

Cristine Yohana Ribas

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO MÉTODO DE
COMPACTAÇÃO NA MACROESTRUTURA DE MISTURAS
ASFÁLTICAS DENSAS UTILIZANDO O PROCESSAMENTO
DIGITAL DE IMAGENS**

Dissertação submetida ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade
Federal de Santa Catarina para a
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Liseane
Padilha Thives

Florianópolis
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Ribas, Cristine Yohana
AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO MÉTODO DE COMPACTAÇÃO NA
MACROESTRUTURA DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS UTILIZANDO O
PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS / Cristine Yohana Ribas ;
orientadora, Liseane Padilha Thives - Florianópolis, SC,
2016.

251 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil.

Inclui referências

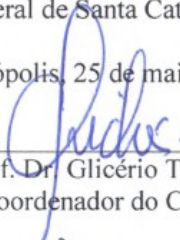
1. Engenharia Civil. 2. Pavimento flexível. 3. Mistura
asfáltica densa. 4. Métodos de compactação. 5.
Processamento digital de imagens. I. Thives, Liseane
Padilha. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Cristine Yohana Ribas

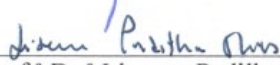
**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO MÉTODO DE
COMPACTAÇÃO NA MACROESTRUTURA DE MISTURAS
ASFÁLTICAS DENSAS UTILIZANDO O PROCESSAMENTO
DIGITAL DE IMAGENS**

Dissertação julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 25 de maio de 2016.

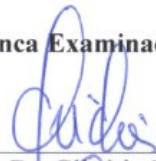


Prof. Dr. Glicério Trichês
Coordenador do Curso

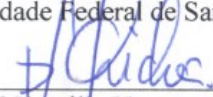


Prof.^a Dr.^a Liseane Padilha Thives
Orientadora

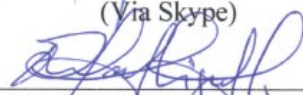
Banca Examinadora:



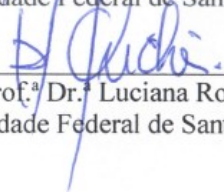
Prof. Dr. Glicério Trichês
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof.^a Dr.^a Kamilla Vasconcelos Savasini
Universidade de São Paulo
(Via Skype)



Prof. Dr. Rafael Augusto dos Reis Higashi
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof.^a Dr.^a Luciana Rohde
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho aos meus pais,
Júlio e Dorotéa, e à minha irmã,
Luize.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, pela sabedoria e por me iluminar nesta caminhada.

Aos meus pais Júlio e Dorotéa e a minha irmã Luize, pelo incentivo, pelo apoio, pela dedicação e pelo carinho na realização deste trabalho. Obrigada por incentivarem a busca por novos conhecimentos e estarem sempre torcendo por mim!

À professora orientadora Liseane pela oportunidade de realizar mais um trabalho juntas e por ter acreditado no meu potencial. Obrigada pela troca de conhecimentos e experiências, atenção, preocupação, paciência, disponibilidade irrestrita e confiança. Sem a sua dedicação e apoio este trabalho não teria sido possível.

Aos professores Glicério, Kamilla, Rafael e Luciana, por terem aceitado o convite de participar da banca examinadora. Obrigada pelas sugestões que contribuíram para a finalização deste trabalho.

Aos professores, Glicério e João, agradeço pelo material disponibilizado, pelos esclarecimentos quanto ao trecho experimental e pelo apoio e auxílio prestados no programa experimental deste trabalho. Obrigada pela disponibilização de dados e materiais, prestatividade e colaboração.

À professora Luciana, pelo conhecimento compartilhado e pela troca de experiências. Agradeço a disponibilidade em ajudar e tirar dúvidas no decorrer do desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Celso, da Engenharia de Materiais, pela solicitude e disponibilidade. Agradeço por ter sido bem recebida e pelo conhecimento proporcionado que foi a base para uma área tão desconhecida como a análise de imagens.

Ao professor Hussain Bahia e equipe, da Universidade de Wisconsin, pela disponibilização do *software* IPAS-2.

À professora Verônica e ao Iuri, pela ajuda virtual na análise de imagens de misturas asfálticas.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pela dedicação, pelos conhecimentos transmitidos e por terem contribuído para a minha formação.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Civil, em especial, Marineia e Priscila, pelo atendimento nestes anos de convívio.

À Rede Temática de Tecnologia do Asfalto, da Petrobrás, pela capacitação da infraestrutura do Laboratório de Pavimentação da UFSC.

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil e funcionários, por terem disponibilizado o espaço e equipamentos para a realização de alguns ensaios.

Ao Roberto Faccio, pela arte e pela precisão de ter confeccionado os utensílios de madeira utilizados neste trabalho.

Aqueles que não só me ajudaram no programa experimental, mas também foram as minhas melhores companhias: compartilharam comigo as dificuldades e ansiedades, vibraram em cada conquista e, quando tudo parecia não ter mais solução, ensinaram-me o valor da persistência. Douglas, Dário, Mayara, Moisés, Quintero, Emmanuelle e minha orientadora Liseane, obrigada por tudo!

Aos colegas e amigos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil que fizeram parte desta caminhada, pela certeza de que aprendemos uns com os outros, pelo apoio recíproco, pela companhia de todos os dias. Adosindro, Alverlando, Carlos Quintero, Emmanuelle, Gabriela, Jaqueline, Juliana, Keyla, Luiz Henrique, Matheus, Mayara, Moisés, Pojucan, Ramon, Sárvia, Sérgio, Stephanie e Vanesa: Cada um de vocês fez parte, na sua singularidade, do meu crescimento pessoal e profissional nesta trajetória. Sucesso a todos!

