



**FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS SOCIAIS
APLICADAS – FATECS
CURSO: ENGENHARIA CIVIL**

WILTON PEREIRA MACEDO

MATRÍCULA: 2138468/8

**INFLUÊNCIA DA COMPACTAÇÃO EM MISTURAS ASFÁLTICAS
UTILIZANDO O PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS (PDI).**

**Brasília
2016**

WILTON PEREIRA MACEDO

**INFLUÊNCIA DA COMPACTAÇÃO EM MISTURAS ASFÁLTICAS
UTILIZANDO O PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS (PDI).**

Trabalho de Curso (TC) apresentado
como um dos requisitos para conclusão
do curso de Engenharia Civil do
UniCEUB – Centro Universitário de
Brasília

Orientador: Eng°. Civil Jaime Rafael
Obando Ante (D.Sc.) (c)

WILTON PEREIRA MACEDO

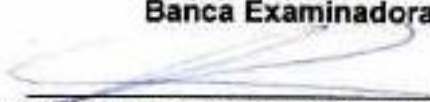
**INFLUÊNCIA DA COMPACTAÇÃO EM MISTURAS ASFÁLTICAS
UTILIZANDO O PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS (PDI).**

Trabalho de Curso (TC) apresentado
como um dos requisitos para conclusão
do curso de Engenharia Civil do
UniCEUB – Centro Universitário de
Brasília

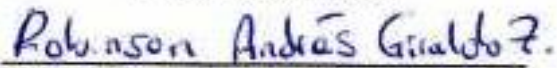
Orientador: Eng^o. Civil Jaime Rafael
Obando Ante (D.Sc.) (c)

Brasília, 24 de Junho 2016.

Banca Examinadora


Eng^o. Civil Jaime Rafael Obando Ante, D.Sc.(c)
Orientador


Eng^a. Civil Sandra Patricia Echeverría Fernández, M.Sc
Examinador Interno


Eng^o. Civil Robinson Andrés Giraldo Zuluaga, D.Sc.
Examinador externo

AGRADECIMENTOS

A minha amada mãe, Simone Pereira de Macedo. Por ter feito desse sonho possível, me apoiado, incentivado e trabalhando duro para que eu sempre tivesse tempo para estudar.

Ao meu amado pai, Ivo Rodrigues Pereira. Pelo apoio emocional e financeiro, sempre incentivando e tentando mostrar o melhor caminho que a experiência lhe proporcionou.

Aos meus amados irmãos, Wilson Pereira Macedo e Luana Rodrigues Pereira. Pelo apoio, e ter feito as obrigações de casa enquanto eu estudava e assistia aula grande parte dos horários durante todos esses anos.

Ao meu professor orientador, Jaime Obando. Por ter acreditado no meu potencial sempre se preocupando, ajudando e apoiado minhas ideias. Que sua força de vontade em melhorar a instituição e ajudar os alunos a crescerem, inspire outros professores.

A minha namorada e companheira, Thayse de Cassia Silva Aguiar. Por sempre estar ao meu lado ajudando e incentivando com sua personalidade amável e atenciosa.

A Mônica, Magno, Nathália e Tamara. Por ter concedido um lugar para dormir e feito parte da minha jornada mais produtiva e menos desgastante.

Aos meus amigos especialmente, Ana e Samya. Pela amizade durante os poucos anos de graduação e tantos cafés, a atenção de vocês fizeram meus dias de aula mais felizes.

Aos vários excelentes professores do UniCEUB e outras instituições que quebraram meus paradigmas e proporcionaram a formação do meu caráter como pessoa e como profissional.

Ao Ministério da Educação, com o programa Financiamento Estudantil (FIES). Sem o programa não teria o prazer e honra de ter passado tantos anos aprendendo.

Ao meu tio, Ricardo Macedo. Por ter proporcionado o conhecimento certo nas horas mais delicadas da minha vida, e com certeza ter feito desse sonho uma realidade.

A Universidade Federal do Ceará em especial a professora Verônica Castelo Branco que abriu as portas da Universidade, o técnico do laboratório, Rômulo Jácome que trabalhou arduamente para que o curto prazo da minha visita pudesse ser eficiente e produtiva, a aluna de Doutorado Juceline Bastos que me ensinou e me deu assistência no uso do equipamento AIMS e também o Engenheiro Iuri Bessa por se colocar a disposição para tirar minhas dúvidas.

Aos meus companheiros de trabalho, que sempre estão à disposição de ensinar e dividir suas experiências, sem vocês a qualidade desse trabalho não seria a mesma.

MUITO OBRIGADO!

“Seja a mudança que você quer ver no mundo”
Mahatma Gandhi

RESUMO

Diferentes métodos de compactação em laboratório vêm sendo desenvolvidos buscando apresentar os resultados que mais se aproximam de realidades encontradas em campo. O presente trabalho utiliza o processamento digital de imagens (PDI) como método para avaliar as principais mudanças nas propriedades dos agregados e na estrutura interna de misturas asfálticas, submetidas a diferentes tipos de compactação. Para isso, foi utilizada a metodologia de dosagem de materiais Marshall, e compactado com diferentes tipos de compactação, sendo elas: Marshall, Superpave e Placa vibratória. Para analisar as mudanças nos agregados, devido aos efeitos da compactação utilizou-se o equipamento AIMS (*Agregate Image Measurement System*). Para analisar a estrutura interna das misturas utilizou-se o programa I-PAS 2 (*Image processing and Analyses System*). O trabalho apresenta e discute os métodos de análise, com o objetivo de definir entre as metodologias de compactação escolhidas, a que mais se aproxima das realizadas em campo. A metodologia de compactação Marshall, demonstrou ser a mais nociva com respeito à variação nas propriedades de forma dos agregados após as compactações, quanto à estruturação do esqueleto mineral das misturas, os resultados apresentaram-se satisfatórios, independente da compactação escolhida.

Palavras-chave:

Misturas asfálticas, Compactação, Processamento digital de imagens (PDI), Análise de agregados.

ABSTRACT

Different laboratory compression methods have been developed seeking to present the results that are closer to the realities found in field. The study, uses the digital image processing, as a method to evaluate the main changes of aggregate properties and internal structure of hot mix asphalt, submitted to different compaction kinds. For this purpose, Marshall method was used for dosing materials and samples was compacted in different compactors: Marshall, Superpave and Vibratory plate. To analyze the aggregates it was used the AIMS (Aggregate Image Measurement System). To analyze the internal structure it was used the IPAS 2 (Image processing and Analyses System). The study presents and discusses the methods of analyses in order to define between the compaction methodologies chosen which one approach the actual conditions encountered in the field. The methodology of compaction Marshall proved to be the most harmful, in respect to the variation in the form of aggregates after the compaction process, as the mineral skeleton structure, the results were satisfactory, regardless of chosen compaction.

Keywords:

Asphalt Mixtures, Compaction, Digital image processing, Aggregate Analysis.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.2	OBJETIVOS.....	3
1.2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.3	JUSTIFICAIVA.....	4
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Processos de compactação.....	5
2.1.1	Compactação Marshall.....	5
2.1.2	Compactação Superpave.....	7
2.1.3	Compactação de campo.....	8
2.1.4	Efeito da compactação nas propriedades das misturas asfálticas.....	10
2.2	Processamento digital de imagens.....	11
2.2.1	Sistema de medição de imagem de agregados (AIMS).....	13
2.2.2	Sistema de análise e processamento de imagens (IPAS-2).....	14
2.3	Efeito da estruturação dos agregados na mistura asfáltica.....	17
2.3.1	Influência da compactação na estrutura interna de misturas asfálticas.....	21
3.	MATERIAIS E METODOS.....	29
3.2	Materiais empregados na pesquisa.....	29
3.2.1	Caracterização dos materiais.....	29
3.2.2	Agregados.....	29
3.2.3	Ligante asfáltico.....	29
3.2.4	Mistura asfáltica.....	30
3.3	Compactação dos corpos de prova.....	30
3.3.1	Compactação Marshall.....	30
3.3.2	Compactação Superpave.....	31
3.3.3	Compactação de campo.....	32

3.1 Índice de quebra Marsal e Resendiz (1975)	33
3.1 Processamento digital de imagens PDI	34
3.1.1 Análise da forma dos agregados utilizando o AIMS	34
3.1.2 Parâmetros analisados no AIMS	36
3.1.3 Análise da estrutura interna utilizando o IPAS 2.....	38
3.1.4 Parâmetros analisados no IPAS 2	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1 Agregados.....	43
4.2 Cimento asfáltico.....	45
4.3 Mistura asfáltica	46
4.4 Quebra das partículas após compactação.....	48
4.5 Caracterização de forma, angularidade e textura superficial.	50
4.6 Análise da estrutura interna utilizando o IPAS 2	64
5. CONCLUSÕES.....	70
6. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	73
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICOS	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Compactador Marshall: (a) Sistema automático; (b) Sistema manual (Modificado, Bernucci <i>et al.</i> , 2006).	6
Figura 2.2 - Ilustração esquemática e exemplo do compactador giratório Superpave (modificado Bernucci <i>et al.</i> , 2006).	8
Figura 2.3 - Compactadores vibratórios: (a) compactador de rolo; (b) placa vibratória.	9
Figura 2.4 - Esquema do "Martelo Vibratório" (Brown <i>et al.</i> , 1999).	9
Figura 2.5 - Eixos principais (Yue <i>et al.</i> 1995).	12
Figura 2.6 - Aggregate Image Measurement System AIMS: (a) Equipamento; (b) Cameras internas (https://www.fhwa.dot.gov/hfl/partnerships/aims2/phase1/ Acessado 21/04/2016).	13
Figura 2.7 - Características de forma dos agregados para materiais de pavimentação (http://www.fhwa.dot.gov/hfl/partnerships/aims2/ppt.cfm Acessado 27/06/2016).	14
Figura 2.8 - Image Processing & Analysis System – IPAS-2.	15
Figura 2.9 - Linha de zona de proximidade (Safidmazgi, 2011).	16
Figura 2.10 - Linhas de contato e orientação em uma mistura real (Safidmazgi, 2011).	16
Figura 2.11 – Esquema do calculo de orientação dos contatos; (a) Pixels da linha de contato; (b) Orientação dos pares de pixels, (c) Orientação do contato. (Safidmazgi, 2011).	17
Figura 2.12 - Forma 2D dos agregados equipamento AIMS: (a) Circular; (b) Semicircular; (c) Semialongado; (d) Alongado.	19
Figura 2.13 - Angularidade dos agregados miúdos e graúdos, equipamento AIMS: (a) Arredondado; (b) Subarredondado; (c) Subangular;(d) Angular.	20
Figura 2.14 - Textura superficial dos agregados: (a) Polido;(b) Macio;(c) Rugosidade moderada;(d) Alta rugosidade.	21
Figura 2.15 - Mudança na distribuição granulométrica produzida pela rotura dos grãos (Marsal, 1975) <i>apud</i> (Gómez, 2011).	23
Figura 2.16 - Representação gráfica da variação dos pesos inicial e final (Marsal, 1975) <i>apud</i> (Gómez, 2011).	23
Figura 2.17 - Contato entre agregados (Mahmoud <i>et al.</i> , 2010).	24
Figura 2.18 - Orientação das partículas (Bessa, 2012)	26
Figura 2.19 - Esquemática de análise de imagens (Hunter <i>et al.</i> , 2004).	27

Figura 2.20 – Segregação transversal (Modificado Tashman <i>et al.</i> , 2001).	28
Figura 2.21 - Segregação radial (Modificado Mahmoud <i>et al.</i> , 2010).....	28
Figura 3.1 - Esquematização da compactação Marshall.....	31
Figura 3.2 - Esquematização da compactação Superpave	32
Figura 3.3 - Esquematização da compactação com placa vibratória.	32
Figura 3.4 – Processo de moldagem com placa vibratória: (a) Misturador; (b) Modelagem; (c) Compactador; (d) Compactação; (e) Termometro a laser; (f) Densímetro elétrico.	33
Figura 3.5 - Remoção do betume da mistura asfáltica: (a) Mistura do solvente; (b) Rotação do equipamento; (c) Agregados após ensaio.....	34
Figura 3.6 - Esquematização do procedimento de ensaio no AIMS.....	35
Figura 3.7 - Cortes dos corpos de prova.	38
Figura 3.8 - Imagem das amostras: (a) Com polimento; (b) Sem polimento.	39
Figura 3.9 - Seções principais.	39
Figura 3.10 - Passos seguidos no iPas 2: (a) Inserindo a imagem, (b) Encontrando resolução, (c) Área de interesse, (d) Aplicação dos filtros, (e) Definição das zonas de contato, (f) Orientação das partículas, (g) Áreas de segregação radial, (h) Áreas de segregação, (i) Tabelas de resultados.	41
Figura 4.1 - Curva granulométrica do material dosado na Faixa C – CBUQ (Modificado Obando, 2012).....	45
Figura 4.2- Curva granulométrica dos agregados (Limites Faixa C).	48
Figura 4.3 - Mudança na distribuição por fração granulométrica.....	50
Figura 4.4 - Forma dos agregados naturais	52
Figura 4.5 - Forma dos agregados após compactação com placa vibratória	52
Figura 4.6 - Forma dos agregados após compactação Superpave.....	53
Figura 4.7 - Forma dos agregados após compactação Marshall.....	54
Figura 4.8 - Resumo dos valores de forma para todas as compactações.....	54
Figura 4.9 - Angularidade dos agregados naturais.....	56
Figura 4.10 - Angularidade após compactação com placa vibratória	57
Figura 4.11 - Angularidade após compactação Superpave.....	58
Figura 4.12 - Angularidade dos agregados após compactação Marshall	58
Figura 4.13 - Resumo dos valores de angularidade para todas as compactações ...	59
Figura 4.14 - Textura dos agregados naturais.....	60
Figura 4.15 - Textura após compactação com placa vibratória	61

Figura 4.16 - Textura após compactação Superpave.....	62
Figura 4.17 - Textura após compactação Marshall	62
Figura 4.18 - Resumo da textura de todas as compactações	63
Figura 4.19 - Grupos de segregação (Modificada, tutorial IPAS 2).	64
Figura 4.20 – Segregação radial (Marshall x Placa vibratória)	66
Figura 4.21 - Segregação vertical (Marshall x Placa vibratória)	67
Figura 4.22 - Segregação radial (Superpave x Placa vibratória)	68
Figura 4.23 - Segregação vertical (Superpave x Placa vibratória)	69

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Tamanho dos agregados analisados no AIMS.....	36
Tabela 4.1 - Granulometria material misturado para confecção da mistura asfáltica (Modificado Obando, 2012).....	44
Tabela 4.2 - Resultado caracterização CBUQ (Modificado Obando, 2012).	44
Tabela 4.3 - Resultado caracterização CAP 50 – 70 (Modificado Obando, 2012). ...	46
Tabela 4.4 - Resultado caracterização da mistura asfáltica (Modificado Obando, 2012).....	47
Tabela 4.5 - Especificação DNIT 031/2006 (Modificado Obando, 2012).....	47
Tabela 4.6 - Fator quebra de Marsal e Resendiz (1975)	49
Tabela 4.7 - Porcentagem de material passante por fração granulométrica	49
Tabela 4.8 - Limites de classificação (Modificado Al Rousan, 2004).....	51
Tabela 4.9 - Média dos resultados de forma 2D do AIMS	55
Tabela 4.10 - Média dos resultados de angularidade do AIMS	59
Tabela 4.11 - Média dos resultados de textura superficial do AIMS.....	63
Tabela 4.12 - Estrutura interna da compactação Marshall x Placa vibratória.....	65
Tabela 4.13 - Estrutura interna da compactação Superpave x Placa vibratória	67

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 2.1 – Fator quebra de Marsal.....	22
Equação 2.2 – Soma dos valores positivos.....	22
Equação 2.3 – Vetor magnitude.....	25
Equação 2.4 – Ângulo de inclinação a partir da direção horizontal.....	26
Equação 3.1 – Forma 2D.....	36
Equação 3.2 – Angularidade.....	37
Equação 3.3 – Textura Superficial.....	38

ÍNDICE DE ABREVIações

AASHTO.....	<i>American Association of State highway and transportation officials</i>
ABNT.....	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM.....	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AIMS.....	<i>Aggregate Image Measurement System</i>
CA.....	Concreto Asfáltico
CAP.....	Concreto asfáltico de petróleo
CBUQ.....	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CGS.....	Compactador Giratório Superpave
CP.....	Corpo de prova
DNER.....	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT.....	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
ES.....	Especificação de Material
PDI.....	Processamento Digital de Imagens
LET.....	Laboratório de Engenharia de transportes
SHRP.....	<i>Strategic Highway Research Program</i>
Superpave.....	<i>Superior Performing Asphalt Pavements</i>
UnB.....	Universidade de Brasília
UFC.....	Universidade Federal do Ceará

ÍNDICE DE SÍMBOLOS

<i>apud</i>	Citado por
<i>et. al.</i>	E outros
Kg.....	Quilograma
Kg/m ²	Quilograma por metro quadrado
Kgf/cm ²	Quilograma-força por centímetro quadrado
L.....	Litros
mm.....	Milímetros
m.....	Metros
m ²	Metros quadrados
m ³	Metros cúbicos
MPa.....	Mega Pascal
rpm.....	Revoluções por minuto
Un.....	Unidade
Vv.....	Volúme de vazios

1 INTRODUÇÃO

A utilização de concreto asfáltico (CA) constituído por cimento asfáltico de petróleo (CAP), agregados, filler e vazios é o material mais empregado nas rodovias brasileiras. Somente após o século 20, quando houve um aumento no número de veículos, os engenheiros passaram a se preocupar com o desenvolvimento de especificações, a fim de produzir rodovias de menor custo (Vasconcelos, 2004).

Durante a evolução dos processos de dosagem, diversas formas de compactação vêm sendo desenvolvidas. Dependendo do sistema as amostras podem ser quanto à forma, cilíndricas, trapezoidais, ou retangulares, e a compactação pode ser realizada através de impacto, amassamento, vibração ou rolagem (Harman *et al.*, 2002).

O objetivo da compactação de laboratório é de adotar um procedimento que envolvesse um esforço mínimo de compactação e de tempo, e que pudesse selecionar um teor ótimo de ligante asfáltico para uma dada composição granulométrica (Moura, 2010).

A formação da estrutura interna da mistura asfáltica, desempenha um papel importante na resistência do pavimento com relação aos principais defeitos, como deformação permanente, trincamento por fadiga e térmico (Bernucci *et al.*, 2006).

De acordo com Mcrae (1957) *apud* (Iwama, 2009) “É sempre desejável para corpos de prova compactados em laboratório ter as mesmas propriedades dos moldados em campo”. Para chegar nesse objetivo os equipamentos vem sendo desenvolvidos para chegar o mais perto das condições reais de obra. Entretanto é fato que diferentes métodos de compactação produzem corpos com propriedades mecânicas distintas.

Para quantificar esses parâmetros, o presente trabalho utiliza o processamento digital de imagens (PDI), desenvolvido para melhorar as caracterizações dos materiais e da estrutura interna de misturas asfálticas.

Tendo em vista diversos tipos de compactações de corpos de prova (CP) em laboratório, o presente trabalho busca avaliar qual a influência da compactação, nos agregados minerais e na estrutura interna de misturas asfálticas, através do processamento digital de imagens considerando os seguintes fatores: forma, angularidade, textura superficial, áreas de contato, orientação e segregação das partículas.

1.2 OBJETIVOS

Avaliar a influência da compactação em misturas asfálticas usinadas a quente, compactadas no laboratório e no campo, quantificadas através do processamento digital de imagens (PDI).

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a mudança da forma, angularidade e textura superficial dos agregados utilizando o *Agregate Image Measurement System* (AIMS);
- Avaliar a quebra das partículas com diferentes tipos de compactação;
- Analisar a mudança na estrutura interna de misturas asfálticas utilizando o *Image Processing & Analysis System* (IPAS 2).
- Estabelecer entre as metodologias de compactação avaliadas, a que seja mais próxima das compactações realizadas em campo.

1.3 JUSTIFICAIVA

Vários processos de compactação em laboratório vêm sendo desenvolvidos buscando apresentar as mesmas características de misturas asfálticas moldadas em campo. Os métodos mais conhecidos são: Hveem, Marshall e desde 1993 as universidades utilizam o Superpave, para dosagem de materiais.

O objetivo da compactação de laboratório é de adotar um procedimento que envolvesse um esforço mínimo de compactação e de tempo, e que pudesse selecionar um teor ótimo de ligante asfáltico para uma dada composição granulométrica (Moura, 2010).

Apesar das novas tecnologias de compactação empregadas para a melhoria do pavimento, no Brasil, a metodologia Marshall ainda é a mais utilizada. O trabalho utiliza novas técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI), como ferramenta para mensurar as mudanças que ocorreram nos agregados e na formação da estrutura interna de misturas asfálticas, com intuito de reforçar resultados encontrados por (McRae 1957, Von Quintus *et al.*, 1991, Button *et al.*, 1994, Airey *et al.*, 2006, *apud* Iwama, 2009). A utilização de metodologias que não representam as características de campo, certamente irão apresentar defeitos em curto prazo nas rodovias, uma vez que, a mistura apresentará comportamento diferente dos previstos na fase inicial de projeto.

Apesar das novas tecnologias empregadas na pesquisa para caracterização dos materiais, existem pesquisas mais recentes buscando melhorar e automatizar os resultados obtidos da estrutura interna das misturas asfálticas, como o método não destrutivo de captura de imagens pela tomografia de raios-x.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processos de compactação

Para a confecção de um revestimento asfáltico, é necessária uma metodologia de dosagem para se definir a proporção de agregado e ligante capaz de resistir às cargas submetidas no pavimento. Quanto à quantidade de ligante asfálticos é usado o termo, teor de projeto, considerado teor “ótimo” de ligante que varia de acordo com o método de dosagem e é função de parâmetros como energia de compactação, tipo de mistura, temperatura a qual o pavimento estará submetido, entre outros (Bernucci *et al.*, 2006).

Segundo Harman *et al.* (2002), vários processos de compactação foram desenvolvidos durante a evolução dos procedimentos de dosagem, com isso, dependendo do sistema as amostras, podiam ser quanto à forma, cilíndricas, trapezoidais ou retangulares e podiam ser elaboradas por impacto, amassamento, vibração e rolagem.

O método de dosagem mais utilizado mundialmente é o Marshall e desde 1993, as universidades e departamentos de transporte vêm utilizando a Superpave, porém muito pouco utilizada no Brasil.

No Brasil, o método de dosagem Marshall de misturas asfálticas ainda é o mais utilizado, mesmo sabendo que os corpos de prova moldados no compactador por impacto, não representam as densidades encontradas em campo.

