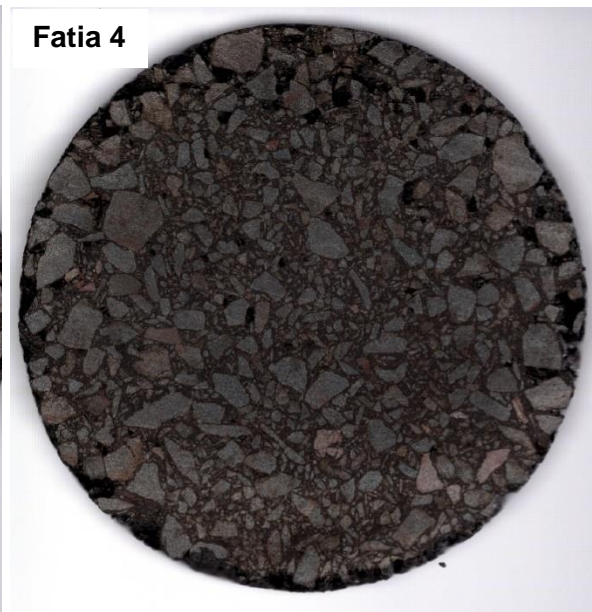
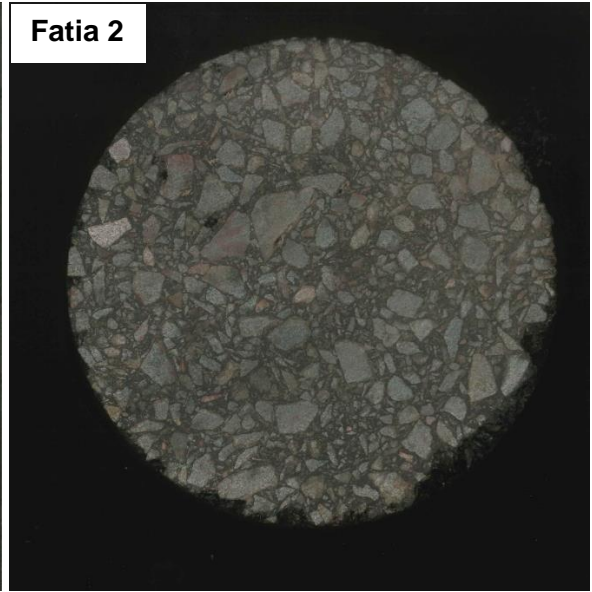
APÊNDICE C – IMAGENS DIGITALIZADAS DAS AMOSTRAS MOLDADAS**Amostra M1**