Aos membros do Grupo Rodovias Verdes e do Laboratório de Pavimentação da UFSC, pela ajuda no programa experimental. Ao laboratorista Jonathan, e aos bolsistas de iniciação científica Emmanuelle, Fernanda e Yan, pelo auxílio, por compartilharem as experiências do laboratório, pela disponibilidade e pelos momentos de descontração.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pelo auxílio financeiro, através da bolsa de mestrado.

Ao Programa de Educação Tutorial do Curso de Engenharia Civil e ao professor Cláudio, pelo companheirismo e pelo apoio. Obrigada por sempre me acolherem tão bem.

Ao Guilherme e ao Lucas, pelo apoio tecnológico prestado, pelas opiniões e pela disponibilidade.

Aos meus familiares e amigos, por terem sempre me apoiado em minhas decisões e por confiarem em mim. Obrigada pelo carinho, incentivo e apoio mesmo quando tive que estar ausente de momentos especiais.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a concretização deste trabalho. *“Aqueles que passam por nós, não vão sós, não nos deixam sós. Deixam um pouco de si, levam um pouco de nós”*. Muito obrigada!

“Pavement engineering is the art of molding materials that we do not wholly understand, into shapes we cannot precisely analyze, so as to withstand forces we cannot assess, in such a way that the community at large has no reason to suspect our ignorance.”

Gregory Harder

RESUMO

Os pavimentos rodoviários devem, durante a vida útil, apresentar boas condições de rolamento e proporcionar conforto e segurança aos que neles trafegam. Para cumprir a função, a etapa da compactação exerce um papel fundamental, especialmente a compactação laboratorial, a partir da qual são estabelecidas as propriedades de referência para a compactação em campo e são realizados os ensaios de previsão de desempenho mecânico. No Brasil, o método de dosagem Marshall, em que a compactação ocorre por impacto, é o mais difundido. Contudo, não é apropriado por não simular o que ocorre no campo. No método de dosagem *Superior Performance Asphalt Pavement*, a compactação é realizada num compactador giratório e a densificação do material ocorre por amassamento. Quando comparado ao método Marshall, o compactador giratório é capaz de produzir corpos de prova mais similares aos obtidos em campo. Entretanto, ainda há uma divergência em relação ao campo quanto à macroestrutura (distribuição dos agregados na matriz de agregados finos), à distribuição do volume de vazios e ao desempenho mecânico. Com o objetivo de certificar que compactação laboratorial seja representativa do que ocorre no campo, este trabalho propôs-se a investigar e avaliar a compactação laboratorial, com ênfase no Compactador Giratório Superpave. Para tanto, foram compactadas misturas asfálticas com diferentes ângulos de inclinação do eixo de rotação do equipamento ($0,75^\circ$; 1° ; $1,25^\circ$; $1,5^\circ$ e $1,75^\circ$) tendo em vista que este é o parâmetro que mais influencia a organização do esqueleto mineral. Também foram analisadas misturas asfálticas produzidas no compactador Marshall e na mesa compactadora tipo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*. Como a macroestrutura da mistura asfáltica durante a compactação em laboratório pode ser diferente daquela obtida em campo, foram extraídos corpos de prova compactados em campo por equipamentos de compactação (rolos de chapa e pneumáticos). A análise, das diferentes formas de compactação (impacto, amassamento e campo), foi realizada por meio do Processamento Digital de Imagens com o uso do *software* IPAS-2. As diferenças no esqueleto mineral induzidas pelos diferentes modos de compactação (Marshall, giratório, mesa compactadora e rolo compactador em campo) foram descritas em função da orientação das partículas, das zonas de contato e da segregação. A orientação interna e o intertravamento dos grãos contribuem significativamente para a determinação das propriedades mecânicas da mistura compactada. A

comparação com a compactação de campo torna-se um fator importante no desempenho final e deve, portanto, ser avaliada. Ao confirmar que a compactação laboratorial seja mais representativa possível do campo, pode-se prever de modo mais realista o desempenho da mistura asfáltica minimizando o efeito da variável compactação. Como resultado, em geral, o compactador Marshall e o Compactador Giratório Superpave (ângulos de inclinação do eixo de rotação $0,75^\circ$, $1,25^\circ$ e 1°), nesta ordem, foram os mais representativos do campo quanto aos parâmetros macroestruturais. Contudo, o compactador Marshall foi o que apresentou maior variabilidade dos resultados. A representatividade da compactação do campo não é função apenas de um parâmetro macroestrutural, mas, de um conjunto de parâmetros e das características de desempenho mecânico do material. Considerando as análises da compactação no CGS e da macroestrutura, o CGS com ângulo de inclinação do eixo $1,25^\circ$ é o que mais se aproxima do que ocorre no campo.

Palavras-chave: Pavimento flexível. Mistura asfáltica densa. Métodos de compactação. Processamento digital de imagens.

ABSTRACT

Paved roads should present proper driving conditions during their lifespan, providing comfort and safety to trafficking vehicles. In order to fulfill this task, compaction plays a fundamental role particularly in laboratory stages, from which reference aspects for in-situ compaction are established, and mechanical performance and prediction assays are done. The Marshall method of compaction through impact is the most widely used in Brazil. However, it is not appropriate as it does not emulate what occurs in location. The Superior Performance Asphalt Pavement method involves compaction through a gyratory compactor, in which the material is kneaded until made denser. When compared to the Marshall method, a gyratory compactor, can produce test bodies that are more similar to what is obtained in situ. However, macrostructure (distribution of aggregates in fine aggregate mixture), air voids distribution, and mechanical performance still diverge from the field paving. In order to ensure that laboratory compaction represents what occurs in field, this paper aims to investigate and evaluate laboratory compaction with emphasis on the Superpave Gyratory Compactor. To this end, asphalt mixtures were compacted with different slopes in the gyratory angle of the device (at 0.75°; 1°; 1.25; 1.5°; and 1.75°) considering that this parameter influences most on the organization of the mineral skeleton. Asphalt mixtures produced with a Marshall compactor and LCPC compactor (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) were also analyzed. Since the macrostructure of laboratory asphalt mixtures can differ from field versions, compacted test bodies were extracted from the field using compaction devices such as pneumatics and sheet rolls. Analyses of the various compaction forms (impact, kneading, and field) were performed through Digital Image Processing using IPAS-2 software. Differences in mineral skeleton induced by various compaction forms (Marshall, gyratory, LCPC, and in-situ roller compactor) were described as a function of particle orientation, contact zones, and segregation. Internal orientation and grain interlocking significantly corroborate to determine the mechanical properties of a given compacted mixture. Comparison with in-situ compaction is an important factor to consider in their final performance. After confirming that laboratory compaction is the closest possible representation of field situations, it is possible to provide more realistic predictions of asphalt mixture performance, thus minimizing the effect of varying compaction. Overall results indicate that the Marshall and