2.1.1 Compactação Marshall

A metodologia de dosagem Marshall que faz uso da compactação por impacto (golpes), em referência a Bruce Marshall. Foi concebida no decorrer da 2ª guerra mundial como um procedimento para definir a proporção de agregado e ligante, capazes de resistir às cargas de roda e pressão de pneu das aeronaves militares. A metodologia teve muitas críticas principalmente devido à

falta de representatividade do método de compactação em relação ao campo, devido a fatores ligados à preparação dos corpos de prova em laboratório. Segundo Francken *et al.* (1997) *apud* Bernucci *et al.* (2006), verificaram-se uma variação de 1,43% nos valores de teor de ligante para a mesma mistura determinado através do método de dosagem Marshall.

No Brasil a norma DNER – ME 043/95 padroniza a metodologia e define a quantidade de golpes por face dos corpos de prova, dependendo do nível da pressão de pneu exercida no pavimento e não há recomendação em relação à frequência de golpes, podendo ser feita de forma manual ou automática, como é apresentado na Figura 2.1.

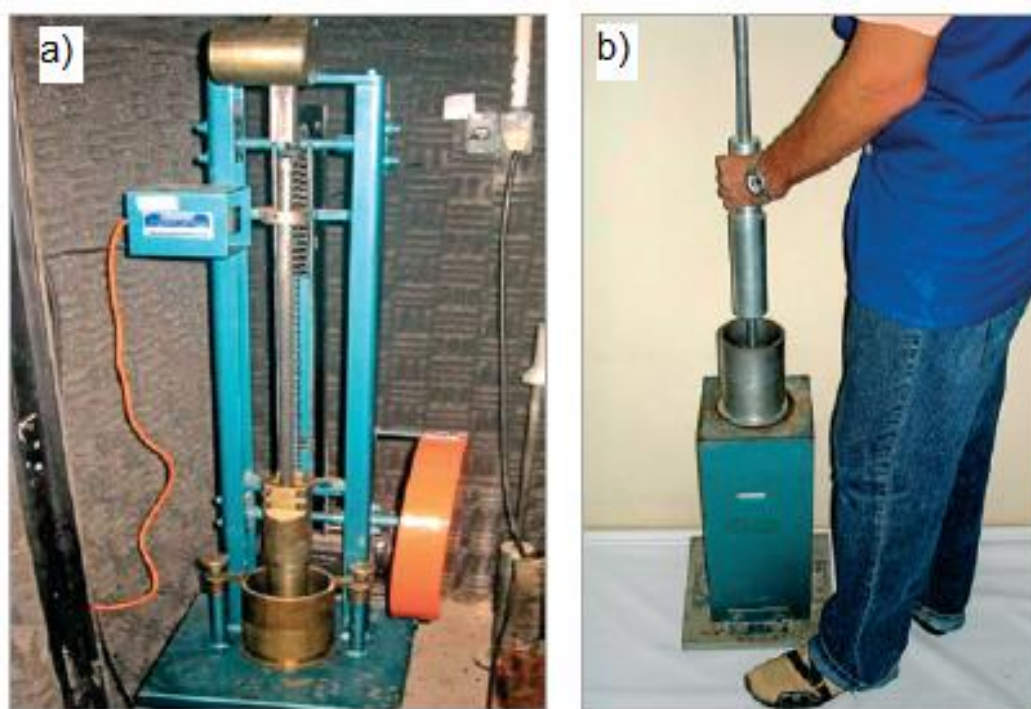


Figura 2.1 - Compactador Marshall: (a) Sistema automático; (b) Sistema manual
(Modificado, Bernucci *et al.*, 2006).

2.1.2 Compactação Superpave

Conforme Bernucci *et al.* (2006), existem duas diferenças básicas entre o procedimento Marshall e Superpave, a forma de compactação e a escolha da granulometria da mistura de agregados. Enquanto a dosagem Marshall é feita por impacto, a dosagem Superpave é realizada por amassamento.

Nos Estados Unidos na década de 1980, foram encontradas grandes deformações prematuras permanentes nas rodovias, levando a crer que o processo de compactação por impacto durante a dosagem de laboratório, produzia corpos de prova com volume de vazios que não condiziam com o campo (Bernucci *et al.*, 2006). Em 1987 o Congresso dos Estados Unidos criou o programa de pesquisa rodoviária estratégica (*Strategic Highway Research Program-SHRP*), com intuito de melhorar o desempenho, segurança e durabilidade das estradas. De acordo com Kennedy (1994), o produto final concebido para substituir as especificações de materiais e metodologias de mistura que integra os mais de 25 produtos gerados pelo programa foi denominado Superpave (*SUPERior PERforming Asphalt PAVEMENTS*).

A mudança maior que o estudo propôs, foi à forma de compactação, os pesquisadores do SHRP desejavam um dispositivo que compactasse a amostra de mistura betuminosa mais próxima das realizadas em campo, de forma que as densidades finais fossem aquelas obtidas no pavimento, equivalentes das condições reais de clima e carregamento (Motta *et al.*, 1996) *apud* (Vasconcelos, 2004).

Todos os compactadores giratórios Superpave (CGS), são projetados para atender aos critérios especificados na norma de preparação e determinação de densidade de misturas a quente AASHTO TP4. Os critérios incluem pressão vertical (600 ± 18 kPa), razão rotacional ($30 \pm 0,5$ rpm), altura ($\pm 5,0$ mm) e o ângulo de giro ($1,25 \pm 0,02^\circ$). Um exemplo do CGS pode ser visto na Figura 2.2.

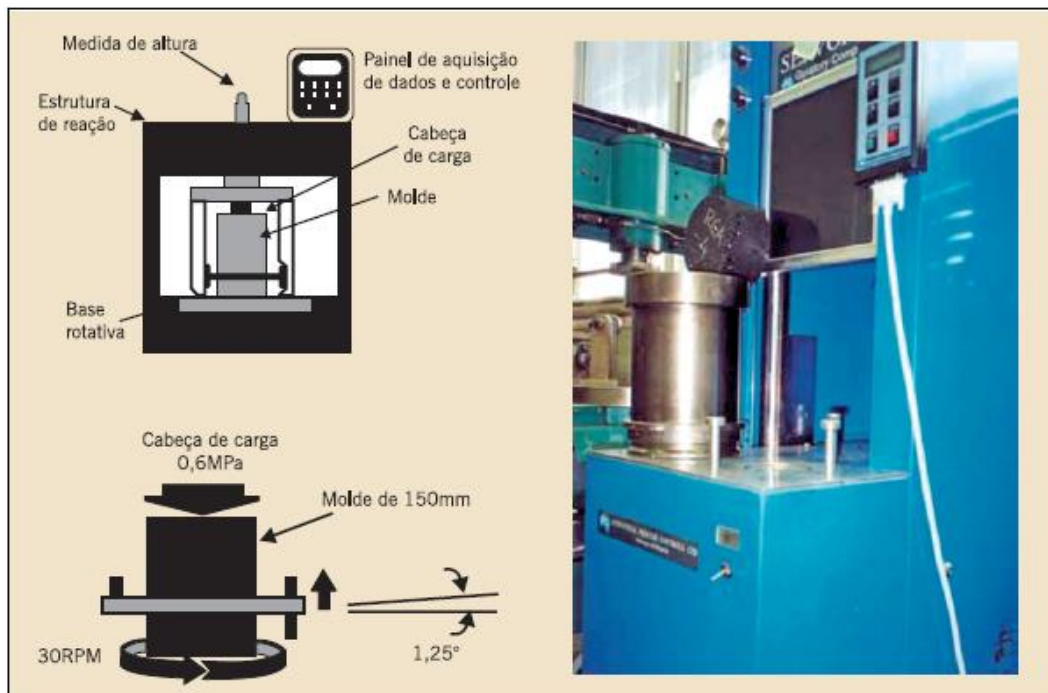


Figura 2.2 - Ilustração esquemática e exemplo do compactador giratório Superpave (modificado Bernucci *et al.*, 2006).

2.1.3 Compactação de campo

Segundo a norma DNIT – 031/2006 os equipamentos para compactação devem ser constituídos por rolo pneumático e rolo metálico liso, tipo tandem ou rolo vibratório. De acordo com Bernucci *et al.* (2006), os rolos vibratórios são compostos por tambores de aço com pesos giratórios, que somado ao peso próprio da máquina aumentam o esforço de compactação (Figura 2.3 a). Neste trabalho foi utilizada a placa vibratória para representar os corpos de prova moldados em campo, considerando o princípio de vibrar e utilizar o peso próprio, a placa vibratória realiza uma compactação similar em escala reduzida.

A placa vibratória (Figura 2.3 b) é usada para recuperações de vias públicas, ou como alternativa do rolo compactador vibratório em lugares de menores proporções como ciclovias.



Figura 2.3 - Compactadores vibratórios: (a) compactador de rolo; (b) placa vibratória.

Outra aplicação utilizando os mesmos princípios se chama “Martelo vibratório” utilizada em laboratórios ao redor do mundo. Cooper *et al.*, (1985), *apud* Iwama, (2009), utilizaram essa compactação para criar uma nova metodologia de mistura a quente. Para complementar, Brown *et al.*, (1999) *apud* Iwama (2009), sugeriram que o uso do martelo vibratório é bem próximo da compactação realizada em campo, a Figura 2.4 mostra o esquema da compactação.



Esquema da compactação

Figura 2.4 - Esquema do "Martelo Vibratório" (Brown *et al.*, 1999).

Brown *et al.*, (1999) *apud* Iwama, (2009), estudaram a influência dos métodos de compactação no comportamento mecânico das misturas. Foram examinados quatro tipos, entre eles se destacam: amostras de campo, rolo compactador de laboratório e martelo vibratório. Os resultados obtidos por parâmetros de resistência mostraram que os corpos moldados com martelo vibratório apresentavam comportamentos iguais os retirados de campo.

2.1.4 Efeito da compactação nas propriedades das misturas asfálticas

De acordo com McRae (1957) *apud* Iwama (2009), “é sempre desejável para corpos de prova compactados em laboratório ter as mesmas propriedades dos moldados em campo”. Para chegar nesse objetivo, os equipamentos vêm sendo desenvolvidos para chegar o mais perto das condições reais de obra. Entretanto é fato que diferentes métodos de compactação, produzem corpos com propriedades mecânicas distintas. As propriedades dependem da técnica de compactação e sua magnitude, direção e duração de aplicação de força.

Von Quintus *et al.*, (1991) *apud* Iwama, (2009), investigou as diferenças entre cinco compactações de laboratório com intuito de definir o mais próximo dos moldados em campo, são elas: Marshall, vibratório e três outros compactadores por amassamento. Os resultados mostraram que o compactador giratório mostrou comportamento mecânico mais próximo dos encontrados em campo.

Button *et al.*, (1994), *apud* Iwama, (2009), examinaram a correlação entre corpos de prova de campo e de laboratório. No estudo foram usadas amostras de cinco localidades distintas e quatro métodos de compactação de laboratório que são: rolo de pneu, Marshall e dois tipos de compactador por amassamento. Foram examinados mecanicamente chegando à conclusão que o compactador giratório é o método que mais representa os corpos de campo, enquanto que o Marshall não mostra quaisquer similaridades.

Airey *et al.*, (2006) *apud* Iwama (2009), comparam amostras de campo com três tipos de compactador: giratório, vibratório e rolo compactador. Na

pesquisa, foram examinados quatro tipos de mistura, todos com aproximadamente as mesmas propriedades volumétricas. Os resultados mecânicos mostraram que as amostras do compactador de rolo apresentam mais similaridades com os moldados em campo.

2.2 Processamento digital de imagens

O processamento digital de imagens (PDI) possibilita a quantificação da estrutura interna de mistura asfáltica como: pontos de contato, segregação dos agregados, orientação dos agregados entre outras. Os métodos para obtenção dos parâmetros podem ser destrutivos e não destrutivos. Nos métodos destrutivos, as amostras podem ser cortadas tanto na direção vertical quanto na horizontal, com intuito de capturar imagens da seção da amostra por escaneamento ou câmera digital de alta resolução. No entanto, existem processos mais sofisticados não destrutivos para obtenção das imagens como tomografia de raios-x. A partir das imagens obtidas, os métodos de processamento digital de imagens são necessários para analisar a microestrutura (Sadifmazgi, 2011).

Vários autores utilizaram o processamento digital de imagens, para quantificar a estrutura interna, Yue *et al.* (1995) *apud* Safidmazgi (2011), foram os primeiros a introduzir índices para representar a estrutura interna. De acordo com o mesmo autor o maior e menor eixo dos agregados são duas propriedades geométricas essenciais para quantificar a estrutura interna das misturas. A Figura 2.5 exemplifica os eixos principais, sendo que a linha vermelha é o eixo principal (maior eixo), que conecta os dois pontos mais extremos da seção do agregado na imagem, a linha azul (menor eixo), é a que conecta os dois pontos mais extremos perpendiculares ao eixo principal (Sadifmazgi, 2011). A partir dessas informações, é possível definir parâmetros como orientação e segregação da mistura, uma vez que você definiu o tamanho e as posições dos agregados na imagem.

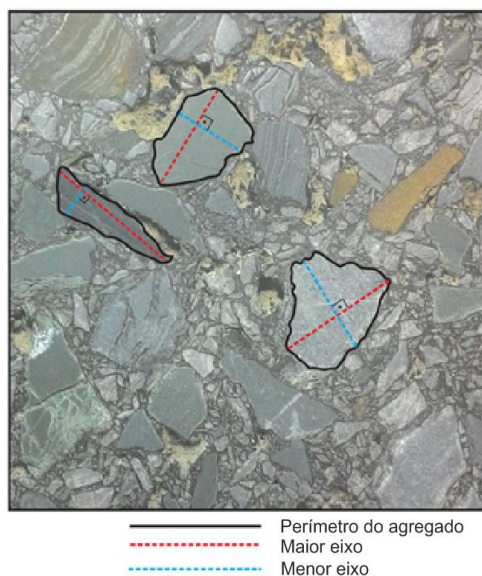


Figura 2.5 - Eixos principais (Yue *et al.* 1995).

Outros parâmetros definidos por Yue *et al.* (1995) foram: perímetro do agregado, área, centroide do agregado, diâmetro “*Feret*”, orientação do eixo principal, fator forma e compacidade. O diâmetro “*Feret*” é denominado agregado circular fictício tendo a mesma área do agregado.

Depois, Masad *et al.* (1998) *apud* Safidmazgi (2011) trabalharam na eficiência dos processos de quantificação da estrutura interna. As imagens foram obtidas através de uma câmera digital e convertidas em escala de cinza, o tratamento da imagem para diferenciar agregados de diferentes cores e o ligante asfáltico, foi feito manualmente. As análises determinaram a orientação e segregação das partículas como indicação da estrutura e anisotropia da mistura (Safidmazgi, 2011). Os índices foram definidos seguindo Yue *et al.* (1995). Em seguida, para determinar a orientação, foram calculados parâmetros para pegar a direção da distribuição das partículas.

Ainda segundo o autor, a tomografia computadorizada de raio-x, é um método não destrutivo de captura de imagens da estrutura interna de misturas asfálticas. O método produz imagens em escala de cinza com intensidade de 0 a 255 baseados nas densidades dos materiais. Portanto, usando o tratamento

de imagens, o volume de vazios e a distribuição das partículas de agregados podem ser capturados pela diferença das escalas de cinza (Safidmazgi, 2011).

2.2.1 Sistema de medição de imagem de agregados (AIMS)

O *Aggregate Image Measurement System* (AIMS) foi desenvolvido para investigar a possibilidade de usar o processamento digital de imagens, para caracterizar as propriedades de forma (lamelaridade e esfericidade), de angularidade e de textura superficial.

O equipamento (Figura 2.6) consiste em uma câmera microscópica com dois diferentes tipos de iluminação para capturar imagens em diferentes resoluções. O primeiro esquema de iluminação cria uma luz de fundo permitindo capturar imagens em preto e branco do contorno dos agregados miúdos (menores do que 4.75mm). O segundo esquema de iluminação, utiliza a iluminação superior em cada partícula, criando pontos de luz nos ângulos oblíquos, gerando uma imagem em escala de cinza, que por sua vez possibilita a caracterização dos agregados graúdos.

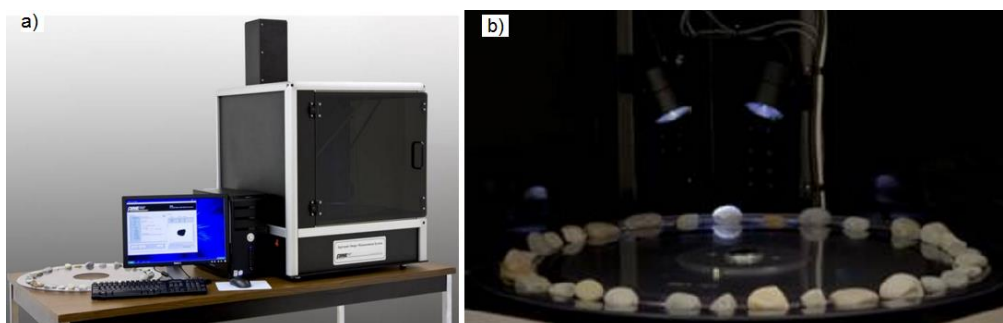


Figura 2.6 - Aggregate Image Measurement System AIMS: (a) Equipamento; (b) Cameras internas (<https://www.fhwa.dot.gov/hfl/partnerships/aims2/phase1/> Acessado 21/04/2016).

As características fornecidas pelo equipamento são capturadas de acordo com o grão de resolução, a primeira como sendo a propriedade de forma, aumentando a resolução para análise das arestas (angularidade) até

chegar ao detalhamento da microestrutura como a textura superficial, apresentado na Figura 2.7.

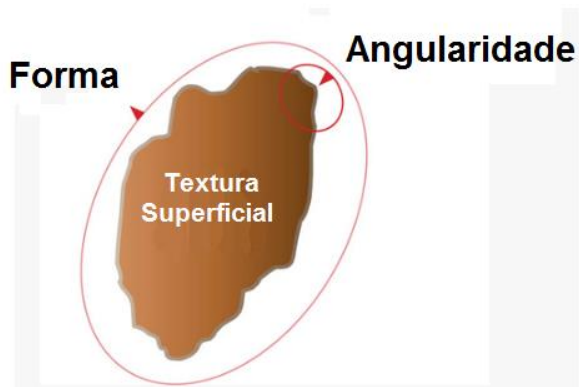


Figura 2.7 - Características de forma dos agregados para materiais de pavimentação (<http://www.fhwa.dot.gov/hfl/partnerships/aims2/ppt.cfm> Acessado 27/06/2016).

Os resultados obtidos são fornecidos em bases estatísticas, e são suficientes para a realização da classificação da forma dos agregados (Bessa, 2012).

2.2.2 Sistema de análise e processamento de imagens (IPAS-2)

O *Image Processing & Analysis System – IPAS-2* (Sistema de análise e processamento de imagem) desenvolvido por Bahia *et. al.* (2011), na *University of Wisconsin-Madson and Michigan State University*. É um programa para quantificar a estrutura interna de misturas asfálticas através de imagens em 2-D, as funções do software são divididas em dois grupos principais: funções para tratar a imagem e funções para obter a microestrutura. A Figura 2.8 mostra a interface do IPAS-2.



Figura 2.8 - Image Processing & Analysis System – IPAS-2.

Conforme Safidmazgi (2011), a parte mais importante no processamento das imagens da mistura é a separação dos materiais. Essa separação é feita por escalas de cinza, levando em consideração que existe uma diferença grande na intensidade de cor de cada material, possibilitando determinar vários parâmetros, como:

- Zonas de contato;
- Orientação das zonas de contato;
- Orientação das partículas;
- Segregação radial;
- Segregação vertical.

Segundo Safidmazgi (2011), as zonas de contato e orientação das zonas são parâmetros importantes para caracterização da estrutura interna da mistura. As zonas de contato são definidas como uma distância mínima entre os agregados definido pelo usuário. Diferenças nas áreas de contato produzem diferentes intensidades de tensão no intertravamento dos agregados, afetando

consequentemente a resistência. A orientação das zonas de contato define a efetividade em transmitir os esforços normais. Quanto mais a orientação da zona de contato for perpendicular à aplicação do esforço, mais efetivo o contato será, as Figuras 2.9 e 2.10 exemplificam os parâmetros mencionados.

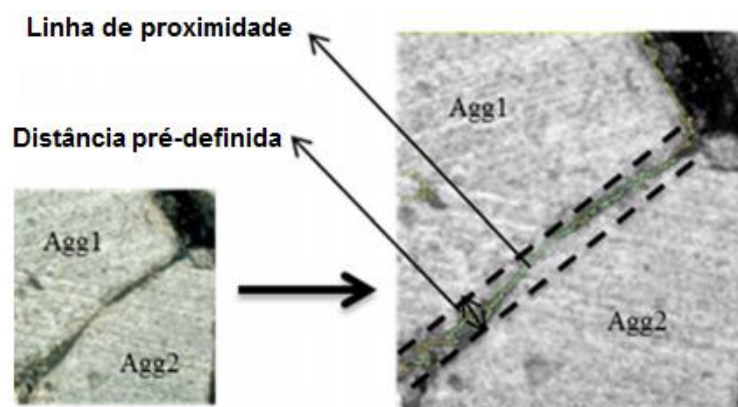


Figura 2.9 - Linha de zona de proximidade (Safidmazgi, 2011).

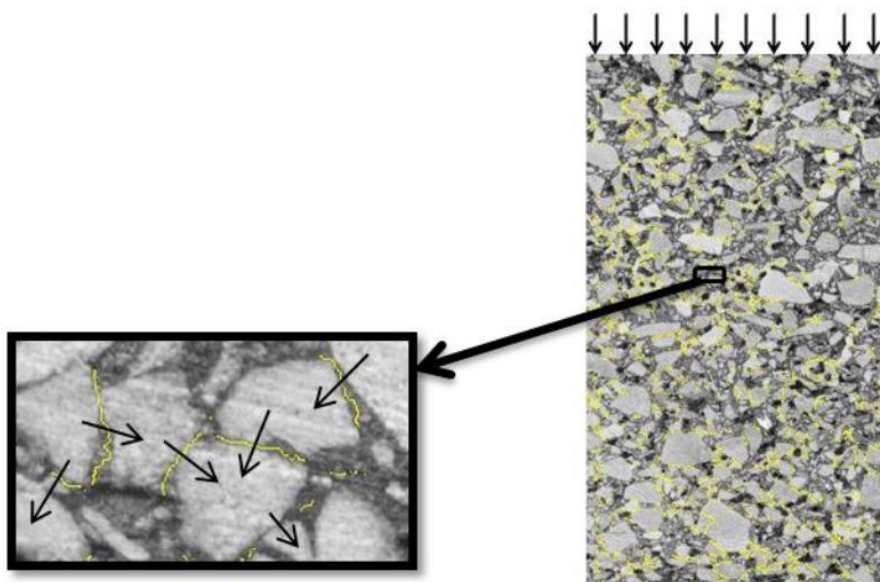


Figura 2.10 - Linhas de contato e orientação em uma mistura real (Safidmazgi, 2011).