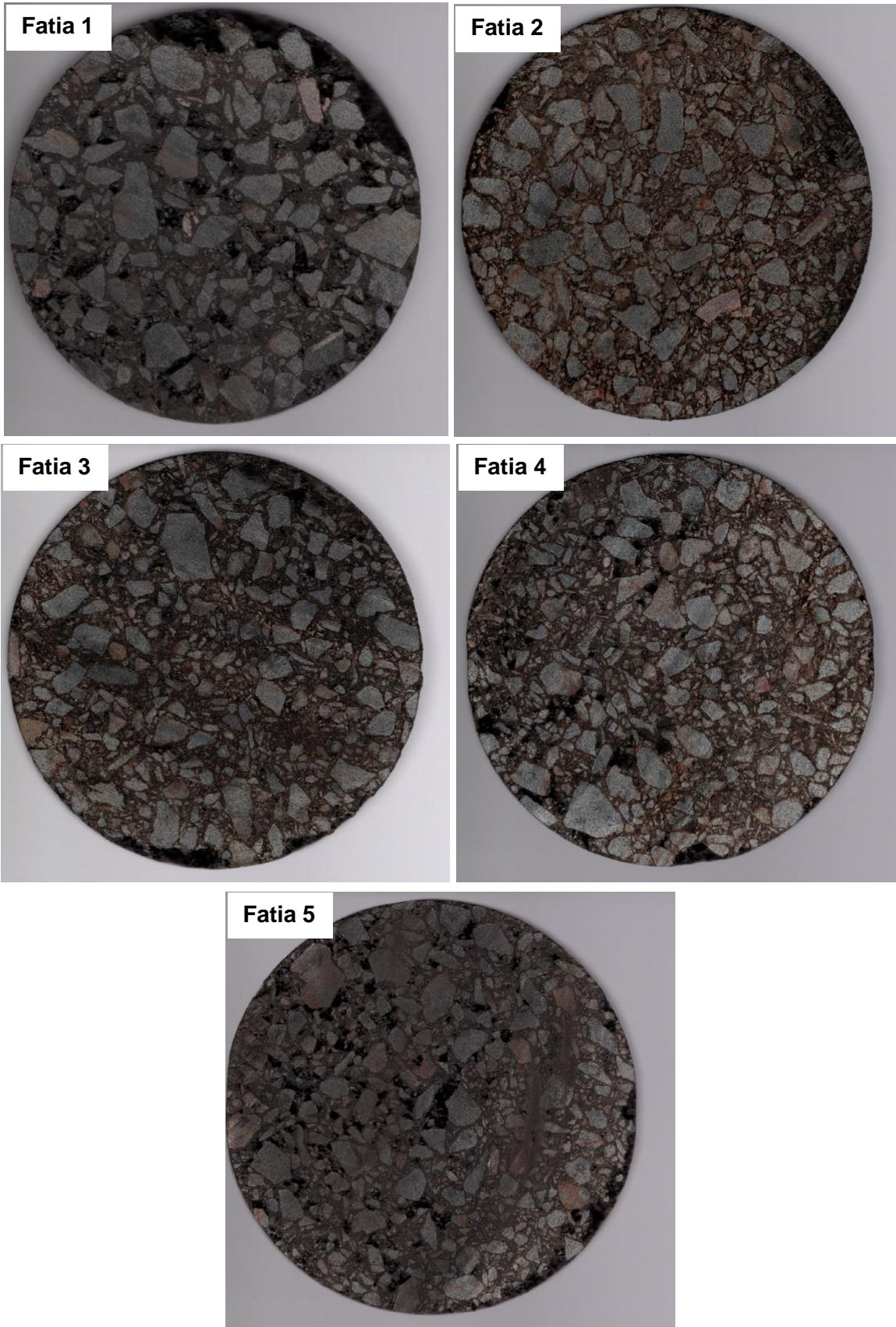
Amostra M2

Amostra M3

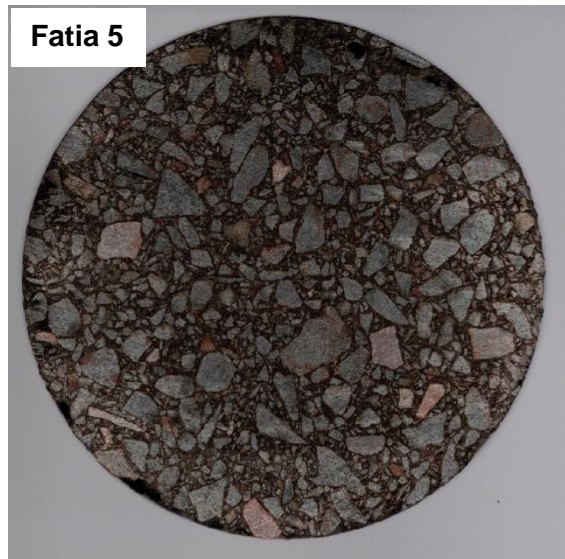
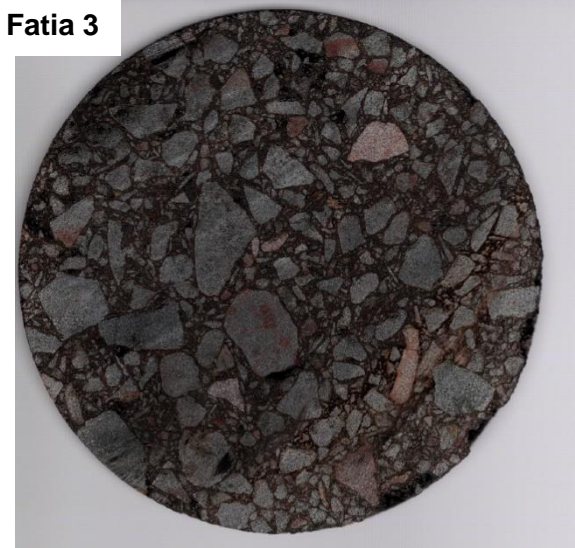
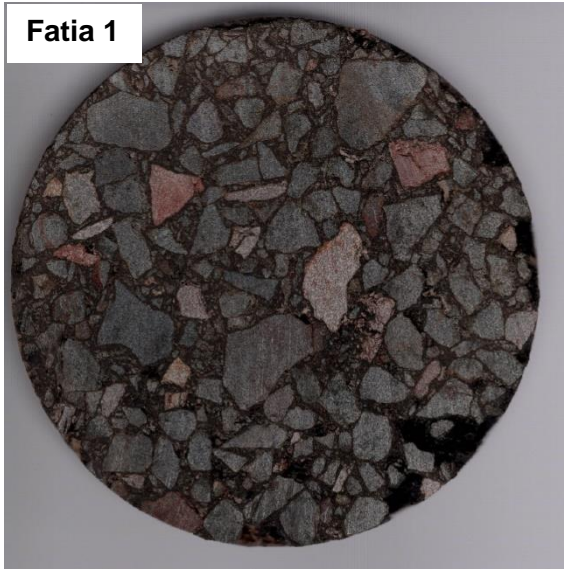