Superpave Gyrotory Compactor (with rotation slope axes of 0.75° , 1.25° , and 1°) were, in this order, the most representative versions of in-situ asphalt in relation to macrostructural parameters. However, the Marshall compactor presented greater variability in results. The representability of in situ compaction is not just a function of a single macrostructural parameter, but of a set of parameters and mechanical performance characteristics of materials. Considering the analysis of compaction in the SGC and the macrostructure, the SGC rotation slope axes 1.25° is the closest to the field.

Keywords: Flexible pavement. Dense asphalt mixture. Compaction methods. Digital Image Processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Escalas de representação da estrutura interna de misturas asfálticas.....	35
Figura 2 - Estrutura do pavimento flexível (corte transversal).....	39
Figura 3 - Diagrama de constituição de uma mistura asfáltica.....	40
Figura 4 - Rolos para compactação da mistura asfáltica em campo.....	43
Figura 5 - Compactador Marshall automático.....	45
Figura 6 - Princípio de atuação do compactador giratório.....	46
Figura 7 - Prensa giratória do Texas.....	49
Figura 8 - Compactador giratório do USACE.....	50
Figura 9 - Compactador Giratório Superpave.....	52
Figura 10 - Ilustração esquemática do compactador giratório Superpave (CGS).....	53
Figura 11 - Rolo liso compactador.....	54
Figura 12 - Mesa compactadora LCPC.....	54
Figura 13 - Equipamento de compactação por rolagem.....	55
Figura 14 - Compactador kneading.....	56
Figura 15 - Compactador vibratório.....	57
Figura 16 - Compactador Presbox.....	57
Figura 17 - Forças atuantes em um molde com ângulo inclinação do eixo de rotação α	63
Figura 18 - Curva de compactação típica obtida do CGS.....	65
Figura 19 - Curvas de densificação de duas misturas com estruturas minerais distintas.....	66
Figura 20 - Representação gráfica dos índices de energia.....	67
Figura 21 - Representação do Locking point 3-2-2.....	69
Figura 22 - Representação das curvas granulométricas pelo Superpave.....	70
Figura 23 - Arranjo de agregados cúbicos e de agregados arredondados.....	71
Figura 24 - Ângulo de orientação horizontal do agregado.....	75
Figura 25 - Orientação das partículas do agregado em uma seção circular.....	76
Figura 26 - Linhas de contato e orientação em uma mistura asfáltica.....	78
Figura 27 - Contato entre agregados.....	78
Figura 28 - Grupos de segregação radial e vertical.....	80
Figura 29 - Histograma de frequências para análise da segregação.....	81
Figura 30 - Comparação da orientação dos agregados nas seções horizontais e verticais.....	84
Figura 31 - Vetor magnitude de orientação dos agregados.....	84

Figura 32 - Ângulo médio absoluto de orientação dos agregados	85
Figura 33 - Número de zonas de contatos	85
Figura 34 - Ângulo médio absoluto da direção dos contatos	86
Figura 35 - Vetor magnitude da distribuição dos contatos.....	86
Figura 36 - Efeito da anisotropia na relação tensão-deformação	89
Figura 37 - Efeito do esforço e da temperatura de compactação nos parâmetros da estrutura interna.....	90
Figura 38 - Segregação radial para cada mistura	93
Figura 39 - Seccionamento vertical dos corpos de prova.....	94
Figura 40 - Ângulo médio de orientação dos agregados para diferentes compactadores	96
Figura 41 - Vetor magnitude dos corpos de prova Marshall.....	96
Figura 42 - Vetor magnitude dos corpos de prova CGS	97
Figura 43 - Vetor magnitude para diferentes compactadores.....	98
Figura 44 - Imagem de mistura asfáltica obtida por scanner	103
Figura 45 - Imagem de mistura asfáltica obtida por câmera fotográfica	104
Figura 46 - Escaneamento das imagens por tomografia computadorizada de raios-X	105
Figura 47 - Imagem de mistura asfáltica obtida por tomografia computadorizada de raios-X.....	105
Figura 48 - Software de processamento e análise de imagens IPAS-2	107
Figura 49 - Análise do número ótimo de secções (número de imagens versus ISI).....	109
Figura 50 - Análise do número ótimo de seções (número de imagens versus coeficiente de variação).....	109
Figura 51 - Fluxograma das etapas do programa experimental	116
Figura 52 - Fluxograma da dosagem da mistura asfáltica.....	119
Figura 53 - Compactador Giratório Superpave.....	120
Figura 54 - Compactador Marshall automático (LAB PAV/UFSC)...	122
Figura 55 - Compactador Giratório Superpave (LAB PAV/UFSC) ...	123
Figura 56 - Fluxograma da moldagem dos corpos de prova no CGS .	125
Figura 57 - Mesa Compactadora (LAB PAV/UFSC)	128
Figura 58 - Execução de revestimento asfáltico convencional	129
Figura 59 - Corpos de prova e placas extraídos do trecho experimental	130
Figura 60 - Etapas para a análise de imagens.....	131
Figura 61 - Desagregação da amostra após o corte.....	132
Figura 62 - Seccionamento dos corpos de prova Marshall	133
Figura 63 - Seccionamento dos corpos de prova moldados no CGS ..	133