A quantidade de pontos de contato, explicado mais detalhadamente no item 2.3.1., representa a conectividade da estrutura interna de agregados, sendo que, a efetividade dessa estrutura depende da área de contato e a

orientação dessa área, Figura 2.10. A orientação é medida através do eixo horizontal da imagem, que no caso, quanto mais próximo de 90° mais efetiva será a transmissão de carregamento.

O vetor que representa a orientação do contato é exemplificado na Figura 2.11 (SAFIDMAZGI, 2011).

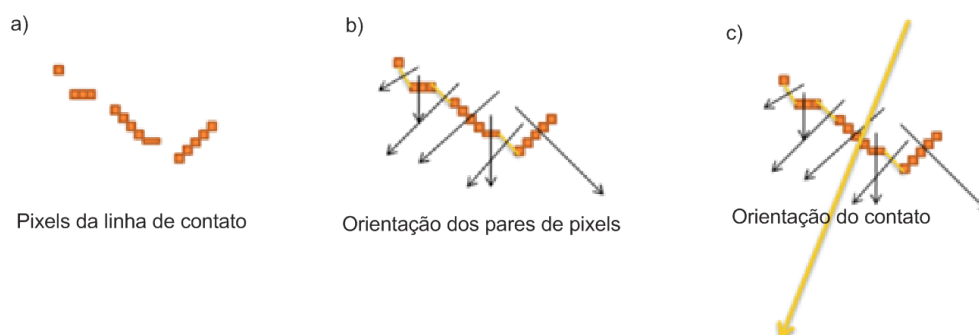


Figura 2.11 – Esquema do calculo de orientação dos contatos; (a) Pixels da linha de contato; (b) Orientação dos pares de pixels, (c) Orientação do contato. (Safidmazgi, 2011).

2.3 Efeito da estruturação dos agregados na mistura asfáltica

As misturas asfálticas obtidas em usina, a quente ou a frio, são compostas por mistura de agregados de vários tamanhos e cimento asfáltico de petróleo (CAP), dividem-se em grupos específicos em função da granulometria dos agregados (Bernucci *et al.*, 2006).

Os agregados têm grande influência na estrutura interna de uma mistura asfáltica, desempenhando um papel importante na resistência do revestimento evitando os principais problemas como deformação permanente, trincamento por fadiga e térmico.

Os agregados são uma mistura de pedregulhos, areia, pedra britada, escória ou outros materiais minerais usados em combinação com um ligante para formar um concreto asfáltico. Os agregados utilizados em pavimentação são classificados em três grandes grupos, segundo sua natureza, tamanhos e

distribuição dos grãos. Serão apresentadas características tecnológicas dos agregados quando a forma, angularidade e textura superficial nos itens que se seguem.

FORMA

A forma das partículas dos agregados influi na trabalhabilidade e resistência ao cisalhamento das misturas asfálticas e muda a energia de compactação necessária para se alcançar certa densidade (Bernucci *et al.*, 2006). Segundo a DNER-ME 086 (1994), a forma das partículas é determinada pelo índice de forma (f) que considera agregados de ótima cubicidade com valor de $f = 1,0$, e lamelar quando $f = 0,0$. Sendo que o limite mínimo adotado deve ser de $f = 0,5$.

De acordo com Bessa (2012), grandes porcentagens de agregados planos e alongados podem provocar quebra durante a compactação, alterando a composição granulométrica da mistura. Nascimento (2008), verificou que agregados mais lamelares, os valores de vazios no agregado mineral (VAM) foram elevados, necessitando de uma quantidade de ligante asfáltico maior, a fim de se obter o volume de vazios desejado.

Segundo Furlan *et al.* (2004) as propriedades de forma dos agregados influenciam diretamente na resistência ao dano por umidade da mistura asfáltica, a utilização de partículas planas e alongadas, causam vários problemas, dentre elas, quebra de partículas, sendo os melhores agregados para utilização são os de forma cúbica.

De acordo com Castelo Branco *et al.* (2006), o AIMS apresenta vantagem nos critérios de classificação dos agregados, como: possibilidade de análise dos agregados com relação a sua resistência, ao polimento e à abrasão; monitoramento e controle de qualidade dos processos de produção, refletindo inclusive na britagem, melhor entendimento entre as propriedades de forma dos agregados, dosagem e propriedades volumétricas do concreto asfáltico.

O equipamento AIMS classifica a forma dos agregados em uma escala de 0 a 20, sendo que 0 são agregados circulares, e 20 correspondem a uma porcentagem elevada de agregados alongados, como mostra na Figura 2.12.

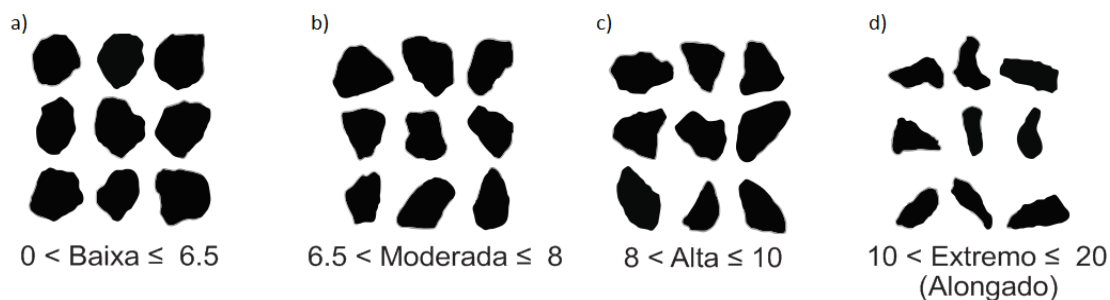


Figura 2.12 - Forma 2D dos agregados equipamento AIMS: (a) Circular; (b) Semicircular; (c) Semialongado; (d) Alongado.

ANGULARIDADE

Segundo Souza (2009), A angularidade pode ser definida como a medida da agudez dos cantos de uma partícula. Sendo assim, as partículas não arredondadas podem ser classificadas como partículas com alta angularidade e partículas arredondadas podem ser classificadas como baixa angularidade.

Para Bessa (2012), A angularidade de um agregado influencia na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas, levando em consideração que após a compactação partículas angulares tem maior entrosamento, aumentando a resistência ao deslocamento. Com relação a agregados com cantos arredondados, ao invés de se intertravarem, tendem a deslizar uns sobre os outros, resultando em estruturas granulares mais fracas e, portanto, em misturas menos estáveis.

O equipamento AIMS, classifica em uma escala de 0 a 10.000 a angularidade das partículas de agregado, sendo que as próximas de zero, classificadas como baixa, apresentam formas mais arredondadas com menos quantidade de pontas agudas o contrario das extremas que apresentam quantidade de pontas e formas menos angulares, como mostra na Figura 2.13.

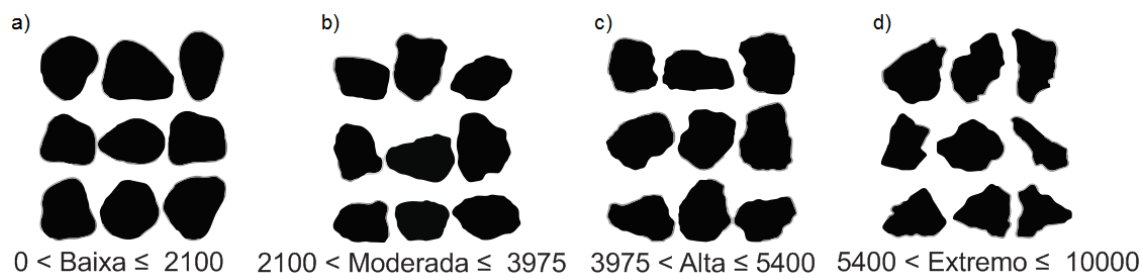


Figura 2.13 - Angularidade dos agregados miúdos e graúdos, equipamento AIMS: (a) Arredondado; (b) Subarredondado; (c) Subangular; (d) Angular.

TEXTURA SUPERFICIAL

A textura superficial dos agregados é a irregularidade da superfície do agregado em uma escala que é pequena demais para afetar a forma geral do mesmo (Al rousan, 2004).

De acordo com Bessa (2012), texturas mais rugosas geram mais atrito entre os agregados, tornando a mistura mais resistente à compactação, enquanto que texturas mais lisas não geram tanto atrito. Isso gera Volumes de vazios diferenciados, uma vez que o número de giros na compactação varia de acordo com o grau de rugosidade dos agregados.

A textura superficial dos agregados possui um papel importante quando se trata de resistência a deformação permanente de misturas asfálticas (Sousa *et al.*, 1991). É necessário utilizar agregados com superfícies rugosas em camadas de pavimento mais espessas e para climas mais quentes. Para pavimentos espessos, agregados rugosos também devem aumentar a rigidez das misturas, o que melhora sua vida de fadiga (Sousa *et al.*, 1991).

Kim *et al.* (2002), *apud* Bessa, (2012) mostraram que, agregados mais rugosos promovem uma ligação mais forte entre o ligante asfáltico e os agregados. Os resultados mostraram que, a ruptura das misturas que continham agregados mais lisos ocorreu nas ligações entre ligante e agregados, enquanto que nos agregados mais rugosos, a ruptura ocorreu na

superfície dos agregados, indicando uma união mais forte entre ligante asfáltico e agregado.

O equipamento AIMS classifica a textura dos agregados em uma escala de 0 a 1.000, sendo que as próximas de 0 apresentam superfícies lisas e as extremas superfícies mais rugosas, como mostra na Figura 2.14.

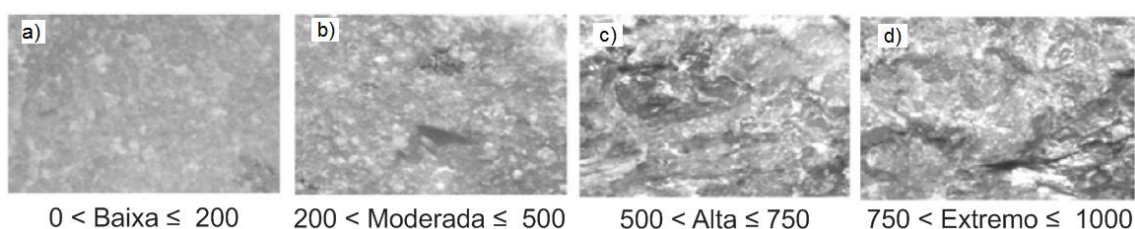


Figura 2.14 - Textura superficial dos agregados: (a) Polido;(b) Macio;(c) Rugosidade moderada;(d) Alta rugosidade.

2.3.1 Influência da compactação na estrutura interna de misturas asfálticas

Segundo Consuegra *et al.* (1989) *apud* Bessa (2012), a diferença nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas tidas como iguais, porém compactadas por métodos diferentes, têm sido atribuídas principalmente à estrutura interna das mesmas.

Quatro fatores são importantes para avaliar a estrutura interna de uma mistura asfáltica, são elas: quebra das partículas, pontos de contato, orientação e segregação das partículas e são descritas mais detalhadamente nos itens que se seguem.

QUEBRA DAS PARTÍCULAS

Diferentes métodos de compactação geram tensões diferenciadas nos agregados durante a modelagem dos corpos de prova, esse processo gera deformações e até a quebra das partículas apesar da boa qualidade dos agregados empregados, gerando assim, a mudança na distribuição granulométrica.

Marsal (1975) *apud* Gómez (2011) desenvolveu o índice B_g para quantificar a quebra das partículas. O método consistiu em medir as mudanças individuais entre as partículas, antes e após ensaios de compressão triaxial. Para o cálculo do B_g é necessário conhecer as curvas granulométricas antes e após o processo de compactação, com intuito de achar as diferenças entre os pesos retidos iniciais e finais, como mostra a Equação 2.1, correspondentes às frações k de diâmetro d_{nk} como mostra na Figura 2.15.

O cálculo do parâmetro B_g é dado por:

$$B_g = \sum_{k=1}^n \langle \Delta W_k \rangle \quad (2.1)$$

$$\Delta W_k = \Delta W_{ki} - \Delta W_{kf} \quad (2.2)$$

Onde:

$B_g =$ Fator quebra de Marsal

$\Delta W_k =$ Soma dos valores positivos

$\langle \ \rangle =$ é o colchete de Mc Cauley e $\langle \Delta W_k \rangle = \Delta W_k$ se $\Delta W_k \geq 0$ e $\langle \Delta W_k \rangle = 0$ se $\langle \Delta W_k \rangle = \Delta W_k < 0$

A soma dos valores de ΔW_k deve ser igual à zero, Figura 2.16. O fator de quebra é a soma dos valores positivos de ΔW_k , que representa a porcentagem em peso dos grãos que sofreram fragmentação. Os limites do fator quebra estão definidos entre zero (0%), a menor porcentagem de quebra, e cem (100%) a máxima que o material possa sofrer (Gómez, 2011).

Conforme Gómez (2011) na década de 1960 foram desenvolvidas diferentes pesquisas sobre a quebra de partículas durante diversos ensaios de laboratório e campo, concluindo-se que o índice de quebra aumenta com o tamanho das partículas e com a sua angularidade.

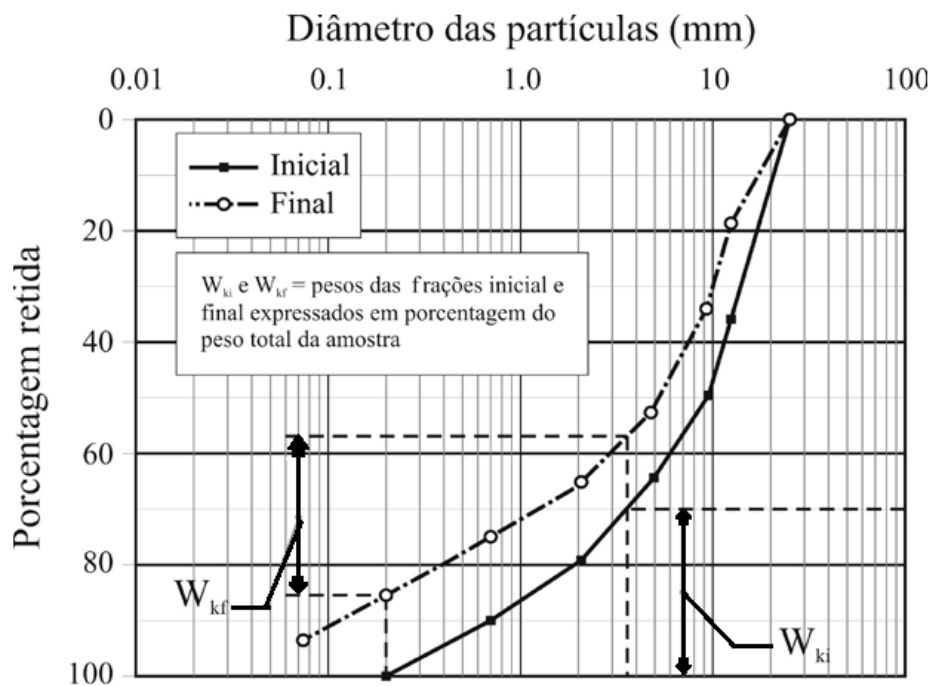


Figura 2.15 - Mudança na distribuição granulométrica produzida pela rotura dos grãos (Marsal, 1975) *apud* (Gómez, 2011).

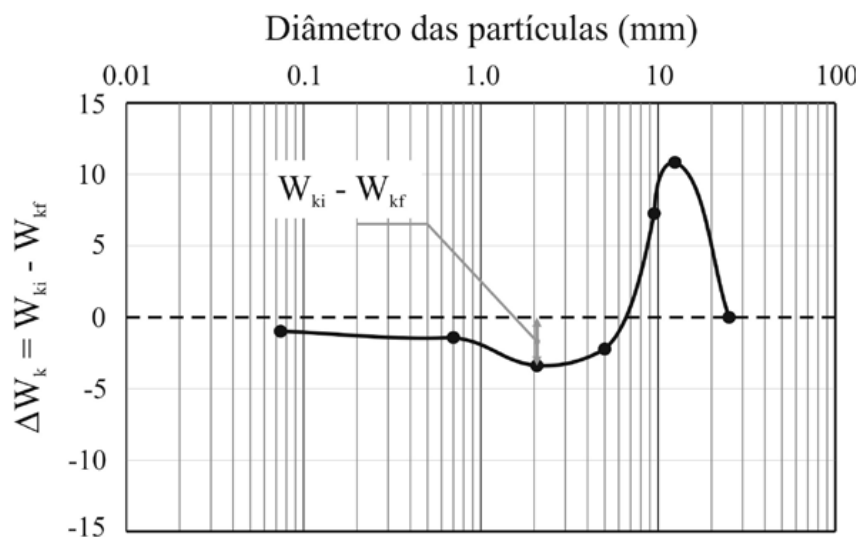


Figura 2.16 - Representação gráfica da variação dos pesos inicial e final (Marsal, 1975) *apud* (Gómez, 2011).

PONTOS DE CONTATO

Diferentes tipos de compactação produzem corpos de prova com o posicionamento dos pontos de contato diferenciados na estrutura interna das misturas. Sousa *et al.* (1991), mostraram que amostras produzidas no compactador por amassamento possuem um maior número de pontos de contato entre as partículas o que resulta em maior resistência a deformação permanente se comparadas com outros métodos.

O número de pontos de contatos entre os agregados de uma mistura depende dos parâmetros e dos métodos de compactação (Tashman *et al.*, 2001). A Figura 2.17 mostra o esquema do contato entre as partículas.

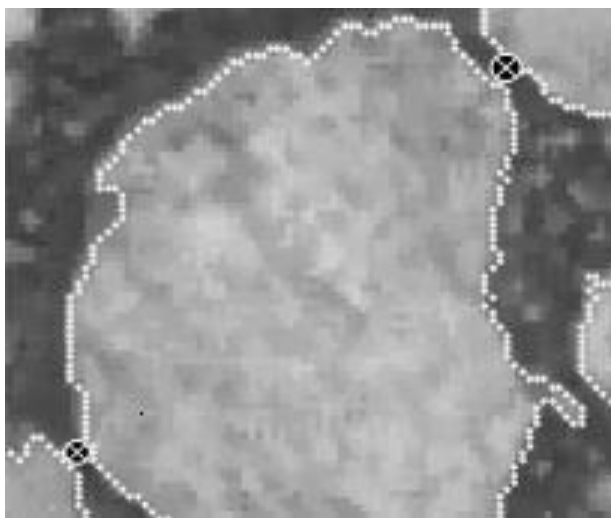


Figura 2.17 - Contato entre agregados (Mahmoud *et al.*, 2010).

Nessa pesquisa foi avaliada somente a área de contato, que é a soma dos pontos de contato entre uma partícula e outra, por meio de uma distância mínima estabelecida pelo operador no programa, que no caso dessa pesquisa foi de 0,1mm.

ORIENTAÇÃO DAS PARTÍCULAS

Brown e Gibb (1999) *apud* (Iwama, 2009), estabeleceram que a orientação dos agregados é afetada pelo método de compactação, e tem grande influência nas propriedades das misturas asfálticas. A orientação das partículas pode ser definida como o nível de anisotropia dos agregados na mistura. A anisotropia é causada pela distribuição não uniforme dos constituintes da microestrutura (Tashman *et al.*, 2004).

Masad *et al.* (1998) *apud* (Safidmazgi, 2011), trabalharam na obtenção eficiente de índices para quantificar a estrutura interna. Ele utilizou amostras compactadas em laboratório e em campo realizando cortes na vertical para serem escaneadas a partir de fotos capturadas por uma câmera digital.

Para avaliar o efeito da orientação, ele utilizou as equações 2.3 e 2.4.

$$\Delta = \frac{100}{N} \sqrt{\left(\sum_{k=1}^n \sin 2\theta_k\right)^2 + \left(\sum_{k=1}^n \cos 2\theta_k\right)^2} \quad (2.3)$$

Onde,

Δ = Vetor Magnitude;

θ_k = Ângulo com a horizontal de um agregado isolado;

N = Número de agregados analisados na imagem.

O vetor magnitude pode variar de 0 a 100, $\Delta=0$ significa que a orientação das partículas é completamente diferente, enquanto que $\Delta=100$ todos os agregados se organizaram na mesma direção.

$$\theta = \frac{\sum_{k=1}^n |\theta_k|}{N} \quad (2.4)$$

Onde:

θ = Ângulo de inclinação a partir da direção horizontal;

θ_k = Ângulo com a horizontal de um agregado isolado;

N = Número de agregados analisados na imagem.

A Figura 2.17 ilustra com mais detalhe o ângulo em relação a horizontal utilizado nas equações apresentadas.

Outro método similar foi apresentado por Hunter *et al.* (2004), eles descreveram uma técnica de imagens utilizando software. O software produzia imagens monocromáticas com objetivo de retirar informações da diferença do contraste dos diferentes objetos da imagem.

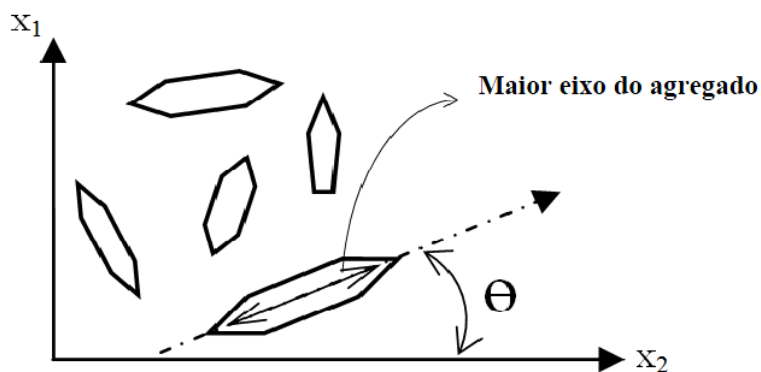


Figura 2.18 - Orientação das partículas (Bessa, 2012)

Ângulos na horizontal são utilizados em cortes feitos na vertical, já a análise feita em cortes horizontais, à metodologia empregada e através de ângulos radiais como mostra na Figura 2.18. O ângulo de ϵ_i é expresso pela linha radial, que passa pelo centroide da particular e calcula o ângulo em relação ao maior eixo. O alcance do ângulo ϵ_i é de 0° a 90° . Sendo, $\epsilon_i=0$ distribuição radial; $\epsilon_i= 90^\circ$ partículas em direção da linha de circunferência; $\epsilon_i=45^\circ$ distribuição aleatória.