Amostra M4

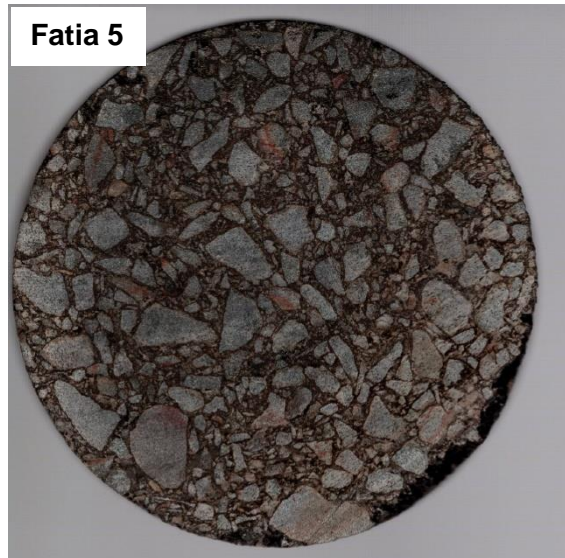
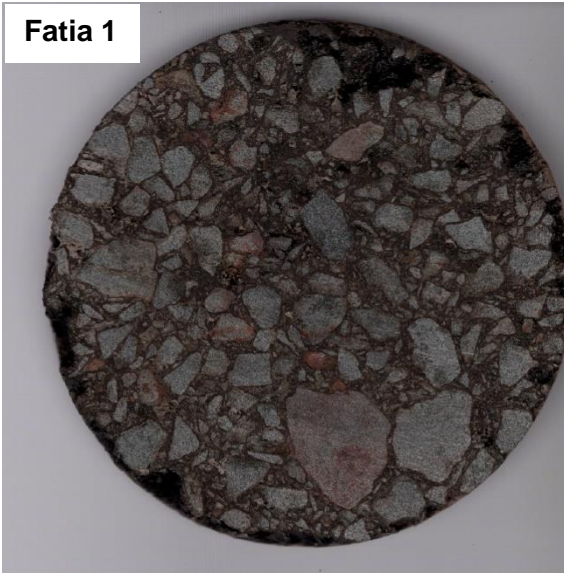