Figura 64 - Seccionamento horizontal das amostras do trecho experimental.....	134
Figura 65 - Seccionamento vertical das placas do trecho experimental	134
Figura 66 - Seccionamento horizontal e vertical das placas de concreto asfáltico.....	135
Figura 67 - Moldes de madeira utilizados na serragem dos corpos de prova cilíndricos	135
Figura 68 - Corte de corpos de prova cilíndricos na serra de disco diamantado.....	137
Figura 69 - Fluxograma do processo de análise da imagem no IPAS-2	140
Figura 70 - Processamento Digital de Imagem ilustrado realizado pelo IPAS-2	141
Figura 71 - Ângulo de orientação horizontal do agregado	142
Figura 72 - Orientação das partículas do agregado em uma seção circular	143
Figura 73 - Representação pontos/zonas de contato.....	143
Figura 74 - Representação comprimento da zona de contato.....	144
Figura 75 - Representação esquemática do ângulo de orientação do contato.....	144
Figura 76 - Histograma de frequências para análise da segregação	145
Figura 77 - Grupos de segregação radial e vertical	146
Figura 78 - Equipamento Orniéreur	147
Figura 79 - Ensaio de deformação permanente	148
Figura 80 - Curva granulométrica	152
Figura 81 - Agregados utilizados na produção da mistura asfáltica....	153
Figura 82 - Viscosidade aparente versus temperatura	154
Figura 83 - Curvas de compactação: Altura do corpo de prova versus número de giros ($\alpha=0,75^\circ$)	159
Figura 84 - Curvas de compactação: Altura do corpo de prova versus número de giros ($\alpha=1^\circ$).....	161
Figura 85 - Curvas de compactação: Altura do corpo de prova versus número de giros ($\alpha=1,25^\circ$)	164
Figura 86 - Curvas de compactação: Altura do corpo de prova versus número de giros ($\alpha=1,5^\circ$).....	166
Figura 87 - Curvas de compactação: Altura do corpo de prova versus número de giros ($\alpha=1,75^\circ$)	169
Figura 88 - Comparação dos parâmetros de compactação obtidos no CGS.....	170

Figura 89 - Comparação ângulo de orientação horizontal dos agregados nas seções verticais	189
Figura 90 - Comparação vetor magnitude dos agregados nas seções verticais.....	190
Figura 91 - Comparação ângulo de orientação horizontal dos agregados nas seções horizontais.....	191
Figura 92 - Comparação ângulo de orientação radial dos agregados nas seções horizontais.....	192
Figura 93 - Comparação vetor magnitude dos agregados nas seções horizontais	192
Figura 94 - Comparação ângulo de orientação horizontal dos agregados nas seções verticais e horizontais.....	193
Figura 95 - Comparação vetor magnitude dos agregados nas seções verticais e horizontais	194
Figura 96 - Comparação zonas de contatos nas seções verticais	196
Figura 97 - Comparação comprimento de contatos nas seções verticais	197
Figura 98 - Comparação ângulo de orientação dos contatos nas seções verticais.....	197
Figura 99 - Comparação vetor magnitude dos contatos nas seções verticais.....	198
Figura 100 - Comparação zonas de contatos nas seções horizontais ..	199
Figura 101 - Comparação comprimento de contatos nas seções horizontais	200
Figura 102 - Comparação vetor magnitude dos contatos nas seções horizontais	201
Figura 103 - Comparação vetor magnitude dos contatos nas seções verticais e horizontais	202
Figura 104 - Comparação dos índices de segregação vertical nas seções verticais.....	203
Figura 105 - Segregação vertical das amostras do trecho experimental (1ª camada, CVL)	204
Figura 106 - Segregação vertical das amostras do trecho experimental (1ª camada, CVT)	205
Figura 107 - Segregação vertical das amostras do trecho experimental (2ª camada, CVL)	205
Figura 108 - Segregação vertical das amostras do trecho experimental (2ª camada, CVT)	206
Figura 109 - Comparação dos índices de segregação radial nas seções horizontais	206

Figura 110 - Restrições observadas quanto aos moldes - corpo de prova Marshall	210
Figura 111 - Restrições observadas quanto aos moldes - corpo de prova CGS.....	210
Figura 112 - Restrições observadas quanto aos moldes - amostras mesa compactadora	211
Figura 113 - Restrições observadas quanto à granulometria e à forma dos agregados.....	212
Figura 114 - Imagens da primeira camada de revestimento asfáltico (cortes verticais).....	213
Figura 115 - Desempenho a deformação permanente de placas moldadas em laboratório	214
Figura 116 - Desempenho a deformação permanente de placas extraídas do trecho experimental.....	214