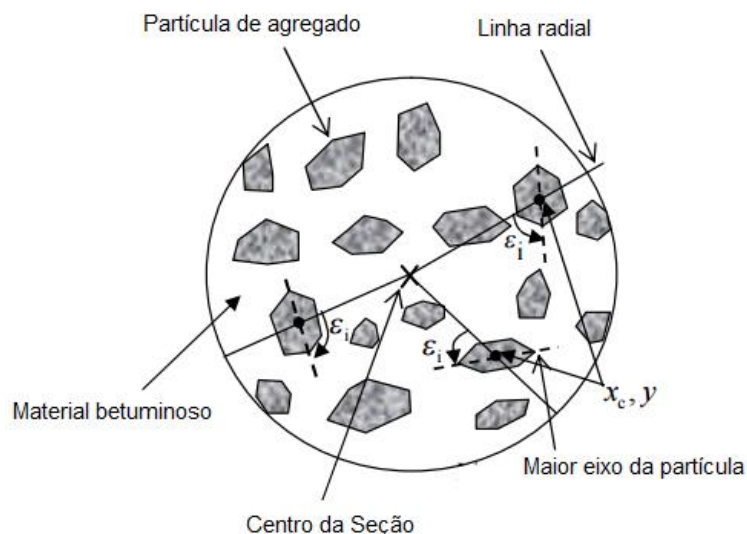


Figura 2.19 - Esquemática de análise de imagens (Hunter *et al.*, 2004).

SEGREGAÇÃO DAS PARTICULAS

Em geral, a segregação pode ser definida como a falta de homogeneidade entre os constituintes (ligante asfáltico, agregados graúdos e miúdos) de uma mistura asfáltica (Bessa, 2012). A segregação dos agregados ocorre tanto em campo como em laboratório, resultando na distribuição não uniforme das partículas.

Em outras palavras, a segregação é a separação entre os agregados maiores e menores na estrutura da mistura asfáltica e pode diminuir a resistência, diminuindo a vida útil do pavimento.

A segregação pode ser usada para entender as diferenças entre métodos de compactação e sua influência no comportamento mecânico de misturas asfálticas (Iwama, 2009). Segundo Hunter *et al.* (2004), os métodos de compactação giratória e vibratória induzem a uma maior ocorrência de segregação se comparado aos métodos de compactação de placas.

Tashamn *et al.* (2001) analisaram a segregação dos agregados com corpos de prova moldados no compactador giratório e em campo utilizando análise de imagens. Ele separou a seção da mistura em duas partes na imagem: uma região externa e uma interna, Figura 2.19. No estudo, a

segregação foi definida como o raio médio do diâmetro dos agregados dentro da região externa e interna da mistura.

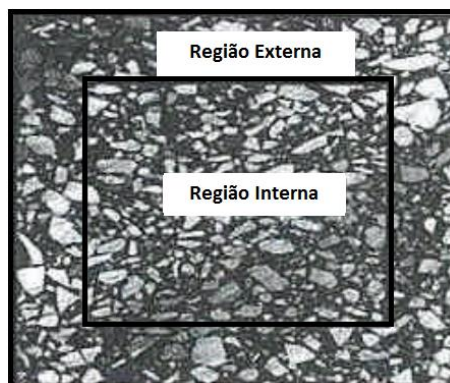


Figura 2.20 – Segregação transversal (Modificado Tashman *et al.*, 2001).

Os resultados de Tashman *et al.* (2001), indicaram que as amostras de campo apresentaram uma distribuição mais aleatória, entretanto nas amostras do compactador giratório, os agregados largos tendem a deslocar para as regiões externas.

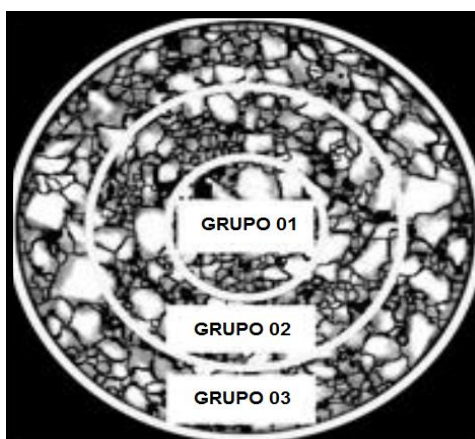


Figura 2.21 - Segregação radial (Modificado Mahmoud *et al.*, 2010)

Teoricamente as partículas possuem uma distribuição uniforme dentro da mistura, na prática os diferentes tipos de compactações geram segregações distintas. Nessa pesquisa, será avaliada a segregação tanto no corte longitudinal por grupos radiais quanto no transversal. A Figura 2.20 ilustra os grupos de segregação radial.

3. MATERIAIS E METODOS

A seguinte pesquisa com intuito de cumprir todos os objetivos propostos seguiu quatro etapas básicas: caracterização dos materiais, confecção dos corpos de prova em três diferentes compactadores, análise dos agregados utilizando o PDI, análise da estrutura interna de misturas asfálticas utilizando o PDI.

3.1 Materiais empregados na pesquisa

3.1.1 Caracterização dos materiais

Os materiais empregados na pesquisa, usados para a confecção das misturas asfálticas foram fornecidos pela Universidade de Brasília com todos os ensaios de caracterização incluindo a dosagem da mistura utilizada por (Obando, 2012).

3.1.2 Agregados

Os agregados usados para a elaboração da mistura asfáltica são uma mistura de brita 0, brita 1, pó de pedra e filler de origem calcária. Dentro dos ensaios realizados, foi avaliada a distribuição granulométrica, dureza, pesos específicos, limpeza dos materiais e propriedades relacionadas com forma e textura das partículas devendo cumprir os requisitos técnicos da Norma DNIT 031/2006 – ES (Pavimentos flexíveis – concreto asfáltico – especificação de material) (Obando, 2012).

3.1.3 Ligante asfáltico

Para a pesquisa, foi utilizado um ligante asfáltico do tipo Cimento Asfáltico de Petróleo caracterizado por penetração como CAP 50-70, proveniente da refinaria Gabriel Passos (REGAP-MG). Os ensaios realizados foram feitos com o intuito de comparar com as estipuladas na norma DNIT 095/2006 – EM (Cimento asfáltico de petróleo – especificações de materiais). Dentro dos ensaios realizados, destaca-se a determinação da curva reológica

do ligante, resultados fundamentais para estabelecer temperaturas da mistura e compactação do material.

3.1.4 Mistura asfáltica

Para determinar o teor ótimo de cimento asfáltico foi empregada à metodologia Marshall. Os ensaios foram realizados seguindo os estipulados pela norma DNIT 031/2006 (Pavimentos flexíveis – concreto asfáltico – especificações de serviço). As propriedades da mistura asfáltica, para o teor de asfalto ótimo foram:

- Quantidade de agregados (95%);
- Quantidade de cimento asfáltico (5%);
- Densidade aparente ($2,408 \pm 0,039 \text{ g/cm}^3$);
- Volume de vazios ($4,93 \pm 1 \%$).

3.2 Compactação dos corpos de prova

Nesse capítulo serão apresentadas as metodologias de confecção dos corpos de prova, cabe salientar que, parte das misturas moldadas foram fornecidas por (Obando, 2012).

3.2.1 Compactação Marshall

Para a confecção dos corpos de prova no compactador Marshall foram seguidas as especificações da norma (DNER-ME 043/1995). Foram moldados cinco corpos de prova com 100 mm de diâmetro por 60 mm de altura, onde o controle da temperatura dos materiais são as que se seguem:

- Agregados (160°C);
- Cimento asfáltico de petróleo (145°C).
- Temperatura de compactação (135°C).

A Figura 3.1 exemplifica os passos adotados para confecção dos corpos de prova no compactador Marshall.

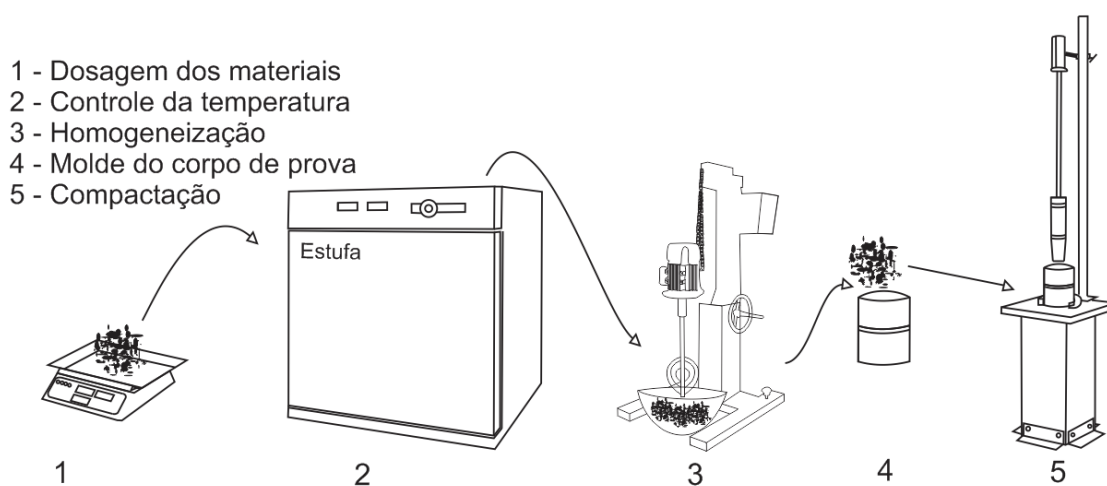


Figura 3.1 - Esquemática da compactação Marshall.

3.2.2 Compactação Superpave

As confecções dos corpos de prova no compactador giratório seguiram a norma AASHTO T 312, os aspectos mais importantes foram: pressão de compactação, ângulo de giro e quantidade de giros por minuto. Nesse trabalho foi utilizando o compactador SERVOPAC da Universidade Federal do Ceará – UFC com os seguintes parâmetros, pressão de 600 kPa, ângulo de 1,25°, 30 rotações por minuto configurado para parar com 110 giros. A quantidade de giros foi escolhida para chegar ao mesmo volume de vazios obtidos nos outros processos de compactação. A Figura 3.2 exemplifica o procedimento adotado para a obtenção dos corpos de prova no compactador giratório Superpave.

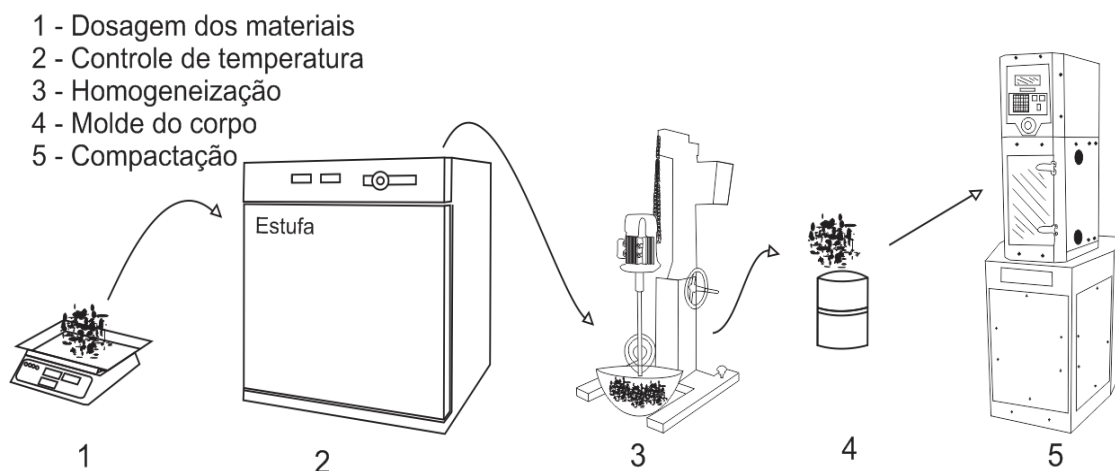


Figura 3.2 - Esquemática da compactação Superpave

3.2.3 Compactação de campo

A compactação com placa vibratória usada para representar as amostras moldadas em campo, normalmente utilizadas para manutenção de pavimento, não segue uma norma específica. A metodologia de modelagem dos corpos de prova segue a mesma metodologia Marshall, mudando apenas a forma de compactação. Onde um molde de metal vazado é colocado no piso, logo após a mistura é distribuída uniformemente até preencher o molde completamente, então a placa é posicionada em cima da amostra e se inicia o processo de compactação por rolagem da placa.

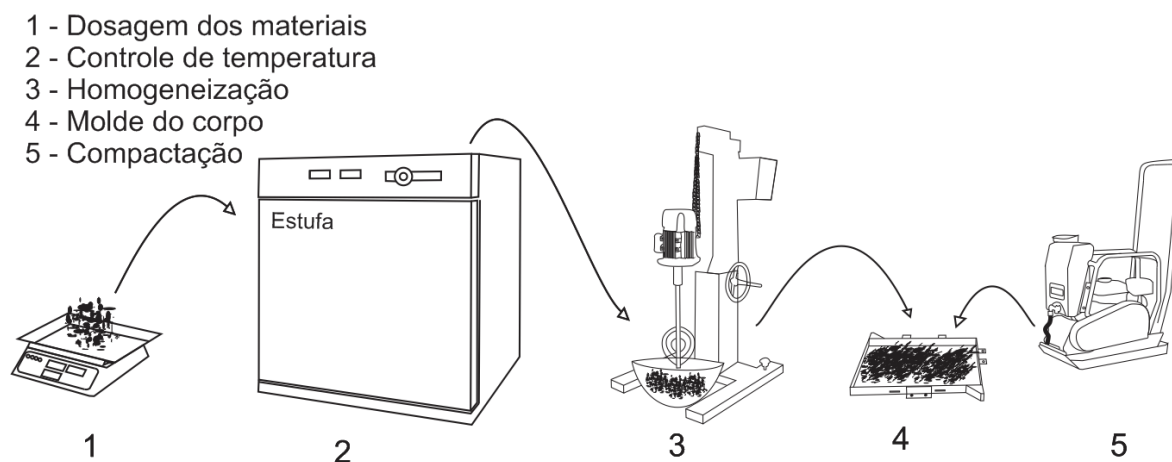


Figura 3.3 - Esquemática da compactação com placa vibratória.



Figura 3.4 – Processo de moldagem com placa vibratória: (a) Misturador; (b) Modelagem; (c) Compactador; (d) Compactação; (e) Termometro a laser; (f) Densimetro eletrico.

Após o processo de compactação, são verificados parâmetros como: temperatura e densidade da amostra. As Figuras 3.3 e 3.4 exemplificam a metodologia e como é feito o processo de compactação mencionado.

3.3 Índice de quebra Marsal e Resendiz (1975)

Prevendo a mudança na distribuição das partículas após as três diferentes metodologias de compactação, foi calculada a quebra de partículas a partir das curvas granulométricas, através do método proposto por Marsal e Resendiz (1975). A metodologia proposta foi escolhida pelo fato de fornecer dados confiáveis uma vez que considera as mudanças de todas as frações utilizadas e pela simplicidade dos cálculos.

Para a realização das curvas granulométricas foi necessário retirada do ligante betuminoso, que seguiu a norma DNER-ME 053/94, que consiste em colocar o material com solvente dentro de um aparelho denominado Rotarex,

que possui uma cuba metálica cilíndrica acoplada a um motor que o faz girar, o procedimento empregado pode ser visto na Figura 3.5.



Figura 3.5 - Remoção do betume da mistura asfáltica: (a) Mistura do solvente; (b) Rotação do equipamento; (c) Agregados após ensaio.

3.4 Processamento digital de imagens PDI

O presente trabalho, com intuito de quantificar a mudança que ocorreu no material quando submetido a diferentes tipos de compactação, utilizou-se dois procedimentos de análise através do processamento digital de imagens. O primeiro, para quantificar a mudança que ocorreu na estrutura interna das misturas asfálticas através do programa IPAS 2. O segundo procedimento, o sistema de medida de imagens de agregados AIMS, para quantificar a mudança na forma das partículas e complementar com a metodologia de quebra de partículas proposto por Marsal e Resendiz (1975), possibilitando análise mais detalhada das propriedades de forma por fração granulométrica, os procedimentos adotados serão apresentados neste capítulo dividido em duas partes, uma para cada metodologia.

3.4.1 Análise da forma dos agregados utilizando o AIMS

Prevendo a mudança física nos agregados, foi realizada na Universidade Federal do Ceará (UFC), no Laboratório de Engenharia de Transportes (LET), a utilização do sistema de medição de imagens de agregados (AIMS).

O AIMS é capaz de fornecer cinco diferentes propriedades, três delas são para os agregados graúdos, sendo elas: forma, angularidade e lamelaridade, outra propriedade apenas para os agregados miúdos é a forma 2D, restando apenas a textura superficial que são para ambos os tamanhos de agregados.

Para a utilização do equipamento, primeiramente, o material deve ser passado por uma série de peneiras, Tabela 3.1, no qual os materiais retidos serão higienizados e posteriormente analisados no equipamento. Na segunda etapa, aproximadamente 50g do material, para cada tamanho, devem ser distribuídos na bandeja de forma que evite o contato entre as partículas. Após a separação da amostra deve-se configurar o *software* com o tipo de análise e o tamanho dos agregados a serem ensaiados. Após a obtenção das imagens, o equipamento gera todos os resultados em planilhas do MS Excel (Bessa, 2012).

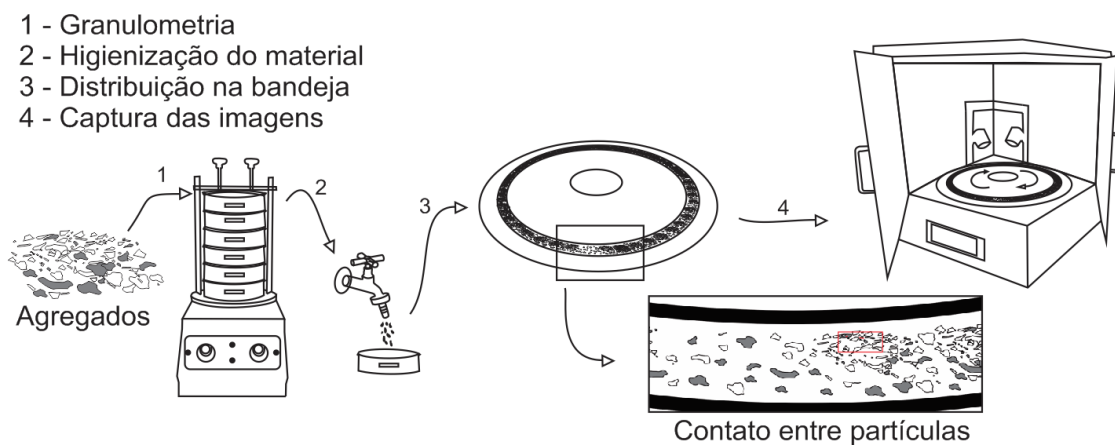


Figura 3.6 - Esquemática do procedimento de ensaio no AIMS

A Figura 3.6 exemplifica os passos adotados no AIMS, enfatizando a parte onde deve ser evitado o contato entre partículas, a fim de se obter um número mínimo de agregados para análise.

Tabela 3.1 - Tamanho dos agregados analisados no AIMS.

Peneira (ASTM)	Abertura (mm)
1"	25,00
3/4"	19,00
1/2"	12.5
3/8"	9.5
#4	4.75
#8	2.36
#16	1.18
#30	0.6
#50	0.3
#100	0.15
#200	0.075

3.4.2 Parâmetros analisados no AIMS

As expressões matemáticas que o AIMS aplica para medir as propriedades de forma, angularidade, esfericidade e textura nos materiais granulares se apresentam a seguir:

FORMA 2D

A forma 2D quantifica a forma relativa de imagens bidimensionais das partículas de agregados miúdos (peneiras, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100, N°200). O índice da forma 2D varia de 0 a 20, quanto mais próximo de zero, mais parecida a um círculo perfeito será a partícula. O índice se calcula segundo a Equação 3.1.

$$Forma\ 2D = \sum_{\theta=0}^{\theta=260-\Delta\theta} \left[\frac{R_{\theta+\Delta\theta} R_{\theta}}{R_{\theta}} \right] \quad (3.1)$$

Onde,

R_{θ} = raio das partículas no ângulo θ ; e

$\Delta\theta$ = diferença incremental do ângulo.

ANGULARIDADE

A angularidade é medida por meio do gradiente de angularidade (GA). Podendo ser aplicado em agregados graúdos e miúdos. O GA quantifica a mudança ao longo das bordas das partículas e varia de 0 a 10.000. Valores próximos de 0 tendem a ter formato de um círculo perfeito, enquanto que partículas com um gradiente de angularidade próximo de 10.000, indica uma partícula extremamente angular. A angularidade pode ser calculada pela equação 3.2.

$$GA = \frac{1}{\frac{n}{3} - 1} \sum_{i=1}^{n-3} |\theta_i - \theta_{i+3}| \quad (3.2)$$

Onde,

Θ = ângulo de orientação dos pontos de borda;

N = número total de pontos; e

I = i-ésimo ponto de borda da partícula.

TEXTURA SUPERFICIAL

A textura superficial pode ser definida como as variações nos níveis de pixels de uma imagem. Esta descreve a polidez ou rugosidade das superfícies das partículas de agregados, sendo aplicada apenas para os agregados graúdos. De acordo com Masad (2005) *apud* (Gómez, 2016), a textura é analisada por meio do método *wavelets*, que caracteriza a superfície dos materiais por meio da média e do desvio padrão dos cores de pixels das imagens analisadas. A escala varia de 0 a 1.000, sendo um agregado polido aquele cujo valor de textura é bem próximo de zero.

$$Textura\ superficial = \frac{1}{3N} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^N (D_{ij}(x,y))^2 \quad (3.3)$$

Onde,

D = função de decomposição;

n = nível de decomposição da imagem;

N = número total de coeficientes em uma imagem detalhada;

i = direção da textura;

j = índice wavelet; e

x, y = localização dos coeficientes no domínio transformado.

3.4.3 Análise da estrutura interna utilizando o IPAS 2

3.4.3.1 Corte dos corpos de prova

De acordo com Sefidmazgi (2011), o número mínimo de três sessões é necessário para analisar a estrutura interna de uma mistura para que o coeficiente de variação não passe de 5%. Nesta pesquisa os corpos de prova foram cortados tanto nas sessões transversais quanto nas longitudinais como mostra na Figura 3.7.

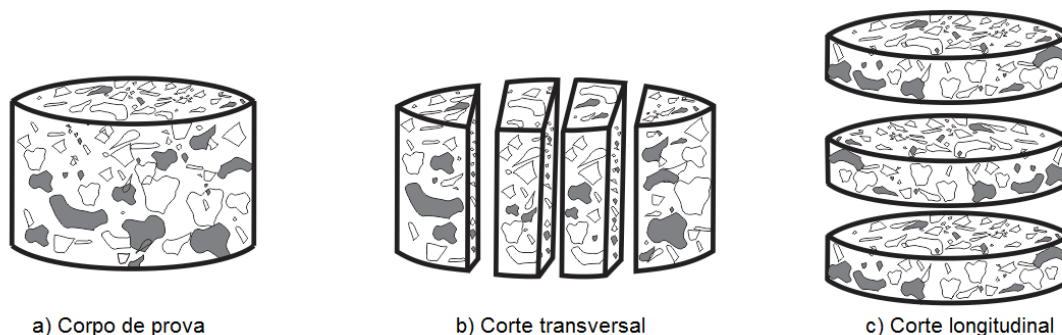


Figura 3.7 - Cortes dos corpos de prova.