APÊNDICE D – IMAGENS DIGITALIZADAS DAS AMOSTRAS EXTRAÍDAS**Amostra E1**

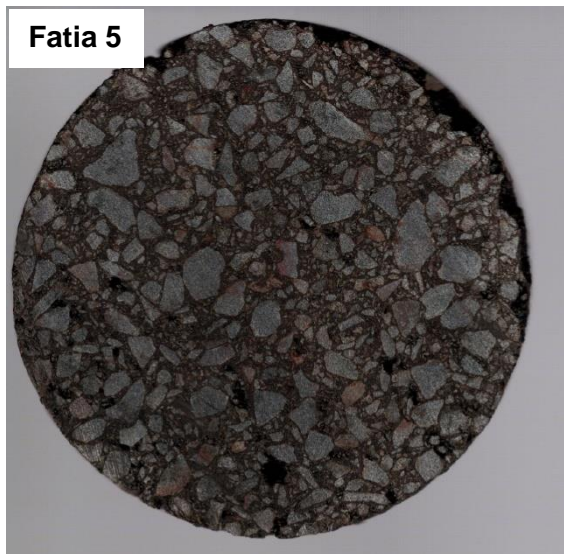
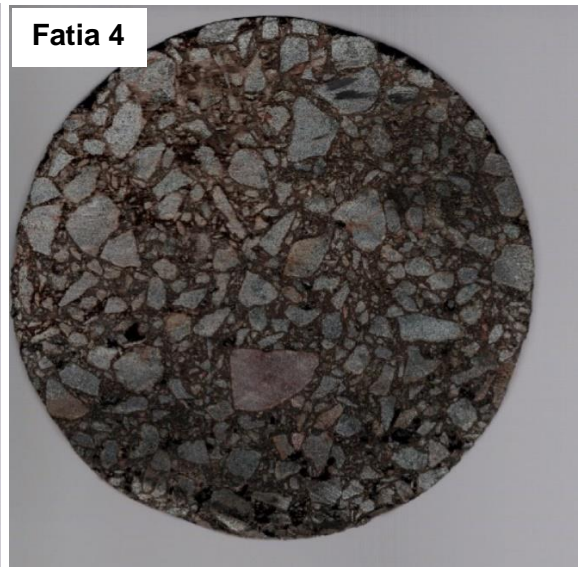
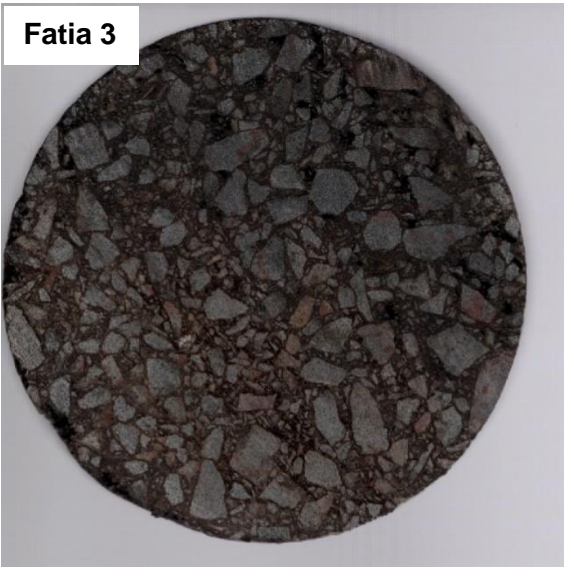
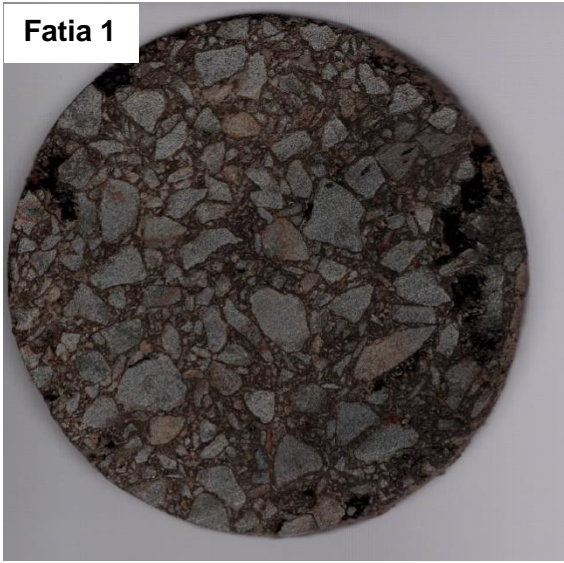
Amostra E2