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Intervalo de volume de vazios para diferentes faixas granulométricas.....	42
Tabela 2 - Evolução do compactador giratório	48
Tabela 3 - Número de giros especificados pela dosagem Superpave....	52
Tabela 4 - Valores de vetor magnitude e ângulo de orientação.....	88
Tabela 5 - Valores de vetor magnitude (seções horizontais e verticais)	91
Tabela 6 - Número de pontos de contato.....	92
Tabela 7 - Ângulo médio absoluto de orientação dos agregados (corpos de prova cilíndricos)	95
Tabela 8 - Ângulo médio absoluto de orientação dos agregados (placas Presbox)	95
Tabela 9 - Análise de diferentes métodos de compactação	98
Tabela 10 - Síntese dos estudos sobre análise da estrutura interna de misturas asfálticas.....	99
Tabela 11 - Corpos de prova para caracterização da estrutura interna	126
Tabela 12 - Fracionamento dos agregados para a composição granulométrica	151
Tabela 13 - Curva granulométrica: porcentagem passante em cada peneira.....	152
Tabela 14 - Caracterização do ligante asfáltico CAP 50-70.....	154
Tabela 15 - Temperaturas de usinagem e compactação da mistura asfáltica	155
Tabela 16 - Temperaturas de usinagem e compactação da mistura asfáltica	155
Tabela 17 - Caracterização dos corpos de prova Marshall.....	156
Tabela 18 - Parâmetros de compactação obtidos para os corpos de prova moldados no CGS ($\alpha=0,75^\circ$).....	158
Tabela 19 - Parâmetros de compactação obtidos para os corpos de prova moldados no CGS ($\alpha=1^\circ$).....	160
Tabela 20 - Parâmetros de compactação obtidos para os corpos de prova moldados no CGS ($\alpha=1,25^\circ$).....	163
Tabela 21 - Parâmetros de compactação obtidos para os corpos de prova moldados no CGS ($\alpha=1,5^\circ$).....	165
Tabela 22 - Parâmetros de compactação obtidos para os corpos de prova moldados no CGS ($\alpha=1,75^\circ$).....	167
Tabela 23 - Caracterização das placas moldadas em laboratório	173
Tabela 24 - Caracterização das amostras e placas extraídas do trecho experimental.....	174

Tabela 25 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova Marshall (seções verticais).....	176
Tabela 26 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova Marshall (seções horizontais)	177
Tabela 27 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova CGS (seções verticais; $\alpha=0,75^\circ$).....	178
Tabela 28 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova CGS (seções verticais; $\alpha=1^\circ$).....	179
Tabela 29 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova CGS (seções verticais; $\alpha=1,25^\circ$).....	179
Tabela 30 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova CGS (seções verticais; $\alpha=1,5^\circ$).....	180
Tabela 31 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova CGS (seções verticais; $\alpha=1,75^\circ$).....	181
Tabela 32 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova CGS (seções horizontais; $\alpha=0,75^\circ$)	181
Tabela 33 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova CGS (seções horizontais; $\alpha=1^\circ$)	182
Tabela 34 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova CGS (seções horizontais; $\alpha=1,25^\circ$)	183
Tabela 35 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova CGS (seções horizontais; $\alpha=1,5^\circ$)	183
Tabela 36 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova CGS (seções horizontais; $\alpha=1,75^\circ$)	184
Tabela 37 - Parâmetros da macroestrutura das placas da mesa compactadora (seções verticais)	185
Tabela 38 - Parâmetros da macroestrutura das placas da mesa compactadora (seções horizontais)	186
Tabela 39 - Parâmetros da macroestrutura das amostras do trecho experimental (seções verticais).....	187
Tabela 40 - Parâmetros da macroestrutura das amostras do trecho experimental (seções horizontais).....	188
Tabela 41 - Cálculo do índice de segregação de placas da mesa compactadora (seções verticais)	208
Tabela 42 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova Marshall nas seções verticais (detalhado).....	234
Tabela 43 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova do CGS nas seções verticais (detalhado).....	236
Tabela 44 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova da mesa compactadora nas seções verticais (detalhado).....	237

Tabela 45 - Parâmetros da macroestrutura das amostras do trecho experimental nas seções verticais (detalhado)	238
Tabela 46 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova Marshall nas seções horizontais (detalhado).....	239
Tabela 47 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova do CGS nas seções horizontais (detalhado).....	240
Tabela 48 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova da mesa compactadora nas seções horizontais (detalhado).....	242
Tabela 49 - Parâmetros da macroestrutura das amostras do trecho experimental nas seções horizontais (detalhado)	242
Tabela 50 – Teste de normalidade e verificação de espúrios θ_k (seções horizontais)	246
Tabela 51 – Teste de normalidade e verificação de espúrios θ_k (seções verticais).....	247
Tabela 52 – Teste de normalidade e verificação de espúrios Δ (seções horizontais)	248
Tabela 53 – Teste de normalidade e verificação de espúrios Δ (seções verticais).....	249
Tabela 54 – Teste de normalidade e verificação de espúrios Δ_c (seções horizontais)	250
Tabela 55 – Teste de normalidade e verificação de espúrios Δ_c (seções verticais).....	251

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CDI	<i>Compaction Densification Index</i>
CGS	Compactador Giratório Superpave
CH	Corte Horizontal
Comp.	Comprimento
CP	Corpo de Prova
CV	Coefficiente de Variação
CV*	Coefficiente de Variação em uma amostra
CVL	Corte Vertical Longitudinal
CVT	Corte Vertical Transversal
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (Extinto)
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DP	Desvio Padrão
ES	Especificação de Serviço
GC	Grau de Compactação
IFSTTAR	<i>Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux</i>
IPAS	<i>Image Processing & Analysis System</i>
IS	Índice de Segregação
ISI	<i>Internal Structure Index</i>
LAB PAV	Laboratório de Pavimentação
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
ME	Método de Ensaio
Méd.	Média

N°	Número, quantidade
NBR	Norma Brasileira
PCG	Prensa de Cisalhamento Giratório
PDI	Processamento Digital de Imagens
RBV	Relação Betume/Vazios
RCD	Resíduo de construção e demolição
RPB	Proporção pó/betume efetivo
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
SMA	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
SUPERPAVE	<i>Superior Performing Asphalt Pavement</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
TDI	<i>Traffic Densification Index</i>
TDI _m	<i>Traffic Densification Index modificado</i>
VAM	Vazios do Agregado Mineral
Vv	Volume de vazios