Os cortes na transversal foram de 30 ± 2 mm de espessura, sem considerar perda com a espessura da serra, assim como os cortes na

longitudinal foram de 20 ± 2 mm espessura, considerando arrasamento da superfície.

Com intuito de facilitar o reconhecimento dos agregados e remover as ranhuras causadas pela serra durante o corte da amostra, todas as peças foram polidas, como mostra na Figura 3.8.

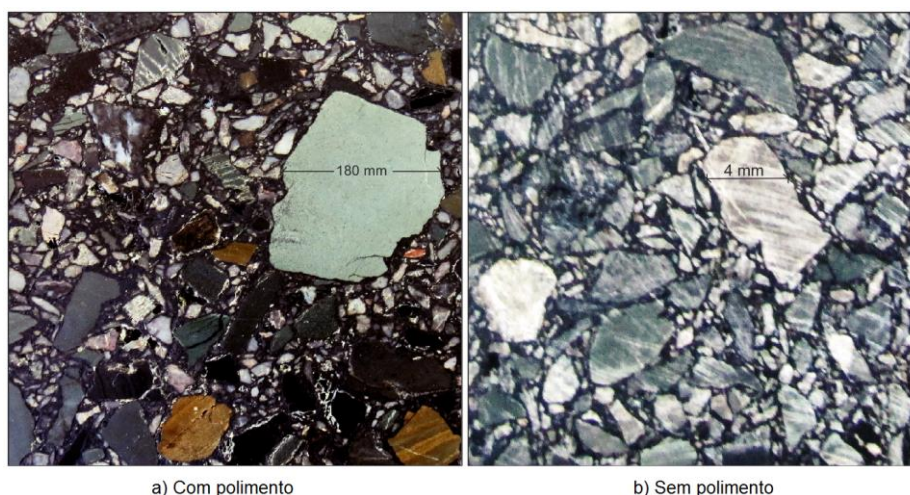


Figura 3.8 - Imagem das amostras: (a) Com polimento; (b) Sem polimento.

Após os cortes e polimento, foram capturadas imagens com uma câmera profissional de alta resolução de três seções principais da amostra como mostra na Figura 3.9, totalizando 36 imagens.

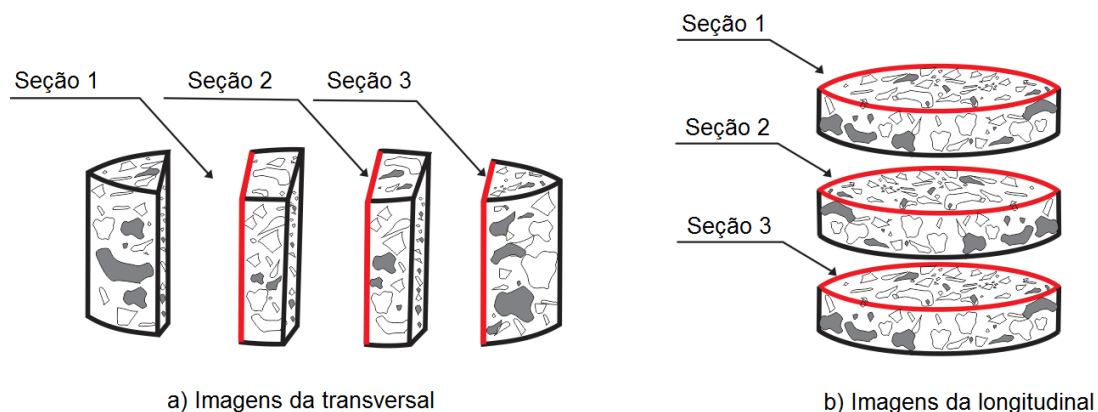


Figura 3.9 - Seções principais.

3.4.4 Parâmetros analisados no IPAS 2

Para a utilização do *Image Processing & Analysis System – IPAS-2*, foi necessário seguir algumas etapas que constavam no procedimento normatizado. A primeira etapa consiste em inserir a imagem no programa, onde a imagem é transformada automaticamente em escalas de cinza. Em seguida, é determinada a resolução da imagem por meio de uma linha azul que o operador define uma distância real conhecida em milímetros. A partir disso, o *software* realiza a divisão da distância conhecida pela quantidade de pixels da imagem, computando a resolução em mm/pixels.

Com a resolução definida, é escolhida uma área retangular de interesse e o programa solicita informações volumétricas da mistura. Foram utilizados parâmetros volumétricos médios das misturas para efeito de comparação dos resultados, como:

- Volume de vazios (4,8%);
- Quantidade de ligante (5%);
- Densidade dos agregados (2,7);
- Densidade do ligante (1,004).

Outro parâmetro solicitado pelo programa é a graduação dos agregados da mistura, em que o usuário cria um arquivo (*.txt) com duas colunas, a primeira contendo o tamanho dos agregados (mm), a segunda os valores de material passante nas peneiras (%).

No passo seguinte, começam as aplicações de filtros para diferenciar os materiais na imagem, na aplicação dos três filtros (tamanho médio, $H_{máx}$, Threshold) são escolhidos valores manualmente até que se chegue próximo à curva granulométrica do material.

Após a aplicação dos filtros, é escolhido o tamanho mínimo do agregado pelo usuário sendo que os valores menores que o escolhido será ignorado pelo

programa. Os valores escolhidos foram baseados em estudos anteriores (Safidmazgi, 2011).

- Tamanho mínimo do agregado (1,18 mm);
- Distancia mínima entre agregados (0,1 mm).

Por fim, é escolhido o tipo de amostra para o cálculo da área considerando corpos sendo circulares ou retangulares.

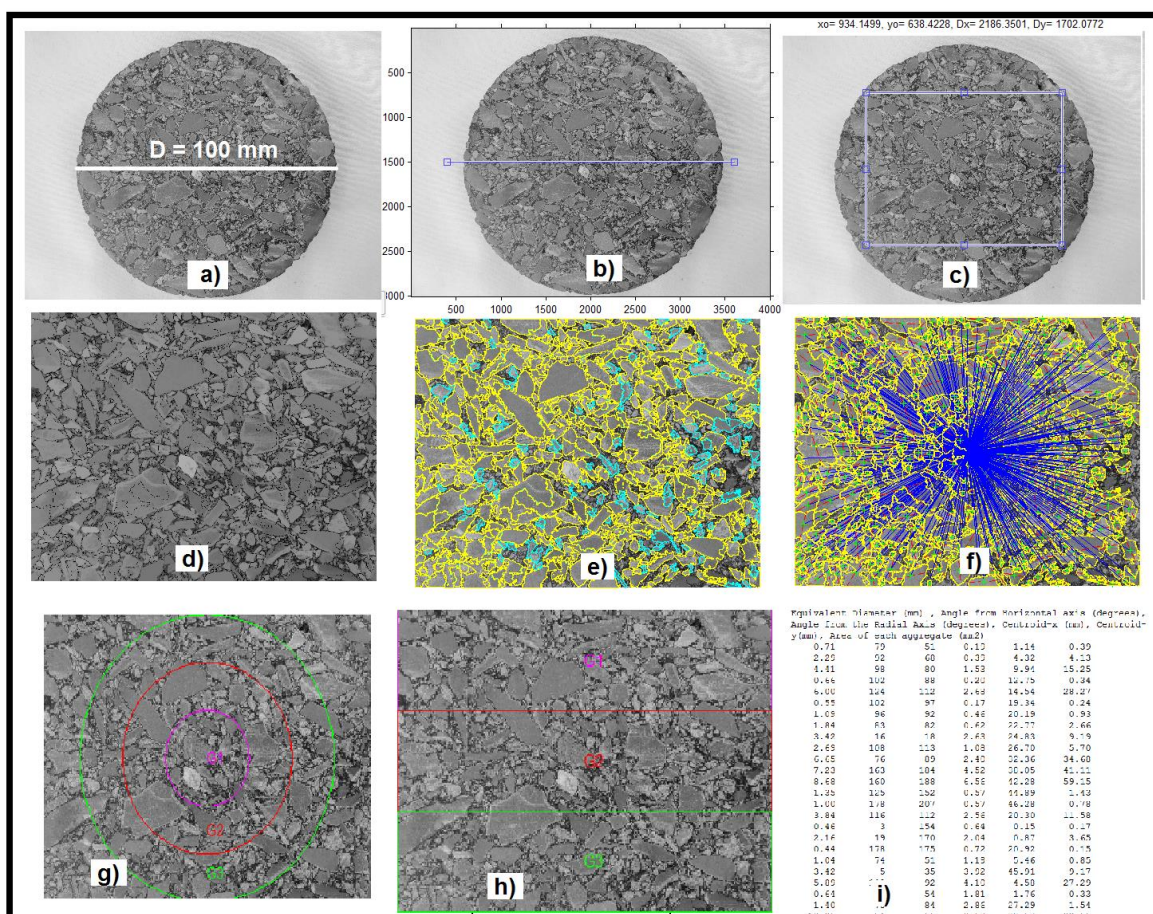


Figura 3.10 - Passos seguidos no iPas 2: (a) Inserindo a imagem, (b) Encontrando resolução, (c) Área de interesse, (d) Aplicação dos filtros, (e) Definição das zonas de contato, (f) Orientação das partículas, (g) Áreas de segregação radial, (h) Áreas de segregação, (i) Tabelas de resultados.

Após todos os passos de tratamento de imagem e configuração das propriedades descritas, o programa é capaz de fornecer os seguintes parâmetros automaticamente:

- Perímetro de todos os agregados;
- Áreas de contato;
- Orientação dos contatos;
- Orientação dos agregados (a partir da horizontal);
- Segregação (vertical e horizontal).

O programa gera todas as tabelas automaticamente na mesma pasta onde contem a imagem, podendo ser aberta no Wordpad ou MS excel. A Figura 3.10 apresenta as principais etapas utilizadas na análise através do uso do IPAS-2.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados e análises feitas e são divididos em três partes: caracterização dos agregados, quebra das partículas, mudança na forma das partículas e caracterização da estrutura interna.

Os resultados referentes à caracterização dos materiais são para dosagem da mistura asfáltica, quanto aos resultados de forma, angularidade e textura superficial, obtidos no AIMS, os valores são comparados com os agregados em estado natural, ou seja, sem passar por nenhum processo de compactação. Os resultados de caracterização da estrutura interna, obtidas através do IPAS 2, são comparadas com os corpos de prova moldados em campo (placa vibratória).

4.1 Agregados

Em função das características granulométricas individuais, foram escolhidos para elaboração da mistura asfáltica (Brita 00, Brita 01 e Pó de pedra), foi determinado que a melhor combinação para entre os constituintes para a delimitação da Faixa C respeitando os limites superior e inferior, foi: 60% Brita 0, 10% Brita 01 e 30% Pó de pedra, atendendo as especificações apresentadas na Tabela 4.1. As porcentagens de materiais se referem à dosagem em medida de massa (Obando, 2012).

O material dosado apresenta as seguintes características: 41% de pedregulho, 50% de areia e 9% de material passante na peneira N° 200, C_u igual a 41,9 e um C_c de 4,3. O material foi classificado de acordo com o sistema unificado de classificação de solos (SUCS) como areia siltosa mal graduada (SP).

Tabela 4.1 - Granulometria material misturado para confecção da mistura asfáltica
(Modificado Obando, 2012).

Peneiras	1"	3/4"	1/2"	3/8"	#4	#10	#40	#80	#200
(mm)	25,4	19,1	12	9,5	4,75	2	0,42	0,18	0,075
% Passa Material misturado CBUQ	100	100	93	88	59	33	14	11	9
% Passa especificação DNIT 031/2006	100 - 100	100 - 100	80 - 100	70 - 90	44 - 72	22 - 50	8 -- 26	4 -- 16	2 -- 10

Tabela 4.2 - Resultado caracterização CBUQ (Modificado Obando, 2012).

Tipo de avaliação	Nome do ensaio	Norma Utilizada	Resultados	Unidade	Especificação DNIT 031/2006
Textura e Forma das partículas	Índice de Forma	DNER 086/094	0,6	*	> 0.5
	Partículas Fraturadas	ASTM D 5821-95	96	%	55% - 100%
	Angularidade de Areia	ASTM C 1252-98	42,5	%	> 40%
Avaliação da Dureza	Passante Peneira N°200	DNER 083/094	8,7	%	2% - 10%
	Equivalente de Areia	DNER - ME 054/97	64	%	≥ 55%
	Limite de Liquidez WL	NBR 6459/84	0	%	0%
	Limite de Plasticidade Wp	NBR 7180/84	0	%	0%
	Índice de Plasticidade	NBR 7180/84	0	%	0%
	Abrasão Los Angeles	DNER-ME 035/98	15,6	%	≤ 50%
Relações massa volume	Massa específica aparente ponderada (Gsa)	NBR NM 53:2009	2,7	(g/cm ³)	-
	Absorção	NBR NM 53:2009	0,8	%	-

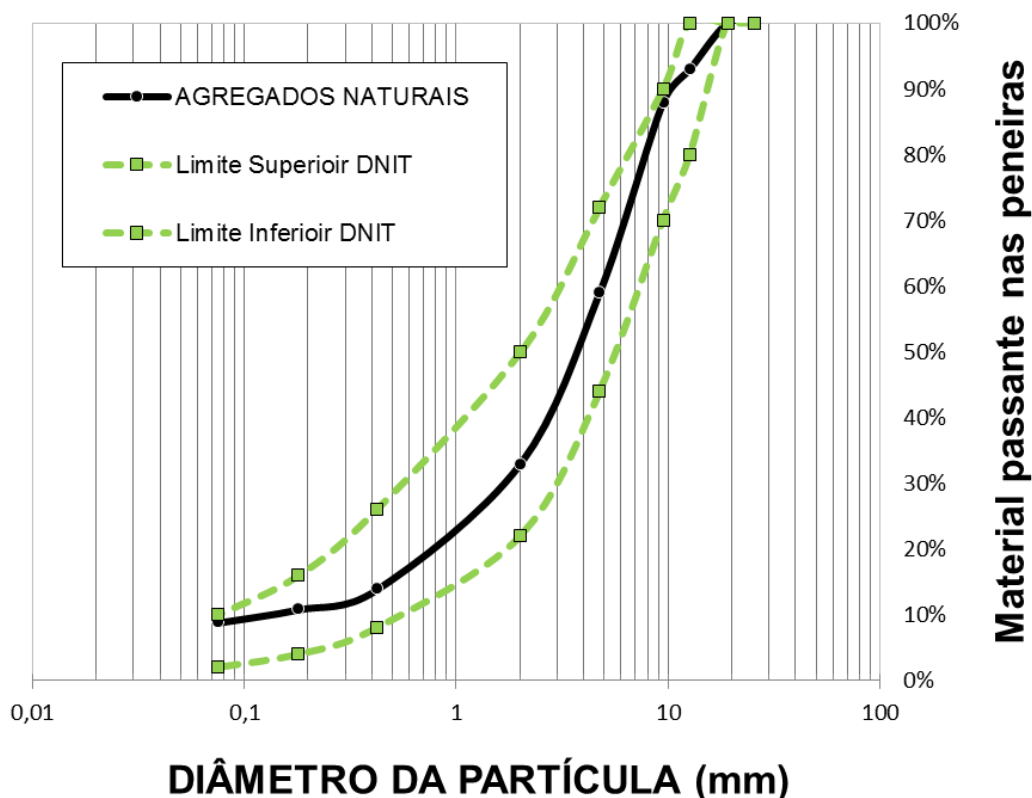


Figura 4.1 - Curva granulométrica do material dosado na Faixa C – CBUQ (Modificado Obando, 2012).

De maneira geral o material atende as especificações estabelecidas pela norma DNIT 031/2006 para confecção de misturas asfálticas, os valores de caracterização são apresentados na Tabela 4.2 realizada através de amostras representativas das misturas asfálticas, obtendo-se parâmetros relacionados com a textura e forma, limpeza, dureza e relações massa e volume (Obando, 2012).

4.2 Cimento asfáltico

Na Tabela 4.3, são apresentados os resultados da caracterização do cimento asfáltico.

Tabela 4.3 - Resultado caracterização CAP 50 – 70 (Modificado Obando, 2012).

Nome do ensaio	Norma utilizada	Resultado	Unidade	Especificações DNIT 095/2006
Penetração 100 g, 5s, 25°C, 0,1 mm	ASTM D5 - D5M / 2013	55,0	0.1 mm	50 a 70
Ponto de amolecimento	ASTM D36 - D36M/2014 e1	49,8	°C	≥ 46
Viscosidade Brookfield 135°C-SP 21 20RPM	ASTM D 4402 - D4402M/2013	315,0	cp	≥ 274
Viscosidade Brookfield 150°C-SP 21 20RPM	ASTM D 4402 - D4402M/2013	164,0	cp	≥ 112
Viscosidade Brookfield 177°C-SP 21 20RPM	ASTM D 4402 - D4402M/2013	61,0	cp	57 a 285
RTFOT - Penetração retida	ASTM D 5 - D5M/2013	67,0	%	≥ 55
RTFOT - Aumento ponto de amolecimento	ASTM D36 - D36M/2014 e1	3,6	°C	≤ 8
RTFOT - Ductibilidade a 25°C	ASTM D 113/2007	> 150	cm	≥ 20
RTFOT - Variação em % massa	ASTM D 2872/2012 e1	-0,005	%	- 0.5 a 0.5
Ductibilidade a 25°C	ASTM D 113/2007	> 150	cm	≥ 80
Ponto de fulgor	ASTM D 92/2012b	346,0	°C	≥ 235
Índice de suscetibilidade térmica	INVE 724/2007	-1	-	- 1.5 a 0.7
Densidade relativa a 20/4 °C	ASTM D 70/2009 e1	1,004	-	-

A partir dos resultados dos ensaios de caracterização é possível confirmar que o cimento asfáltico corresponde ao comercialmente conhecido com CAP 50 – 70 além de valores de viscosidade, que permite obter as temperaturas de mistura e compactação para confecção das misturas asfálticas.

4.3 Mistura asfáltica

A avaliação do teor ótimo de cimento asfáltico foi realizada por meio do método de dosagem Marshall. Os ensaios foram realizados com teor de asfalto de 5% em relação à massa total da mistura. Estabelecidas às percentagens de dos materiais, temperaturas de mistura e compactação, foi prepara uma quantidade suficiente de mistura CBUQ para elaborar todos os ensaios para determinação do teor ótimo de ligante asfáltico, apresentados na Tabela 4.4 (Obando, 2012).

Tabela 4.4 - Resultado caracterização da mistura asfáltica (Modificado Obando, 2012).

Característica	Resultado	Unidade
Percentagem de agregados (Ps)	95	%
Percentagem de cimento asfáltico (Pb)	5	%
Densidade Bulk (Gmb)	2,404	(g / cm ³)
Estabilidade Marshall	9751	N
Fluxo Marshall	4,5	mm
Relação Estabilidade / Fluxo	2166	N/mm
Densidade Máxima medida Rice (Gmm)	2,529	(g / cm ³)
Volume de vazios (% Vv)	4,93	%
Relação Betume/Vazios (RBV)	82	%
Massa específica efetiva (Gse)	2,749	(g / cm ³)
Percentagem asfalto absorvido (Pba)	1,02	%
Teor de asfalto efetivo (Pbe)	4,03	%
Vazios do agregado mineral (% VAM)	14,59	%
Relação filer/ligante efetivo (RP)	2,23	---

De acordo com os resultados obtidos, a mistura composta por 5% de CAP 50 – 70, e 95% de agregado mineral de origem calcária cumpre com todos os requisitos da especificação DNIT 031/2006. O resultado das propriedades das misturas asfálticas seguiram os padrões apresentados na Tabela 4.4, com coeficiente de variação de 2% para todas as metodologias de compactação empregadas na pesquisa.

Tabela 4.5 - Especificação DNIT 031/2006 (Modificado Obando, 2012).

Características	Método de ensaio	Camada de Rolamento
Percentagem de vazios %	DNER - ME 043	3 a 5
Relação betume / vazios	DNER - ME 043	75 - 82
Estabilidade, mínima (N) (75 golpes)	DNER - ME 043	500
Vazios de agregados mineral % VAM	DNER - ME 043	16%

4.4 Quebra das partículas após compactação

Como descrito na metodologia, os ensaios apresentados, foram realizados tendo como graduação inicial a Faixa granulométrica C. Com base nela foram calculadas as mudanças da curva granulométrica antes e após os processos de compactação através da metodologia estabelecida por Marsal e Resendiz (1975).

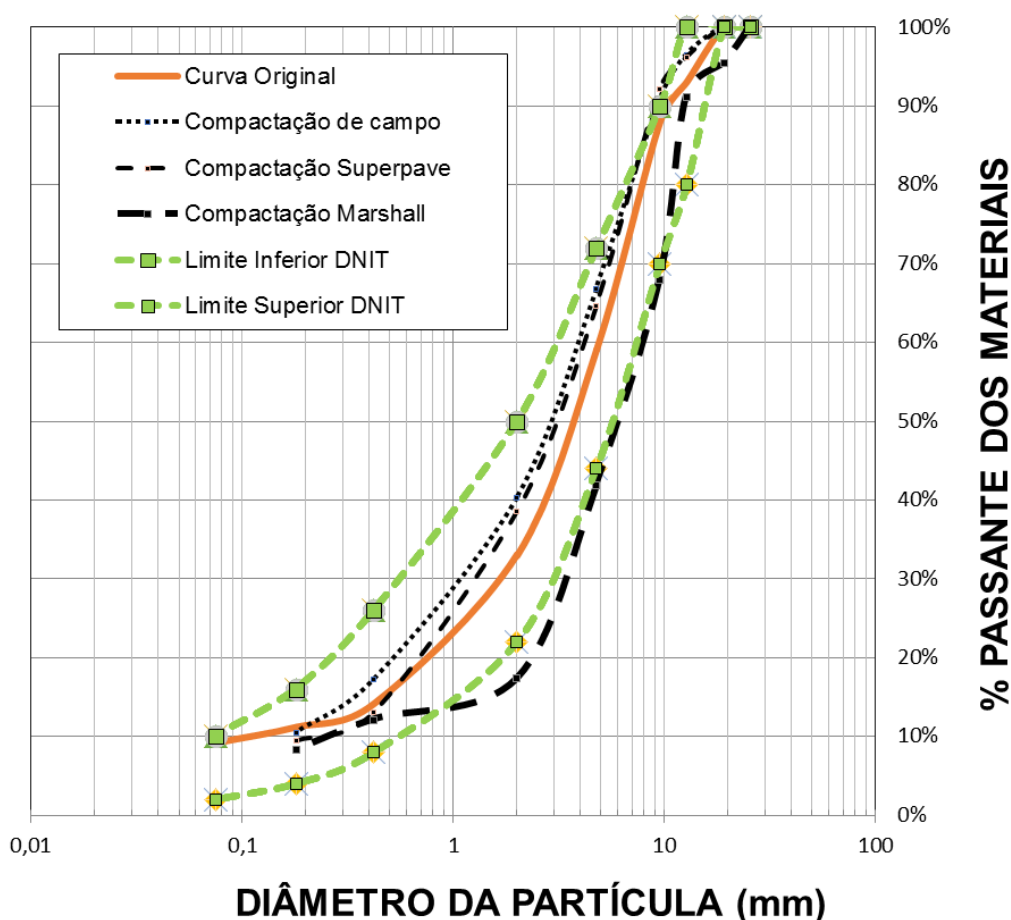


Figura 4.2- Curva granulométrica dos agregados (Limites Faixa C).