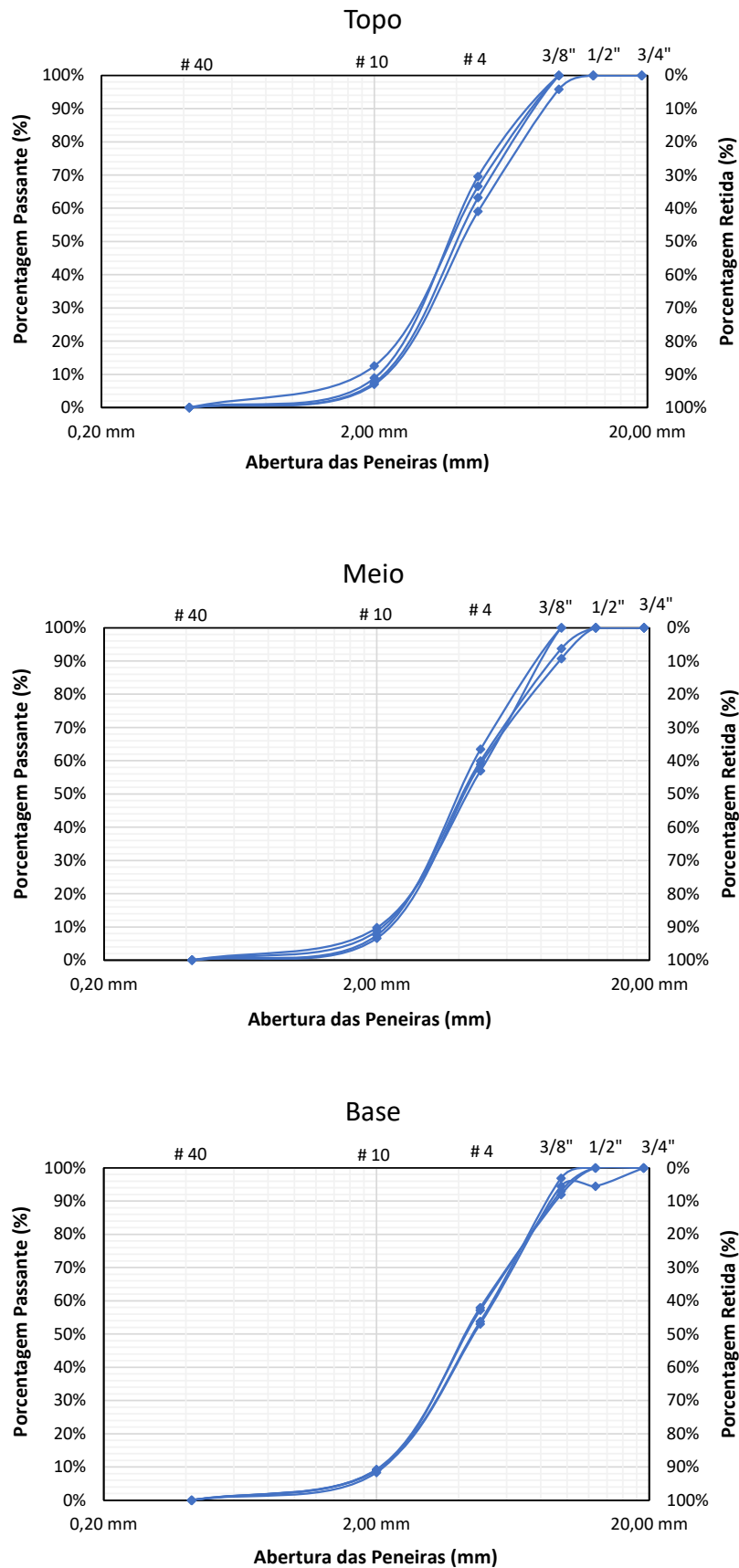
Amostra E3



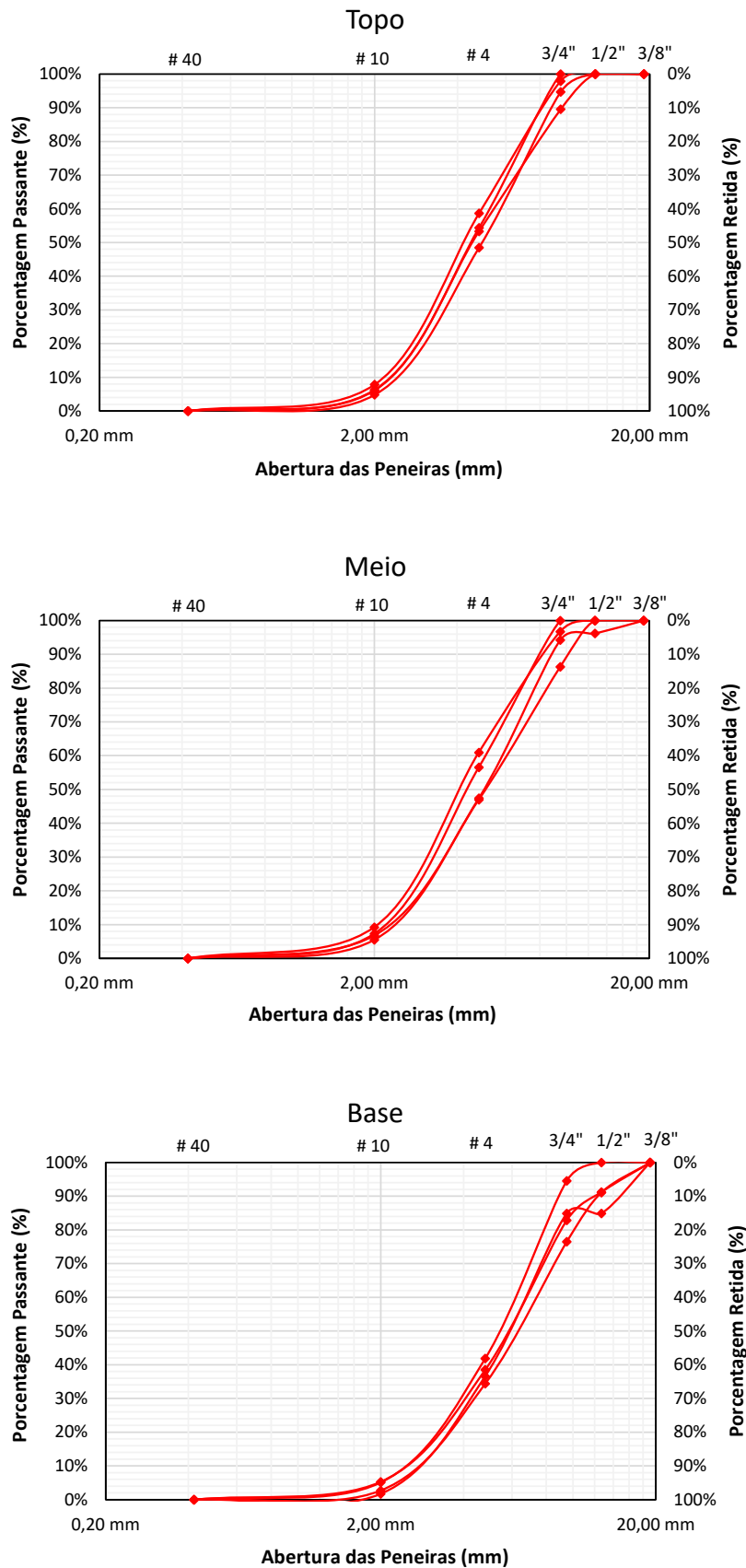
Amostra E4




APÊNDICE E – CURVAS GRANULOMÉTRICAS TOTAIS DO TOPO, MEIO E BASE DAS AMOSTRAS MOLDADAS



APÊNDICE F – CURVAS GRANULOMÉTRICAS TOTAIS DO TOPO, MEIO E BASE DAS AMOSTRAS EXTRAÍDAS



ANEXO A – PROPRIEDADES DA MISTURA ASFÁLTICA FAIXA C

 PROPRIEDADES FINAIS DA MISTURA		
<i>Propriedade</i>	<i>DNIT 031/2006 - ES</i>	<i>Valor de Projeto</i>
<i>Teor de Betume (%)</i>		4,80%
<i>Volume de Vazios (%)</i>	3 a 5	3,8
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	75 a 82	75,0
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	>15	15,6
<i>Densidade Aparente (kN/m³)</i>	97% (mínimo)	2,434
<i>Relação Finos / Betume</i>		1,4
<i>Estabilidade (kgf)</i>	>500	1130
<i>Fluência</i>		9,8
<i>Adesividade Cap. 50/70</i>	Satisfatória	
<i>EQ. Areia</i>	64,0%	
PENEIRA	Abertura	Mistura
3/4"	19,1	100
1/2"	12,7	87
3/8"	9,5	78,4
Nº 4	4,8	61
Nº 10	2	30
Nº 40	0,42	13,2
Nº 80	0,18	9,1
Nº 200	0,075	6,5