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
Σ	Somatório
D	Diâmetro
G _{mb}	Massa específica aparente
G _{mm}	Massa específica aparente máxima teórica
H, h	Altura
I _{curva}	Inclinação da curva de densificação
N _{inicial}	Número de giros inicial
N _{máximo}	Número de giros máximo.
N _{projeto}	Número de giros de projeto
α	Ângulo de inclinação do eixo de rotação do Compactador Giratório Superpave
γ_{campo}	Massa específica aparente de corpos de prova extraídos da pista
γ_{projeto}	Massa específica aparente da mistura determinada em laboratório
Δ	Vetor magnitude dos agregados / das partículas
Δc	Vetor magnitude dos contatos
θc	Ângulo de orientação dos contatos (em relação ao eixo horizontal)
θk	Ângulo de orientação horizontal dos agregados / das partículas
θr	Ângulo de orientação radial dos agregados / das partículas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	33
1.1 OBJETIVOS	36
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i>	36
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	36
1.1.3 <i>Limitações da pesquisa</i>	37
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	37
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	39
2.1 MISTURAS ASFÁLTICAS.....	39
2.2 COMPACTAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS	40
2.2.1 <i>Compactação de misturas asfálticas em campo</i>	42
2.2.2 <i>Métodos de compactação laboratorial</i>	44
2.2.2.1 Compactador de impacto Marshall	45
2.2.2.2 Compactador giratório	46
2.2.2.3 Compactadores de rolo	53
2.2.2.4 Compactador <i>kneading</i>	55
2.2.2.5 Compactador vibratório	56
2.2.2.6 Compactador Presbox	57
2.2.3 <i>Estudos comparativos sobre métodos de compactação</i>	57
2.2.4 <i>Compactabilidade de misturas asfálticas</i>	64
2.2.4.1 <i>Influência dos materiais e da temperatura</i>	69
2.2.5 <i>Controle da compactação</i>	73
2.3 ANÁLISE DA ESTRUTURA INTERNA DE MISTURAS ASFÁLTICAS	74
2.3.1 <i>Orientação das partículas</i>	75
2.3.2 <i>Zonas de contato</i>	77
2.3.3 <i>Segregação das partículas</i>	79
2.3.4 <i>Estudos realizados acerca da análise da estrutura interna de misturas asfálticas</i>	82
2.4 ANÁLISE DE IMAGEM NA CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA INTERNA.....	102
2.4.1 <i>Técnicas de aquisição de imagens de misturas asfálticas</i> .	102
2.4.2 <i>Processamento digital e análise de imagens de misturas asfálticas</i>	106
2.4.3 <i>Outras aplicações da análise de imagens na caracterização de misturas asfálticas</i>	110

3 MATERIAIS E MÉTODOS	115
3.1 ETAPA 1 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	117
3.1.1 Agregados.....	117
3.1.2 Composição granulométrica	118
3.1.3 Ligante asfáltico	118
3.1.4 Determinação do teor de ligante asfáltico / Dosagem da mistura asfáltica	119
3.2 ETAPA 2 - PRODUÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA	121
3.2.1 Etapa 2.1 - Moldagem dos corpos de prova Marshall	122
3.2.2 Etapa 2.2 - Moldagem dos corpos de prova no CGS	122
3.2.3 Etapa 2.3 - Moldagem das placas de concreto asfáltico ...	127
3.2.4 Etapa 2.4 - Amostras do trecho experimental	128
3.3 ETAPA 3 - PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS....	131
3.4 ETAPA 4 - ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	147
3.5 ETAPA 5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS	149
4 RESULTADOS	151
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	151
4.1.1 Agregados.....	151
4.1.2 Composição granulométrica	152
4.1.3 Ligante asfáltico	154
4.1.4 Dosagem da mistura asfáltica	155
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA E PARÂMETROS DA COMPACTAÇÃO.....	155
4.2.1 Corpos de prova Marshall.....	156
4.2.2 Corpos de prova do Compactador Giratório Superpave...	157
4.2.3 Placas de concreto asfáltico.....	173
4.2.4 Amostras do trecho experimental	174
4.3 ANÁLISE DA ESTRUTURA INTERNA DE MISTURAS ASFÁLTICAS	175
4.3.1 Análise dos métodos de compactação	175
4.3.1.1 Compactador Marshall	175
4.3.1.2 Compactador Giratório Superpave	178
4.3.1.3 Mesa compactadora tipo LCPC.....	184
4.3.1.4 Amostras do trecho experimental	186
4.3.2 Comparação dos métodos de compactação.....	188
4.3.2.1 Orientação dos agregados.....	189
4.3.2.2 Zonas de contato.....	195
4.3.2.3 Segregação.....	202
4.3.2.4 Avaliação da macroestrutura	208

4.3.2.5 Restrições observadas	209
4.4 ENSAIO DE DESEMPENHO MECÂNICO	213
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	215
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	219
REFERÊNCIAS	221
APÊNDICE A - RESULTADOS DA ANÁLISE DA MACROESTRUTURA.....	233
APÊNDICE B – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS	245

1 INTRODUÇÃO

A rodovia, e em especial o pavimento, em razão da importância do transporte no complexo da atividade socioeconômica, dentro de uma perspectiva de longo prazo deve apresentar permanentemente um desempenho satisfatório.

Os pavimentos rodoviários devem, durante a vida útil, apresentar boas condições de rolamento e proporcionar conforto e segurança aos que neles trafegam. Contudo, tem-se verificado, nos pavimentos brasileiros, a ocorrência de degradações prematuras, como deformações permanentes e trincamentos por fadiga. O aparecimento de degradações prematuras pode ser resultado de fatores como: problemas de dosagem, uso de ligantes inadequados, temperatura e frequência e magnitude de cargas, dimensionamento inadequado, tráfego, sobrepeso e problemas de construção como a compactação. Em geral, um pavimento flexível é constituído por uma ou mais camadas de misturas asfálticas (revestimento) assentes sobre camadas granulares sobre o solo de fundação. Sendo o revestimento a camada que recebe diretamente as cargas de tráfego, a sua compactação constitui-se em um dos fatores principais no desempenho da estrutura. Assim, para cumprir a função, a etapa da compactação exerce um papel fundamental, especialmente a compactação laboratorial, a partir da qual são estabelecidas as propriedades de referência para a compactação em campo e são realizados os ensaios de previsão de desempenho mecânico.