A partir da curva granulométrica, Figura 4.2 é possível observar que os agregados das compactações Superpave e placa vibratória, tiveram redução nos diâmetros, já que a curva se deslocou para a esquerda, apesar da perda de finos, provavelmente ocorrido devido à retirada do ligante asfáltico, as curvas respeitam os limites da faixa C estabelecida.

Para a compactação Marshall, os resultados apresentaram valores elevados de partículas com maiores diâmetros, possivelmente devido a uma segregação da mistura, na moldagem do corpo escolhido para a granulometria, fazendo com que o limite inferior definido pela faixa C não fosse respeitado.

Tabela 4.6 - Fator quebra de Marsal e Resendiz (1975)

Fator quebra de Marsal	
Tipo de compactação	Bg
Placa vibratória	24%
Superpave	18%
Marshall	28%

A partir da Tabela 4.6, é possível observar que a compactação Marshall apresenta-se como sendo a mais agressiva em relação à quebra de partículas, seguida pela placa vibratória, e a situação menos agressiva foi à de compactação Superpave.

Apesar dos valores de quebra da compactação com placa vibratória apresentar valor próximo da compactação Marshall, a placa vibratória quebra os agregados de menor dimensão fazendo com que o material continue dentro da faixa granulométrica especificada, para melhor compreensão da mudança, a Tabela 4.7 mostra a porcentagem de material que passa nas peneiras.

Tabela 4.7 - Porcentagem de material passante por fração granulométrica

Peneiras	AGREGADOS NATURAIS	MARSHALL	SUPERPAVE	PLACA VIBRATÓRIA
1"	100%	100%	100%	100%
3/4"	100%	100%	100%	100%
1/2"	93%	95%	96%	96%
3/8"	88%	91%	92%	91%
#4	59%	68%	65%	67%
#10	33%	42%	39%	40%
#40	14%	17%	13%	17%
#80	11%	12%	9%	10%
#200	9%	8%	2%	4%

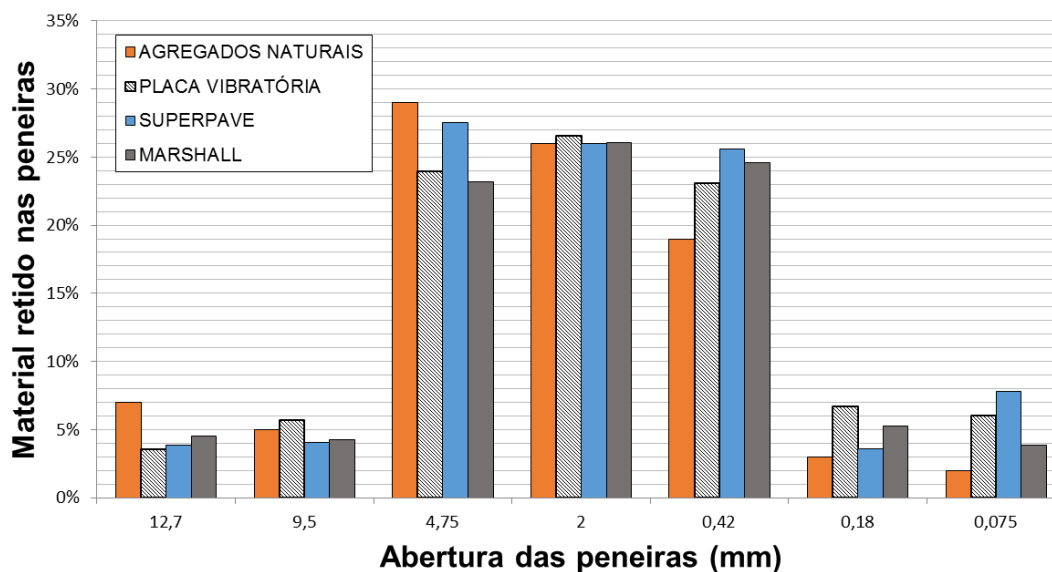


Figura 4.3 - Mudança na distribuição por fração granulométrica

A Figura 4.3 apresenta de forma resumida a variação na porcentagem de material retido nas peneiras. A partir do gráfico conclui-se que para todas as compactações, os agregados sofreram quebra nas peneiras de maiores dimensões como a de 12,7mm e 4,75. Apresentado valores mais elevados nas peneiras de menores diâmetros, confirmando os valores de quebra apresentados na Tabela 4.6.

Os valores de quebra apresentados nesse capítulo, para a compactação Marshall, seguiram as observações apresentados por Gómez (2016).

4.5 Caracterização de forma, angularidade e textura superficial.

A utilização do equipamento AIMS possibilitou analisar com mais precisão as mudanças que ocorreram nos agregados antes a após as compactações por fração granulométrica, as análises e resultados se basearam nas observações feitas por Bessa (2012) e nas classificações feitas por Al Rousan (2004) da Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Limites de classificação (Modificado Al Rousan, 2004)

Propriedade	Valores-Limite / Classificação				
Forma 2D	< 6,5 Circular	6,5 - 8,0 Semicircular	8,0 - 10,5 Semialongado	> 10,5 Alongado	- -
Esfericidade	< 0,6 Achatado/Alongado	0,6 - 0,7 Baixa esfericidade	0,7 - 0,8 Esfericidade moderada	> 0,8 Alta esfericidade	- -
Angularidade	< 2100 Arredondado	2100 - 4000 Subarredondado	4000 - 5400 Subangular	> 5400 Angular	- -
Textura Superficial	< 165 Polido	165 - 275 Macio	275 - 350 Baixa rugosidade	350 - 460 Rugosidade moderada	> 460 Alta rugosidade

FORMA (agregados miúdos)

A forma 2D, ensaio realizado apenas nos agregados miúdos, está relacionado com a proximidade das partículas em forma de um círculo. Quanto mais o valor de forma se aproxima de 0, mais circular a partícula será. A classificação dos agregados em estado natural foi, no geral, como sendo alongado, considerando que apenas os agregados retidos nas peneiras #50 e #100 apresentaram valores menores do que 8, que são semicirculares.

Após as compactações Marshall e Superpave, as formas dos agregados passaram a ser classificados como sendo semicircular para todas as frações com exceção dos agregados mais finos retidos na peneira #200.

As Figuras 4.4 a 4.8, apresentam os resultados de forma 2D obtidos por fração granulométrica, para os agregados naturais e após os diferentes tipos de compactação empregados na pesquisa.

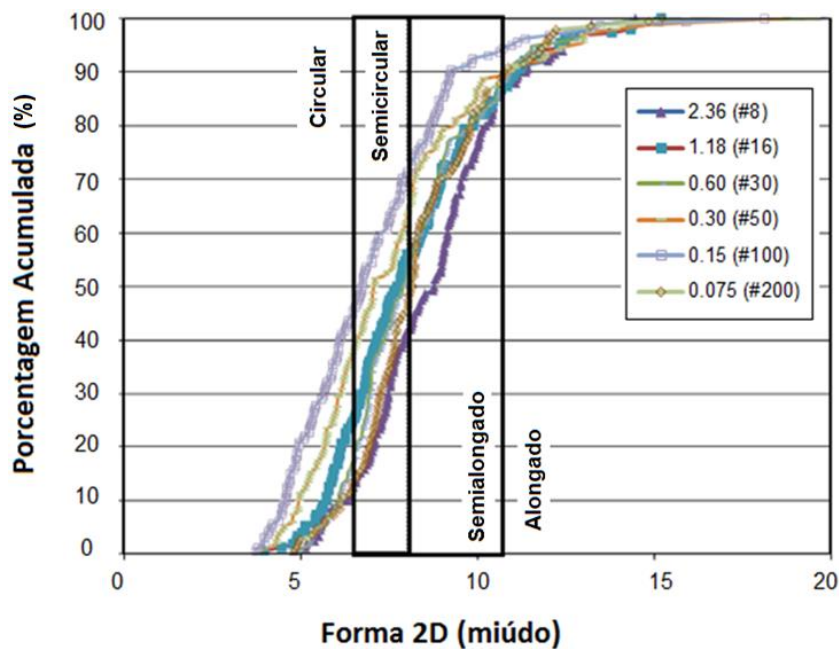


Figura 4.4 - Forma dos agregados naturais

A Figura 4.4 apresenta as curvas de valores de Forma 2D dos agregados naturais, classificados como semialongados, devido cerca de 50% do material estar entre os valores 7,0 e 8,5.

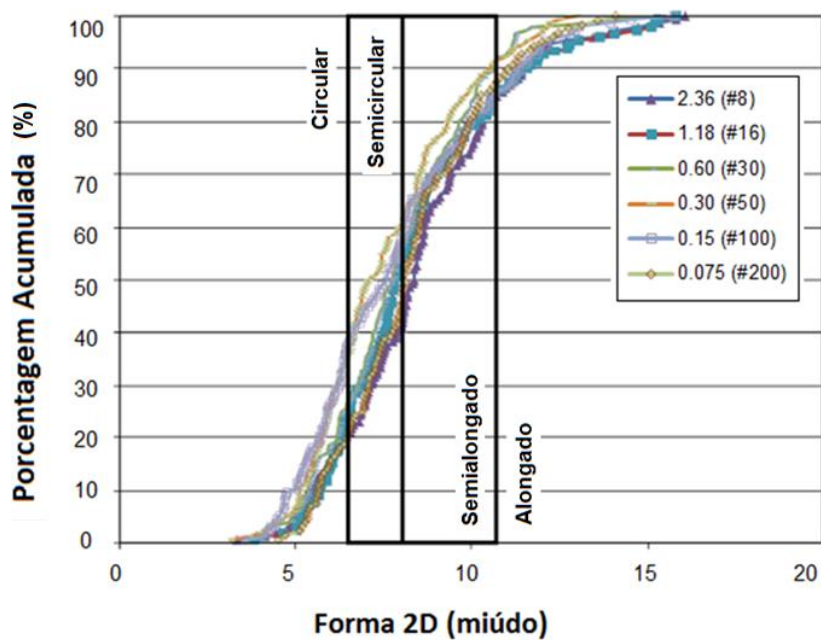


Figura 4.5 - Forma dos agregados após compactação com placa vibratória

A compactação com placa vibratória Figura 4.5, apresentou resultados iguais dos agregados naturais, exceto da peneira #30, que passou a ser classificado como semicircular.

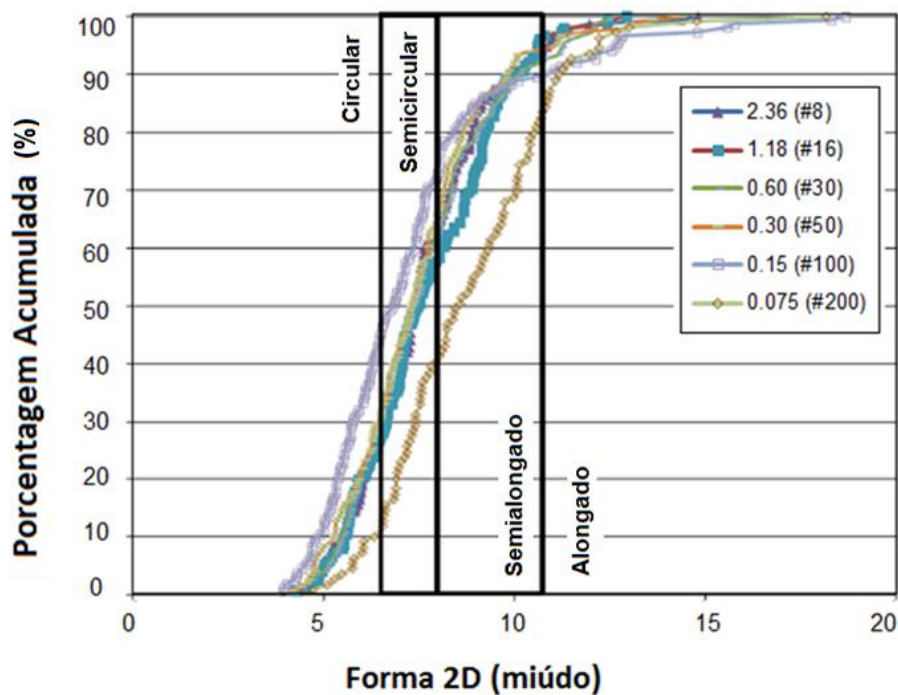


Figura 4.6 - Forma dos agregados após compactação Superpave

Para a compactação Superpave da Figura 4.6, houve alteração nos valores dos agregados de maiores dimensões, das peneiras #8, #16 e #30. Os agregados antes caracterizados como semialongados, passaram a ser semicirculares.

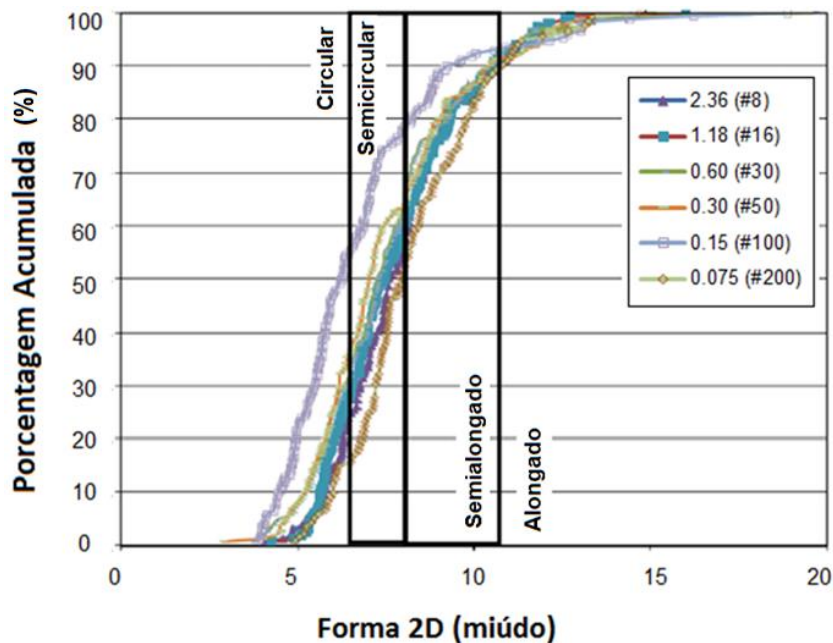


Figura 4.7 - Forma dos agregados após compactação Marshall

A compactação Marshall da Figura 4.7, apresentou também variação nos valores para agregados de maiores dimensões, peneiras #8, #16 e #30.

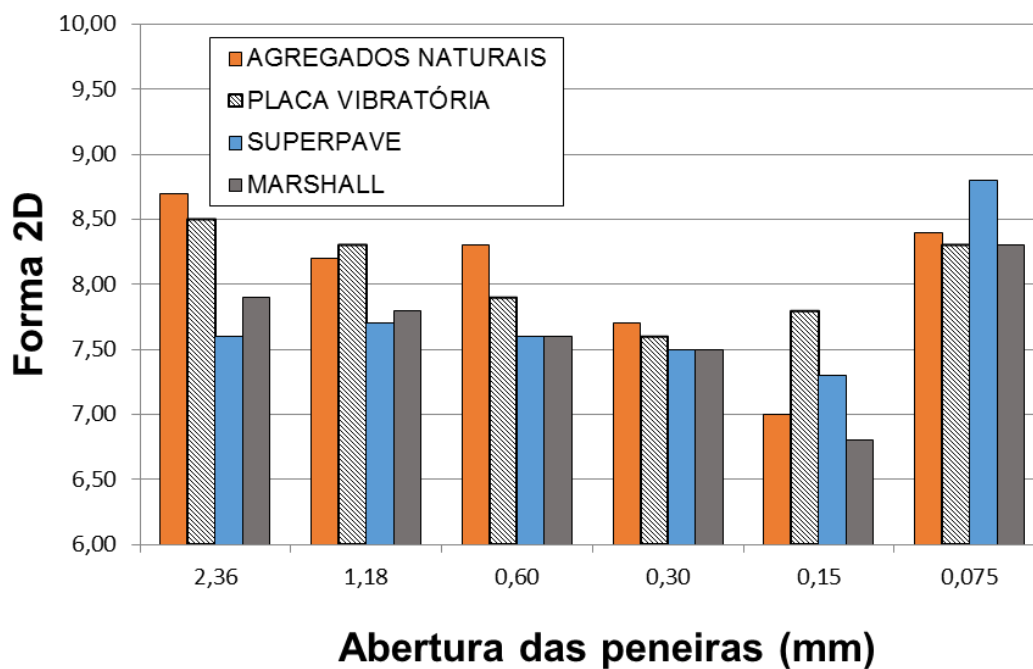


Figura 4.8 - Resumo dos valores de forma para todas as compactações

A partir da Figura 4.8, é possível observar que os agregados até a peneira #50 (0,3mm), de modo geral, passaram a ser mais circulares após as compactações.

A Tabela 4.9 apresenta os valores médios e parâmetros estatísticos para todas as frações analisadas no AIMS e seguiram as observações feitas por Bessa (2012). Os valores de média aritmética são calculados a partir de todos os valores de cada agregado da amostra.

Tabela 4.9 - Média dos resultados de forma 2D do AIMS

Propriedade	Material	Parâmetros estatísticos			
		Média	Número de partículas	Desvio padrão	CV
Forma 2D (miúdo)	Agregado natural	8,05	900	-	-
	Após compactação Marshall	7,65	883	0,28	3,70%
	Após compactação Superpave	7,75	866	0,21	2,74%
	Após compactação placa vibratória	8,07	883	0,01	0,15%
CV = Coeficiente de variação					

A partir dos valores apresentados de forma 2D, conclui-se que, de uma forma geral, os agregados inicialmente caracterizados como semialongados passam a ser caracterizado como semicirculares após qualquer tipo de compactação, provavelmente devido à quebra das partículas alongadas durante a aplicação dos diferentes tipos de compactação.

ANGULARIDADE (agregados graúdos e miúdos)

A angularidade, que é o grau de agudez dos cantos de uma partícula, podendo variar de 0 a 10.000, sendo que valores próximos de 0, a partícula apresenta forma de um círculo perfeito. A caracterização dos agregados em estado natural foi, de forma geral, subarredondados. Após as compactações os agregados não apresentaram novas classificações de angularidade, apesar de

apresentar valores de angularidade mais elevados nos agregados de menores tamanhos, retido nas peneiras #50, #100 e #200.

As Figuras 4.9 a 4.13 apresentam os resultados obtidos no AIMS, e o resumo da variação dos resultados em todas as frações granulométricas analisadas.

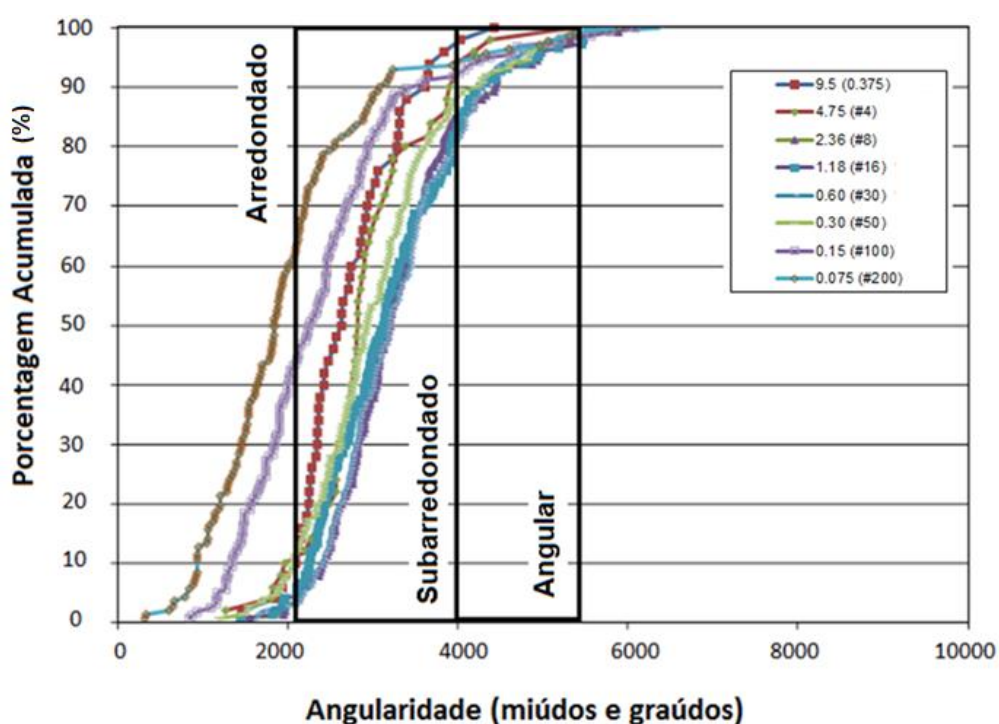


Figura 4.9 - Angularidade dos agregados naturais

O gráfico de angularidade dos agregados naturais da Figura 4.9, foram classificados como subarredondados, com exceção da peneira #200, que foi classificada como arredondada, cujo cerca de 70% dos valores encontra-se abaixo de 2.100.