Segundo Micaelo (2008), a compactação, quando bem executada, aumenta a capacidade estrutural do pavimento, propiciando mais pontos de contato entre as partículas que favorecem uma melhor distribuição de tensões, uma diminuição dos vazios torna o material menos susceptível aos agentes climáticos, além de proporcionar maior estabilidade do material quando solicitado. Brown (1990) acrescenta que uma mistura asfáltica devidamente compactada deve ter volume de vazios o suficiente para evitar a deformação plástica e exsudação e, ao mesmo tempo, promover o intertravamento e a ligação dos constituintes, prevenir a permeabilidade do ar e da água que podem ocasionar a oxidação, a desagregação e o trincamento do revestimento. Além disso, a quantidade de vazios na mistura asfáltica é provavelmente um dos fatores mais importantes no desempenho do revestimento asfáltico durante a vida útil.

Uma compactação mal executada, que origine misturas asfálticas densas com um percentual de volume de vazios abaixo do intervalo de

2% a 4%, pode levar a problemas de deformação permanente e exsudação do ligante em determinadas condições de carregamento. Por outro lado, misturas com um volume de vazios acima do desejado, pode diminuir o módulo de rigidez dinâmico, dificultando a distribuição do estado de tensões, além de não garantir a impermeabilidade desejada (MICAELO, 2008).

O porcentual de volume de vazios desejado para a mistura asfáltica em campo é determinado em laboratório durante o projeto da mistura asfáltica. No Brasil, o método de dosagem Marshall é o mais difundido. Neste método a compactação ocorre por impacto através da queda de um soquete de dimensões e massa padronizadas. Alguns autores (KHAN et al., 1998; MICAELO, 2008; HAMZAH, VON, ABDULLAH, 2013) afirmam que esta compactação não é apropriada por não simular o que ocorre no campo.

Durante a década de 1980/90, foi desenvolvido nos Estados Unidos, no âmbito do Programa SHRP (*Strategic Highway Research Program*), o método de dosagem Superpave (*Superior Performance Asphalt Pavement*). A compactação é realizada num compactador giratório e a densificação do material ocorre por amassamento. Quando comparado ao método Marshall, o compactador giratório é capaz de produzir corpos de prova compactados mais similares aos obtidos em campo. Entretanto, ainda há uma divergência em relação ao campo quanto à orientação dos agregados, à distribuição do volume de vazios e ao desempenho mecânico (KHAN et al., 1998; ZHANG et al., 2008; HUNTER, MCGREAVY, AIREY, 2009; HAMZAH, VON, ABDULLAH, 2013).

Os corpos de prova obtidos por compactação Marshall e Superpave são utilizados, em geral, para dosagem das misturas asfálticas (além dos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral, Dano por Umidade Induzida, Módulo Resiliente e Cântabro).

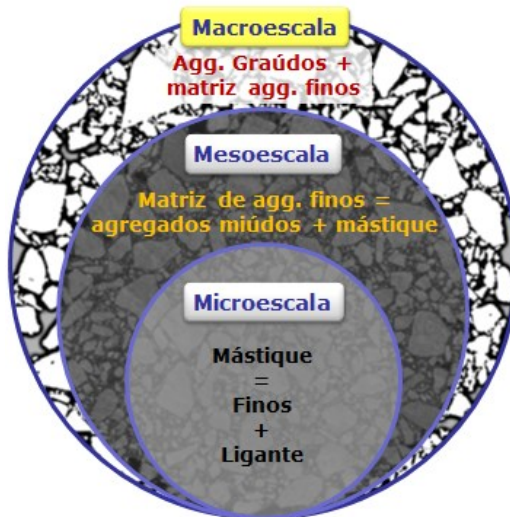
Para realização de ensaios de desempenho mecânico como fadiga e deformação permanente, os corpos de prova são extraídos de placas produzidas e compactadas em laboratório ou em campo. Esta compactação pode ser realizada pela mesa compactadora, pelo rolo liso de chapas metálicas e outros. A compactação realizada nesses equipamentos poderá diferir da compactação de campo, considerando as diferentes formas de compactação (impacto, amassamento, vibração).

Com o objetivo de certificar que a compactação laboratorial seja representativa do que ocorre no campo, este trabalho propõe-se a investigar e avaliar a compactação laboratorial no compactador Marshall, no Compactador Giratório Superpave (CGS) e na mesa

compactadora tipo LCPC. Para tanto, foram compactados, no CGS, corpos de prova com diferentes ângulos de inclinação do eixo de rotação do equipamento tendo em vista que este é o parâmetro que mais influencia a organização do esqueleto mineral (TASHMAN et al., 2001).

De acordo com Darabi et al. (2011) as misturas asfálticas podem ser representadas em três escalas, distinguindo o esqueleto mineral: (i) a microescala, denominada de mástique, em que os finos (filer) estão misturados com o ligante asfáltico; (ii) a mesoescala, matriz de agregados finos, composta por agregados miúdos, finos e ligante asfáltico (ou seja, os agregados miúdos envoltos no mástique); e (iii) a macroescala que inclui os agregados graúdos envolvidos pela matriz de agregados finos. Uma representação das três escalas de representação da mistura asfáltica pode ser visualizada na Figura 1. Neste trabalho, é analisada a macroescala, ou seja, a macroestrutura da mistura asfáltica.

Figura 1 - Escalas de representação da estrutura interna de misturas asfálticas



Fonte: Adaptado de Darabi et al. (2011).