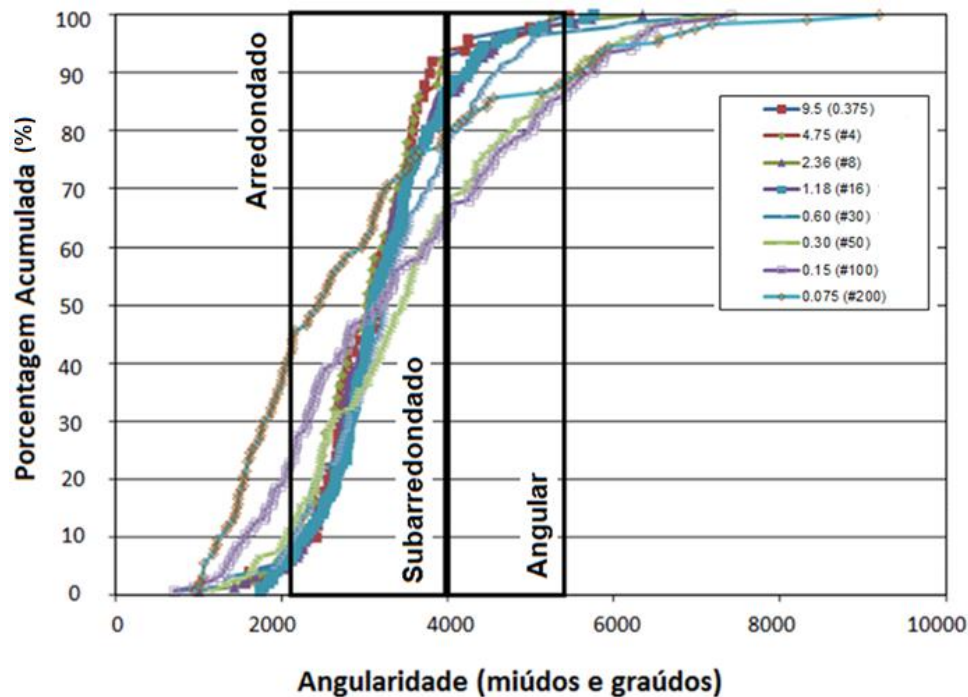


Figura 4.10 - Angularidade após compactação com placa vibratória

Após a compactação com placa vibratória, os agregados de menores dimensões, peneiras #50, #100 e #200 apresentaram valores mais elevados de angularidade. Apesar dos agregados se apresentarem como mais angulares apenas os da peneira #200 passaram de arredondado para subarredondados. Cabe salientar que, agregados mais angulares proporcionam maior intertravamento e atrito interno entre si, proporcionando uma melhor formação do esqueleto mineral.

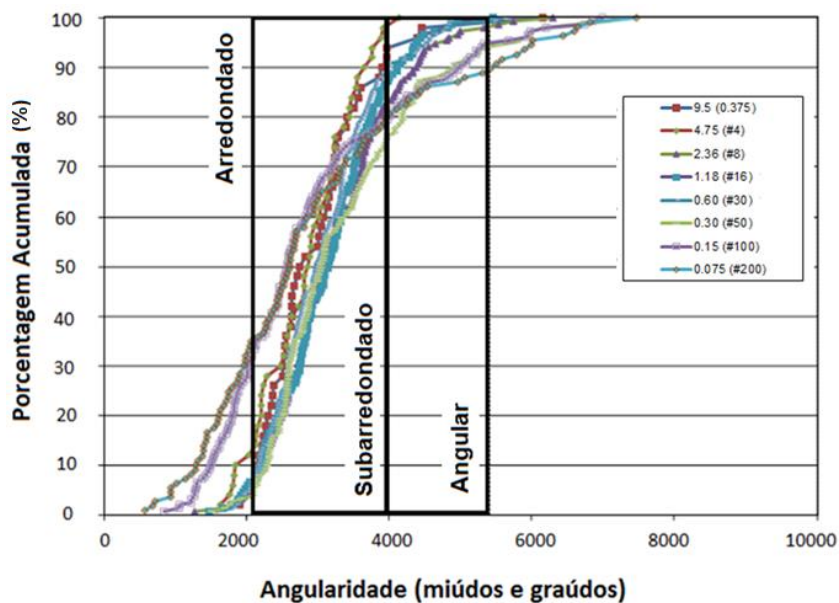


Figura 4.11 - Angularidade após compactação Superpave

A compactação Superpave apresentou valores parecidos com a placa vibratória, exibindo valores elevados nas peneiras de menores diâmetros e mudando a caracterização apenas da peneira #200, de arredondado para subarredondados.

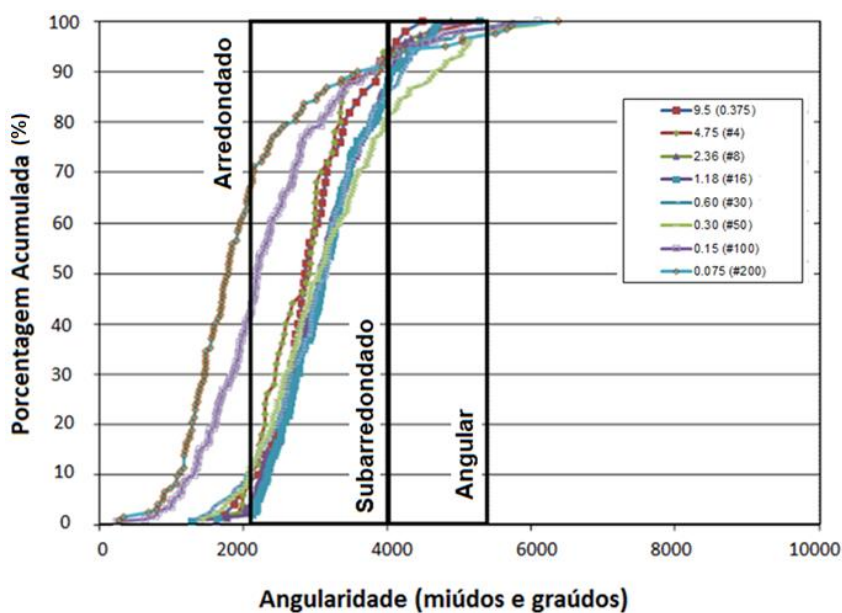


Figura 4.12 - Angularidade dos agregados após compactação Marshall

A compactação Marshall foi a que menos influenciou na variação com respeito a angularidade dos agregados, o que indica uma menor eficiência em relação ao intertravamento entre os agregados miúdos.

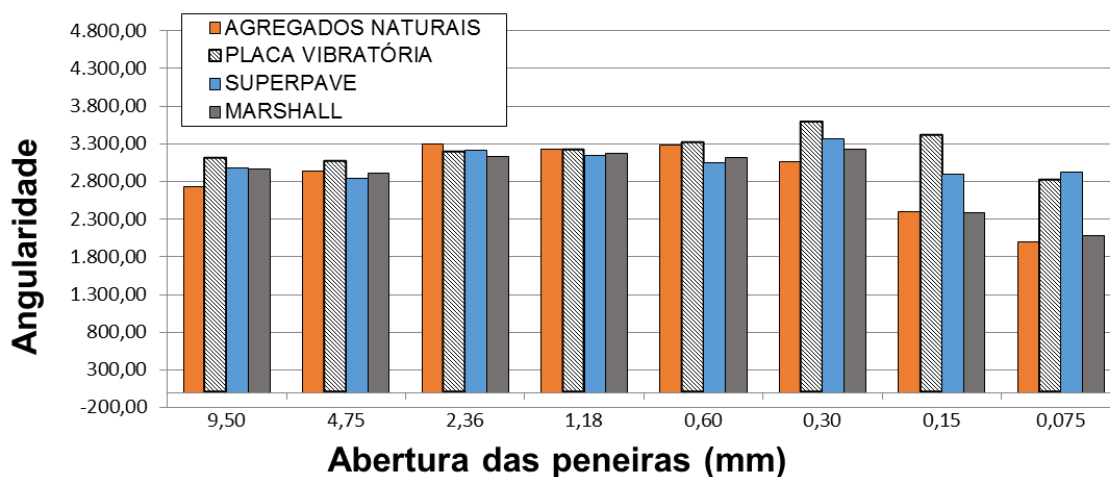


Figura 4.13 - Resumo dos valores de angularidade para todas as compactações

A partir da Figura 4.13, é possível observar que a grande variação de angularidade apenas nos agregados de menores dimensões. A Tabela 4.10 apresenta os valores médios e parâmetros estatísticos para todas as frações analisadas no AIMS. Os valores de média aritmética são calculados a partir de todos os valores de cada agregado da amostra.

Tabela 4.10 - Média dos resultados de angularidade do AIMS

Propriedade	Material	Parâmetros estatísticos			
		Média	Número de partículas	Desvio padrão	CV
Angularidade (grau e miúdo)	Agregado natural	2.867,5	1.000	-	-
	Após compactação Marshall	2.874,4	984	4,94	0,17%
	Após compactação Superpave	3.050,4	966	129,35	4,24%
	Após compactação placa vibratória	3.220,3	983	249,50	7,75%

CV = Coeficiente de variação

A partir da Tabela 4.10, e dos valores apresentados de angularidade, conclui-se de uma maneira geral que, as compactações Superpave e placa vibratória apresentam agregados com valores mais angulares, o que representa estruturas de pavimento com o esqueleto mineral mais resistente, uma vez que, o intertravamento das partículas será elevado.

TEXTURA SUPERFICIAL

Foram obtidos gráficos apenas de duas frações de agregados, uma vez que são as únicas frações que a mistura obtinha de agregados graúdos. A caracterização dos agregados em estado natural foi, em geral, como sendo de rugosidade moderada. Após as compactações os agregados passaram a ser classificados com baixa rugosidade, como é apresentado nas Figuras 4.14 a 4.18.

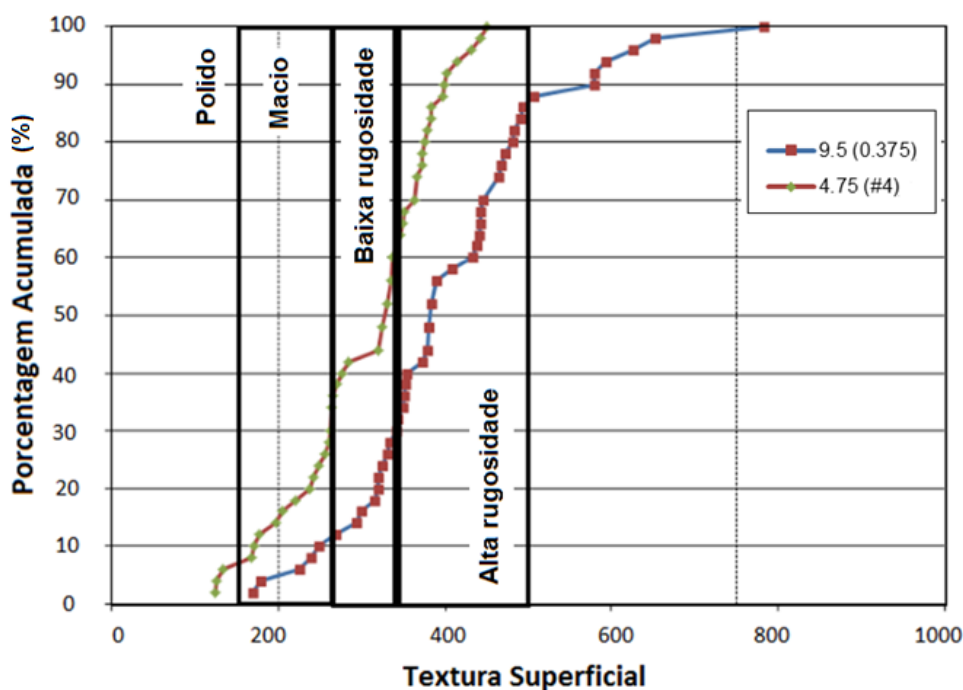


Figura 4.14 - Textura dos agregados naturais

A textura dos agregados naturais foi classificada como sendo rugosidade moderada, calor considerado bom para um bom desempenho do pavimento, uma vez que aumenta a ligação entre o ligante asfáltico e os agregados.

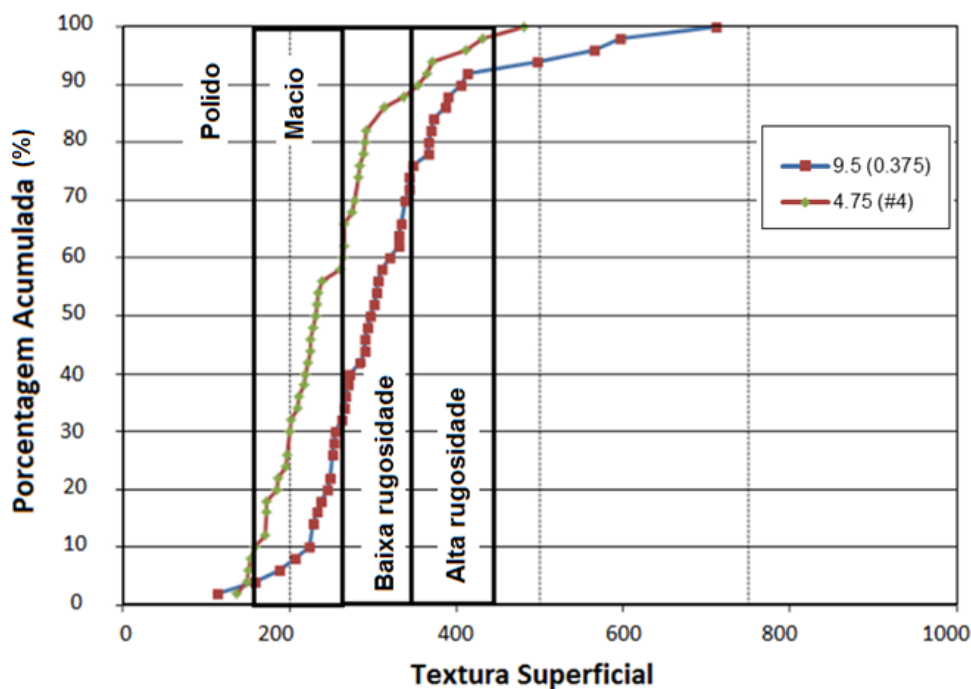


Figura 4.15 - Textura após compactação com placa vibratória

Os resultados apresentados após compactação com placa vibratória, se mostraram como sendo, pouco satisfatórios, uma vez que os agregados passaram a ser classificados, como de baixa rugosidade ou macio. A partir da Figura 4.15, nota-se que cerca de 35% dos agregados sofreram variação na textura após a compactação

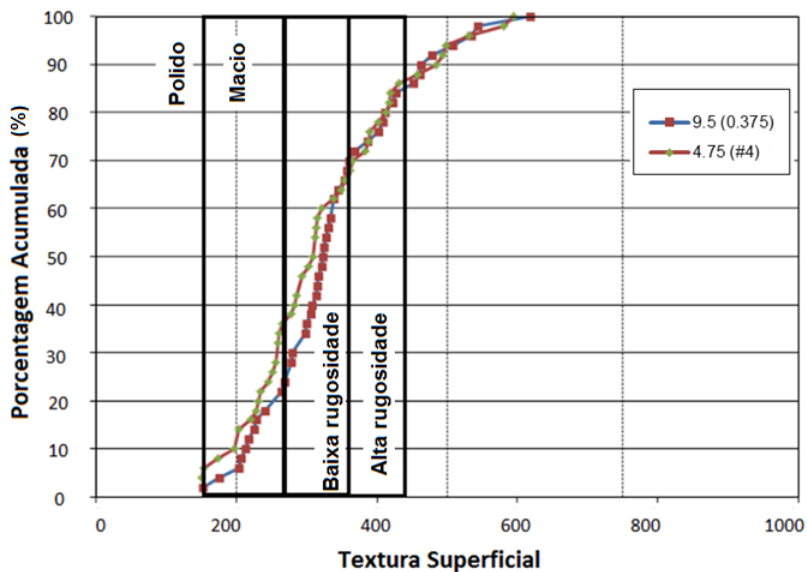


Figura 4.16 - Textura após compactação Superpave

Os valores obtidos após compactação Superpave, Figura 4.16, apresentaram valores mais próximos dos agregados em estado natural, sendo a compactação que melhor conservou os valores de textura superficial inicialmente especificado.

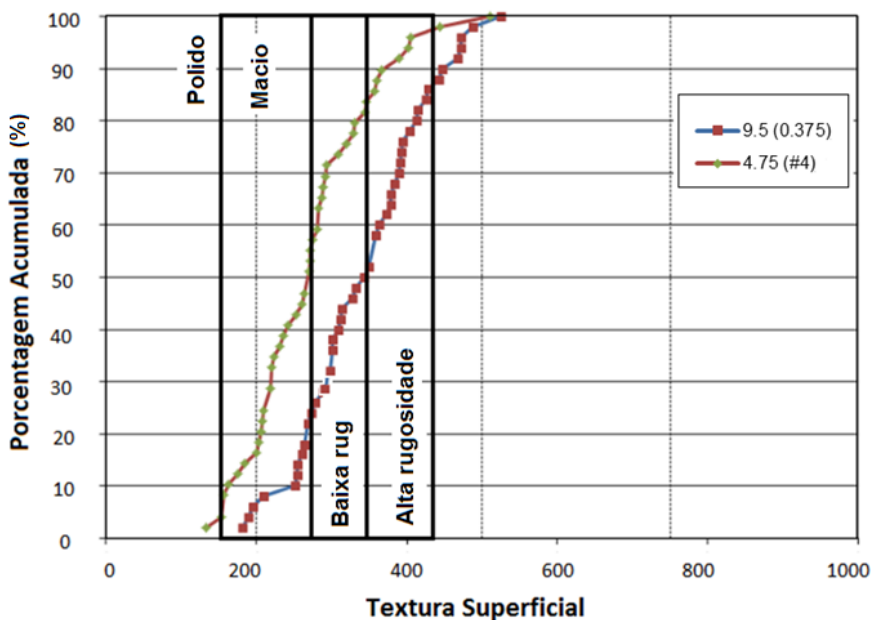


Figura 4.17 - Textura após compactação Marshall

A compactação Marshall da Figura 4.17, apresentou valores de textura insatisfatória assim como a placa vibratória, apresentando valores de baixa rugosidade ou macio.

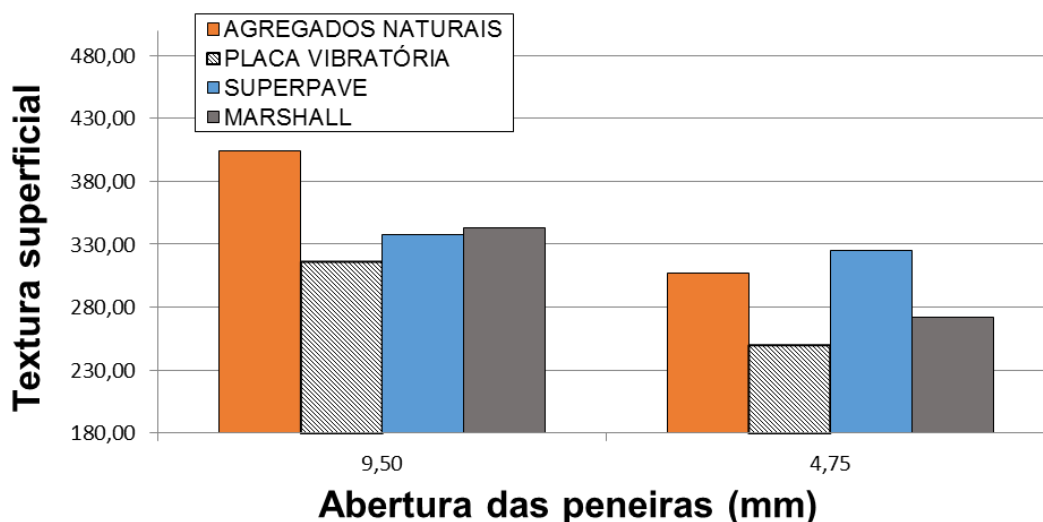


Figura 4.18 - Resumo da textura de todas as compactações

A partir da Figura 4.18, é possível observar que a compactação Superpave foi a que menos influenciou na mudança da textura superficial dos agregados, concluindo-se que é a compactação que mais se aproxima dos valores dos agregados naturais. Os valores de média aritmética são calculados a partir de todos os valores de cada agregado da amostra.

Tabela 4.11 - Média dos resultados de textura superficial do AIMS

Propriedade	Material	Parâmetros estatísticos			
		Média	Número de partículas	Desvio padrão	CV
Textura Superficial (gráudo)	Agregado natural	355,45	100	-	-
	Após compactação Marshall	307,60	99	33,84	11,00%
	Após compactação Superpave	331,25	100	17,11	5,17%
	Após compactação placa vibratória	282,90	100	51,30	18,13%

CV = Coeficiente de variação

A partir da Tabela 4.11 e dos resultados de textura superficial, conclui-se que provavelmente devido às compactações feitas no compactador Marshall e na placa vibratória, tendem a deixar os agregados mais lisos, influenciando no atrito entre partículas e na ligação entre agregado e ligante asfáltico, o que pode diminuir o desempenho do pavimento, causando deformações permanentes.

A diminuição nos valores de textura superficial, também podem ser atribuídos com a camada de ligante que permanece no agregado, devida ao preenchimento dos vazios, após retirada do ligante no equipamento Rotarex.

4.6 Análise da estrutura interna utilizando o IPAS 2

A análise da estrutura interna foi realizada conforme as observações e análises feitas por Safidmazgi (2011). A apresentação dos resultados foi organizada por tipo de compactação, onde serão apresentadas tabelas com valores calculados a partir dos resultados do IPAS 2, e os gráficos de segregação tanto na longitudinal como na transversal, separados por grupos como mostra a Figura 4.19.

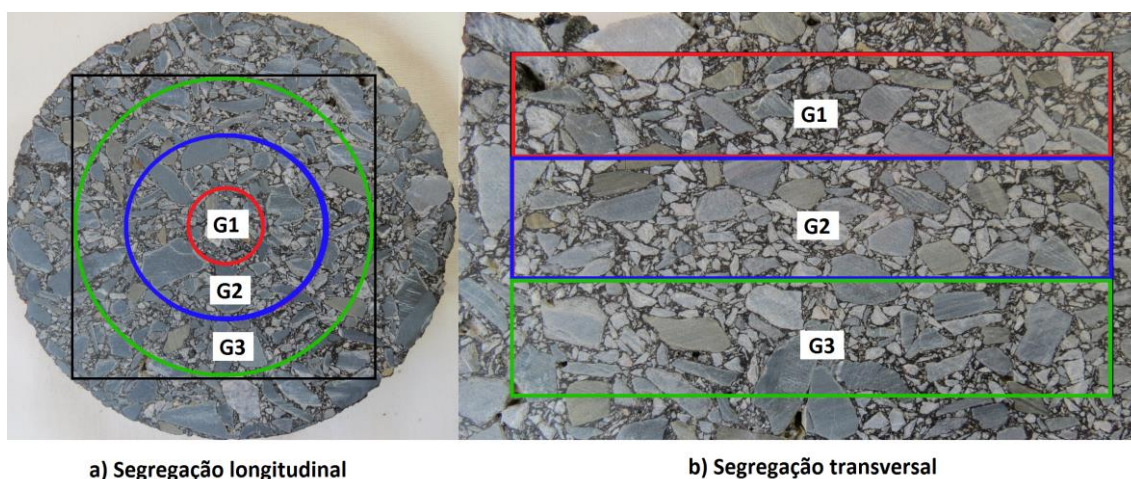


Figura 4.19 - Grupos de segregação (Modificada, tutorial IPAS 2).

Os grupos de segregação são divididos radialmente e verticalmente, representado por quantidade de agregados com dimensões iguais em cada grupo da imagem (G1, G2 e G3). Para efeito de comparação, os gráficos de segregação serão apresentados com suas respectivas cores e comparados com as amostras realizadas em campo, representado pela cor cinza como valor de referência.

COMPACTAÇÃO MARSHALL

A Tabela 4.12, apresenta a caracterização a partir das zonas de contatos dos quais são: numero de zonas de contato, somatório do comprimento das zonas de contato, ângulo médio da orientação das zonas de contato (AAA), vetor magnitude que pode variar de 0 a 100, $\Delta=0$ significa que a orientação das partículas é completamente diferente, enquanto que $\Delta=100$ todos os agregados se organizaram na mesma direção, por fim, os valores apresentados foram calculados em função da média aritmética de cada mistura, que no caso, foram seis imagens para cada tipo de seção.

Tabela 4.12 - Estrutura interna da compactação Marshall x Placa vibratória

Dist. Mínima entre as superfícies dos agregados examinados = 0.1 mm					
Tamanho mínimo dos agregados examinados = 1.18 mm					
		Nº de Z.C.	Comp. Total das Z.C. (mm)	AAA (°)	ΔC
Compactação placa vibratória	Sessões longitudinais	1.044	1.088	73,7	9,94%
	Sessões transversais	816	1.068	77,0	13,09%
Compactação Marshall	Sessões longitudinais	1.036	1.132	73,6	5,42%
	Sessões transversais	1.705	2.101	77,7	15,17%

Z.C. = Zonas de contato; AAA (°) Média do ângulo absoluto; Δc Vetor magnitude

A partir da Tabela 4.12, é possível observar que os valores obtidos na compactação Marshall apresentaram 889 zonas de contato na transversal a mais do que a feita em campo. Concluindo-se que a compactação Marshall tem uma formação do esqueleto mais distribuída, o que indica uma maior eficiência na capacidade de transferência de cargas. A eficiência da transferência de

carga também é representada como a média do ângulo absoluto da orientação das zonas de contato (AAA), valores próximos de 90° graus, que no caso não apresentou grande variação.

Os resultados de vetor magnitude apresentaram valores baixos, indicando uma maior anisotropia da mistura, ou seja, as partículas estão de forma aleatória com respeito às faces analisadas. Os valores apresentados seguiram as observações feitas por (Safidmazgi, 2011).

Os valores apresentados a seguir são divididos por grupos de segregação, os valores das colunas de cor cinza, são os valores obtidos pelas amostras moldadas em campo, os valores coloridos são para o tipo de compactação analisada, que para as Figuras 4.20 e 4.21 são para a compactação Marshall.

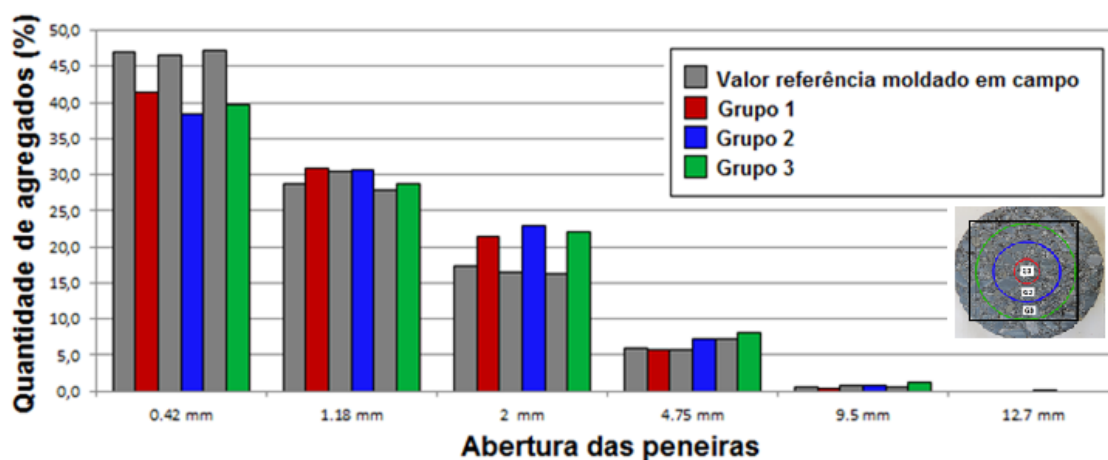


Figura 4.20 – Segregação radial (Marshall x Placa vibratória)

A partir da Figura 4.20 é possível observar uma diminuição na quantidade de agregados de menor dimensão nos grupos, provavelmente devido a perda de finos na extração do ligante, como já mencionado em itens anteriores. Porém, o comportamento das colunas, indica um comportamento parecido, ou seja, a quantidade de agregados de mesma dimensão se encontra em porcentagens parecidas.

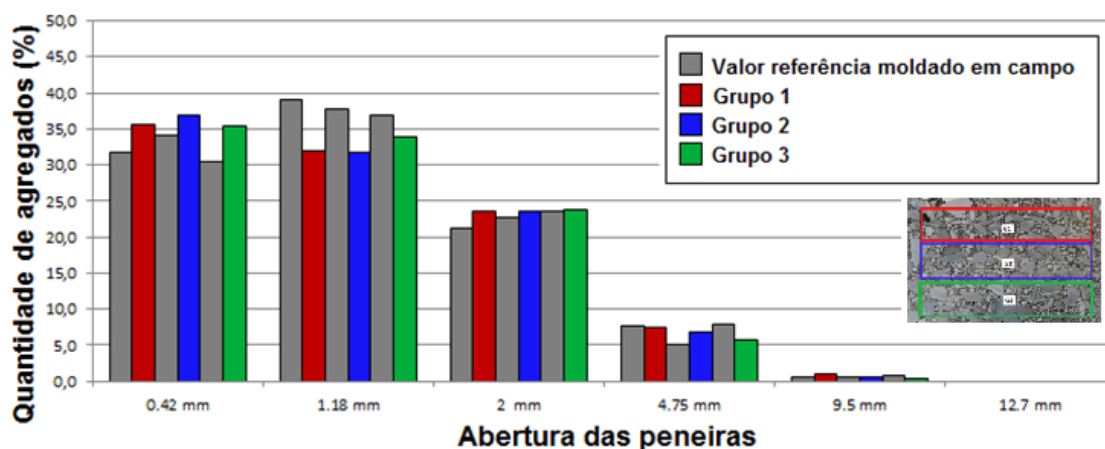


Figura 4.21 - Segregação vertical (Marshall x Placa vibratória)

A partir dos valores de segregação apresentados por grupos, tanto nos cortes longitudinais como nos cortes transversais (Figura 4.20 e 4.21), é possível concluir que as amostras não tiveram segregação e apresentaram comportamentos parecidos em relação à distribuição da compactação feita em campo, apesar de quantidade de agregados por grupo ser diferenciada, devido à quantidade de agregados por fração granulométrica, também ser diferenciada.

COMPACTAÇÃO SUPERPAVE

As análises feitas com compactador Superpave seguiram as mesmas considerações feitas anteriormente com a compactação Marshall.

Tabela 4.13 - Estrutura interna da compactação Superpave x Placa vibratória

Dist. Mínima entre as superfícies dos agregados examinados = 0.1 mm					
Tamanho mínimo dos agregados examinados = 1.18 mm					
		Nº de Z.C.	Comp. Total das Z.C. (mm)	AAA (°)	Δ_c
Compactação placa vibratória	Sessões longitudinais	1.044	1.088	73,7	9,94%
	Sessões transversais	816	1.068	77,0	13,09%
Compactação Superpave	Sessões longitudinais	775	781	71,8	4,36%
	Sessões transversais	1.705	1.756	76,4	20,19%

Z.C. = Zonas de contato; AAA (°) Média do ângulo absoluto; Δ_c Vetor magnitude

A partir da Tabela 4.13, é possível observar que a compactação Superpave apresentou o mesmo valor de número de zonas de contato da compactação Marshall, apesar do valor ser igual, a criação do esqueleto mineral foi menos eficiente pelo fato do comprimento das zonas de contato ser menor. Com relação aos valores do ângulo absoluto e vetor magnitude, os valores não obtiveram grandes variações, e representam uma boa formação do esqueleto mineral.

Os valores apresentados a seguir são divididos por grupos de segregação, os valores das colunas de cor cinza, são os valores obtidos pelas amostras moldadas em campo, os valores coloridos são para o tipo de compactação analisada, que para as Figuras 4.22 e 4.23 são para a compactação Superpave.

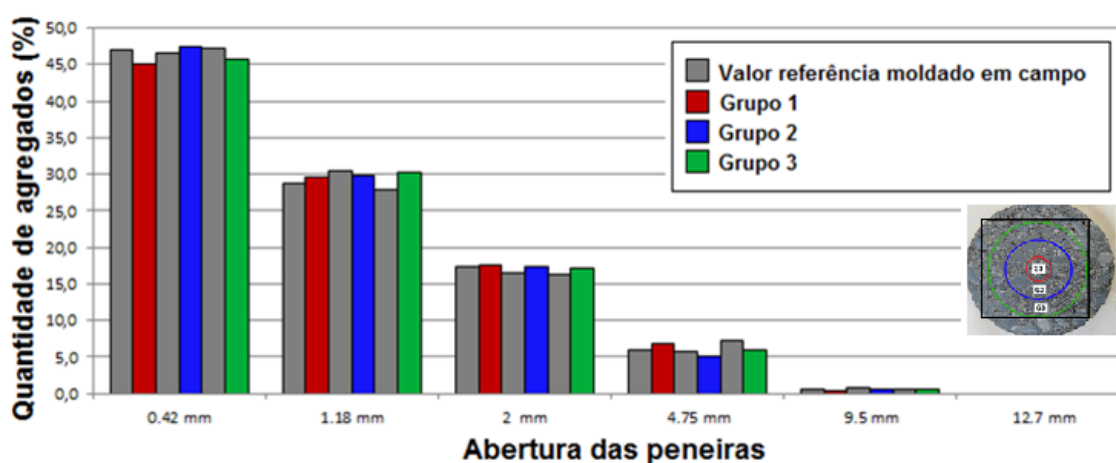


Figura 4.22 - Segregação radial (Superpave x Placa vibratória)

A partir da Figura 4.22, é possível concluir que a compactação Superpave apresentou valores muito próximos de quantidade de agregados por grupo de segregação da mistura, para todas as frações granulométricas.

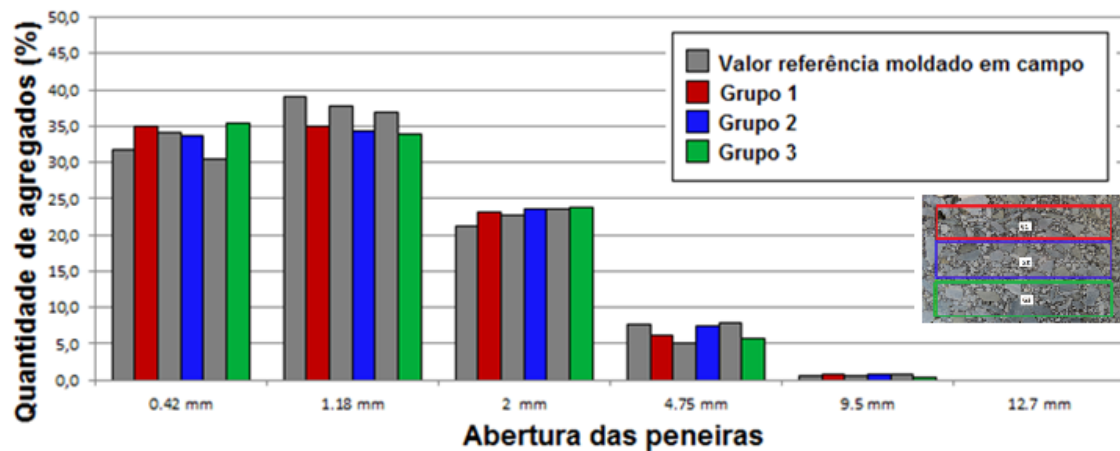


Figura 4.23 - Segregação vertical (Superpave x Placa vibratória)

A partir da Figura 4.23 é possível observar que o comportamento para os agregados distribuídos no corte transversal, também apresentam valores próximos das realizadas em campo.

5. CONCLUSÕES

Esta pesquisa foi realizada com objetivo de quantificar, quais foram às mudanças que ocorreram nas propriedades de forma dos agregados, e na formação da estrutura interna das misturas asfálticas, após diferentes tipos de compactação. As principais conclusões retiradas do trabalho foram divididas para cada metodologia empregada, e são apresentadas a baixo:

Quebra das partículas após compactação:

- A partir dos resultados obtidos de quebra dos agregados, é possível concluir que a compactação Marshall é a mais nociva em relação às compactações analisadas, a nova metodologia proposta pelo programa SHRP que resultou na modelagem dos corpos de prova por amassamento (Superpave), apresentaram valores mais próximos dos agregados em estado natural, tendo a maior representatividade dos materiais especificados em fase de projeto. Caso o uso da metodologia Marshall continue sendo usada, sugere-se uma modificação da curva granulométrica, prevendo a quebra de partículas, a fim de manter as características da mistura, e por consequência, manter comportamentos previstos na fase de dimensionamento do pavimento.

- Valores de quebra dos grãos elevadas geram uma quantidade de finos maior na mistura, esse fator corrobora para o aumento de fissuras no pavimento, que podem ocorrer devido à quantidade excessiva de finos na mistura. Não foi possível observar o aumento na quantidade de finos, provavelmente devido a perda na retirada do ligante asfáltico.

Forma, angularidade e textura superficial:

- Parâmetros como Forma 2D, devem ser levados em consideração na fase de escolha de materiais para o pavimento, uma vez que, agregados

com valores elevados de forma, caracterizados como alongados, irão sofrer variação de forma durante a compactação passando a ser mais circulares, que por sua vez, modifica a curva granulométrica inicialmente especificada.

- Os valores de angularidade das misturas asfálticas tendem a aumentar após as compactações, concluindo-se que agregados com características de angularidade baixa, podem vir a apresentar valores de angularidade satisfatória após os processos de compactação, melhorando o intertravamento dos agregados, influenciando na resistência à deformação permanente das misturas asfálticas.

- Os valores de textura superficial tendem a diminuir provavelmente devido as compactações, mas também devem ser levadas em consideração alterações na superfície do agregado, uma vez que, a camada de ligante preenche espaços vazios da microestrutura do agregado.

Estrutura interna das misturas asfálticas:

- Os valores de quantidade de zonas de contato apresentaram valores iguais para as compactações Superpave e Marshall, em relação à realizada em campo (placa vibratória), concluindo-se que para as duas metodologias, a estruturação interna da mistura apresenta valores satisfatórios.

- As compactações apresentaram valores satisfatórios com respeito à segregação da mistura, apresentando a mesma quantidade de partículas de mesma dimensão por grupo de imagem na mistura. Apesar de a compactação Marshall apresentar valores diferenciados de quantidade de agregados por grupo de segregação, devido à provavelmente quebra das partículas, o comportamento do gráfico continua parecido, não podendo concluir qual compactação melhor representa as empregadas em campo.

Como conclusão principal do trabalho, as compactações têm influência maior na forma, angularidade e textura superficial das partículas, tendo grande ocorrência de quebra devido aos tipos de compactação aplicados nos agregados. Quanto à organização do esqueleto mineral, as misturas não apresentaram grandes variações, comparado com amostra feita em campo. De uma forma geral a compactação Superpave representa com mais precisão as amostras moldadas em campo, pelo fato de não apresentar grandes variações em relação à forma dos agregados em estado natural.

6. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como principais sugestões para o prosseguimento do trabalho propõem-se:

- Avaliar a mudança no comportamento mecânico das misturas asfálticas, e correlacionar com resultados de caracterização obtidos através do processamento digital de imagens.
- Repetição dos procedimentos empregados, com amostras feitas em condições reais de obra e com uma quantidade de número de amostras maior, para obtenção de parâmetros estatísticos mais precisos.
- Avaliar a mudança nas propriedades de forma, com agregados de diferentes origens mineralógicas, através do processamento digital de imagens.
- O uso de novos equipamentos de captura de imagens mais sofisticados, utilizando métodos não destrutivos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICOS

_ ASTM C 1252-98. Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading).

_ DNER-ME 035/98: Agregados-determinação da abrasão Los Angeles.

_ASTM D 113-07: Standard Test Method for Ductility of Bituminous Materials

_ASTM D 2872-12: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test).

_ASTM D 36-14: Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus).

_ASTM D 4402-13: Viscosity Determinations of Unfilled Asphalts Using the Brookfield Thermosel Apparatus.

_ASTM D 5-13: Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials.

_ASTM D 5821-95. Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate.

_ASTM D 70-09 e1: Standard Test Method for Density of Semi Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method).

_ASTM D 92-12: Standard Test Method for Flash and Fire points by Cleveland Open Cup Tester.

_DNER – ME 043/95: Misturas betuminosas a quente – Ensaio Marshall.

_DNER – ME 054/97: Equivalente de areia

_DNER 043/95: Misturas Betuminosas a quente – Ensaio Marshall.

_DNER 117/94: Misturas Betuminosas – Determinação da densidade aparente.

_DNER PRO 199/96: Redução de amostra de campo de agregados para ensaios de laboratório.

_DNER-ME 083/98: Agregados – análise granulométrica.

_DNER-ME 086/94: Agregado – determinação do índice de forma

_DNIT 031/2006: Pavimentos flexíveis concreto asfáltico – Especificação de Serviço.

_NBR 12253: Solo – Cimento – Dosagem para emprego como camada de Pavimento. Rio de Janeiro, 1992.

_NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO T 312 (2016) Preparing Hot-Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor

AASHTO TP 4 (2000) Standard Method for Preparing and Determining the Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor.

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Al Rousan, T. M. (2004) Characterization of Aggregate Shape Properties Using a Computer Automated System. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil, Texas A&M University, College Station, Texas, USA, 211 p.

ASTM – American Society for Testing Materials.

Bernucci, L. L. B., Motta, L. M. G., Ceratti, J. A., P. Soares, J. B. (2006). Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro, RJ, 501 p.

Bessa, I.S. (2012). Avaliação do processamento digital de imagens como ferramenta para caracterização de agregados e misturas asfálticas.

Dissertação de Mestrado, Centro de Tecnología, Departamento de Engenharia de Transportes, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, 154p.

Castelo Branco, V. T. F., Masad, E., Little, D. N., Soares, J. B., Motta, L. M. G. (2006). Caracterização de Forma, Angularidade e Textura de Agregado de Brita Granítica e Escórias de Aciaria Usando o Aggregate Imaging Measurement System (AIMS). In: XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Brasília, DF.

Consuegra, A., Little, D. N., Von Quintos, H., Burati, J. (1989). Comparative Evaluation of Laboratory Compaction Devices Based on Their Ability to Produce Mixtures with Engineering Properties Similar to Those Produced in the Field. Transportation Research Record 1228, TRB, National Research Council, Washington, DC, 80-87.

Cunha, M. B. (2004). Avaliação do Método Bailey de Seleção Granulométrica de Agregados para Misturas Asfálticas. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 105 p.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de transportes.

Furlan, A. P., Gouveia, L. T. Fabri, G. T. P., Fernandes JR. J. L. (2004). Influência de Características dos Agregados na Susceptibilidade a Dano por Umidade de Misturas Asfálticas. 17º Encontro de Asfalto – IBP (Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás), Rio de Janeiro, RJ, 1: 1 – 8.

Gómez, A.M. J. (2011). Estudo Experimental de um Resíduo de Construção e Demolição (RCD) Para Utilização Em Pavimentação. Dissertação de Mestrado, Publicação G. DM-196/11, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 123p.

Gómez, A.M. J. (2016). Comportamento Mecânico de um Agregado Reciclado a Partir de Resíduos de Construção e Demolição Submetido a Carregamentos

Cíclicos. Tese de Doutorado, Publicação GTD-117/16, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 185 p.

Harman, T., Bukowski, J.R., Moutier, F., Huber, G., McGennis, R. (2002). The history and future challenges of gyratory compaction 1939 to 2001. ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, Washington, USA, 81 p.

Hunter, A. E.; Airey, G. D.; Collop, A. C. (2004) Aggregate Orientation and Segregation in Laboratory-Compacted Asphalt Samples, Transportation Research Record, TRB, No. 1891, TRB, 8-15.

Iwama, M. (2009). Influence of Specimen Size and Orientation on the Mechanical Properties of Laboratory Compacted Asphalt Specimens. Dissertação de Mestrado, Department of Civil Engineering Nottingham Transportation Centre, The University of Nottingham, Nottingham, UK, 249 p.

Kennedy, T.W., Huber, G.A., Harrigan, E.T., Hughes C.S., Cominsky, R.J., Von Quintus, H., Moulthrop, J.S. (1994). Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of the SHRP Asphalt Research Program. SHRP-A-410. Strategic Highway Research Program, National Council, Washington, DC.

Mahmoud, E., Kutay, E., Bahia, H (2010). Digital Image Analysis System (<http://uwmarc.org/rilem-taskgroup2.html>): Standard Method for Determining Aggregate Structure in Asphalt Mixes by Means of Planar Imaging – Draft Procedure.

Motta, L.M.G (1991). Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas. Tese de Doutorado, Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 366 p.

Moura, E. Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório. ed.rev. – São Paulo, 2010.

Nascimento, L. A. H. (2008) Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, RJ.

Obando, J. R. A. (2012). Uso de Geossintéticos como reforço de revestimentos em pavimentação. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-212/12, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 99 p.

Quiñones, F.S. (2014). Aplicabilidade de resíduos reciclados da construção e demolição como agregados em misturas asfálticas. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-099/14, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 168 p.

Sousa, J. B., Harvey, J., Painter, L., Deacon, J. A., Monismith, C. L. (1991). *Evaluation of Laboratory Procedures for Compacting Asphalt – Aggregate Mixtures, Report No. SHRP-A-UWP=91-523*, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC.

Souza, L.T. (2009). Investigation of Aggregate Angularity Effects on Asphalt Concrete Mixture Performance Using Experimental and Virtual Asphalt Samples. Dissertação de Mestrado, UNL, Lincoln, NE, 260 p.

Tashman, L., Masad, E., Peterson, B., Saleh, H. (2001). Internal Structure Analysis of Asphalt Mixes to Improve the Simulation of Superpave Gyratory to Field Conditions. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 70, 605-655.

Tashman, L.; Masad, E.; Little, D.; Hussein, Z. (2004). A Microstructure-Based Viscoplastic Model for Asphalt Concrete. *International Journal of Plasticity*, 21: 1659-1685.

Vasconcelos, K.L. (2004). Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Quente Dosadas pelas Metodologias Marshall e Superpave com Diferentes Granulometrias. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em

Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE,
149 fl.