Como a distribuição dos agregados na matriz de agregados finos durante a compactação em laboratório pode ser diferente daquela obtida em campo, esta análise será realizada por meio de imagens obtidas de misturas asfálticas compactadas em laboratório e em campo. As diferenças no esqueleto mineral induzidas pelos diferentes modos de compactação (compactador giratório, mesa compactadora e rolo

compactador em campo) serão descritas em função da orientação das partículas, da segregação e das zonas de contato.

De acordo com Bruno, Parla e Celauro (2012), a orientação interna e o intertravamento dos grãos contribuem significativamente para a determinação das propriedades mecânicas da mistura compactada.

A comparação com a compactação de campo torna-se um fator importante no desempenho final e deve, portanto, ser avaliada. Ao assegurar que a compactação laboratorial seja representativa do campo, é possível prever de modo mais realista o desempenho da mistura asfáltica minimizando o efeito da variável compactação.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a influência do método de compactação na macroestrutura de misturas asfálticas densas a quente utilizando o Processamento Digital de Imagens (PDI).

1.1.2 Objetivos Específicos

Com a finalidade de atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- a. Analisar a macroestrutura após a compactação laboratorial de misturas asfálticas no Compactador Giratório Superpave (CGS), no compactador Marshall e na mesa compactadora;
- b. Investigar a compactação da mistura asfáltica no Compactador Giratório Superpave variando o parâmetro ângulo de inclinação do eixo;
- c. Avaliar a macroestrutura da mistura asfáltica compactada em campo utilizando amostras extraídas de um trecho experimental;
- d. Comparar os resultados obtidos da compactação laboratorial e de campo nos diferentes métodos de compactação;
- e. Verificar qual método de compactação laboratorial estudado melhor representa a compactação em campo.

1.1.3 Limitações da pesquisa

O estudo realizado apresentou limitações quanto:

- i. Ao material investigado: restringe-se à análise de misturas asfálticas densas usinadas a quente;
- ii. À amostra *in situ*: foi avaliado apenas um trecho experimental em campo;
- iii. Ao método: o Processamento Digital de Imagens foi realizado a partir de imagens bidimensionais, restringindo a analisar o esqueleto mineral da mistura asfáltica, notadamente a macroestrutura (agregados graúdos envolvidos no mástique). Não foi avaliada, portanto, a distribuição dos volumes de vazios no material;
- iv. À aplicabilidade: os resultados decorrentes desta pesquisa são válidos para esta mistura asfáltica estudada (curva granulométrica, percentual de volume de vazios e teor de ligante especificado).

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

Capítulo 1 - Introdução

No Capítulo 1, faz-se a apresentação geral do assunto e dos objetivos geral e específicos da dissertação, os quais delimitam as diretrizes deste trabalho. É também apresentada a estrutura do trabalho.

Capítulo 2 - Fundamentação teórica

No Capítulo 2, é realizada uma descrição dos assuntos relacionados ao tema. É feita uma breve introdução sobre misturas asfálticas e, então, uma abordagem mais aprofundada acerca da compactação e de análise de imagens. No que tange à compactação, são apresentados os métodos laboratoriais, os estudos comparativos já realizados, os fatores que influenciam a compactabilidade e o controle da compactação. É detalhado como a estrutura interna interfere no desempenho de misturas asfálticas. Quanto à análise de imagens, faz-se uma breve introdução do assunto, são citadas as formas de aquisição de imagens e como é feito o processamento digital e a análise, e estudos realizados que utilizaram esta técnica.

Capítulo 3 - Materiais e métodos

No Capítulo 3, são apresentados os materiais e métodos utilizados no programa experimental. Mostra-se a caracterização dos materiais usados, bem como a metodologia a ser empregada, como os ensaios realizados e os equipamentos utilizados. É feita uma descrição da aplicação do *software* de análise de imagens.

Capítulo 4 - Resultados

No Capítulo 4, são apresentados os resultados. Apresentam-se os resultados obtidos por Melo (2014) quanto à caracterização dos materiais e expõem-se os resultados obtidos da compactação das misturas asfálticas e da aplicação de um *software* de processamento digital e análise de imagens de misturas asfálticas.

Capítulo 5 - Considerações finais e recomendações

No Capítulo 5, são expostas as principais conclusões obtidas, algumas considerações complementares e sugestões para trabalhos futuros.

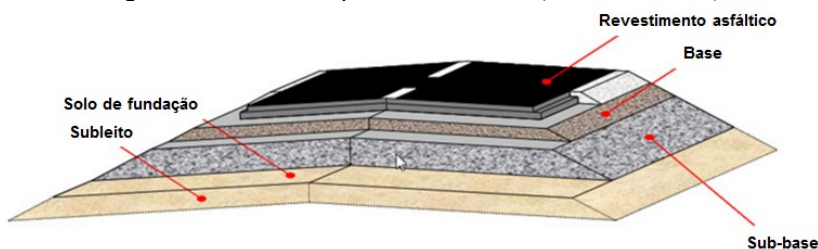
Por fim, são listadas as **referências** utilizadas durante a execução deste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MISTURAS ASFÁLTICAS

No Brasil, predominam os pavimentos asfálticos ou flexíveis que, em geral, são compostos por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito assentes sobre o solo de fundação (subleito), apresentados na Figura 2. A camada superficial do pavimento que fica em contato direto com as rodas dos veículos, o revestimento asfáltico, é constituída por uma mistura basicamente de agregados e ligantes asfálticos e pode ser composta por camadas de ligação e de rolamento.

Figura 2 - Estrutura do pavimento flexível (corte transversal)



Fonte: Adaptado de EAPA (2016).

A mistura asfáltica utilizada no revestimento de pavimentos flexíveis também pode ser empregada como camada de ligação (binder), base, regularização ou reforço de pavimento (BRASIL, 2006a).

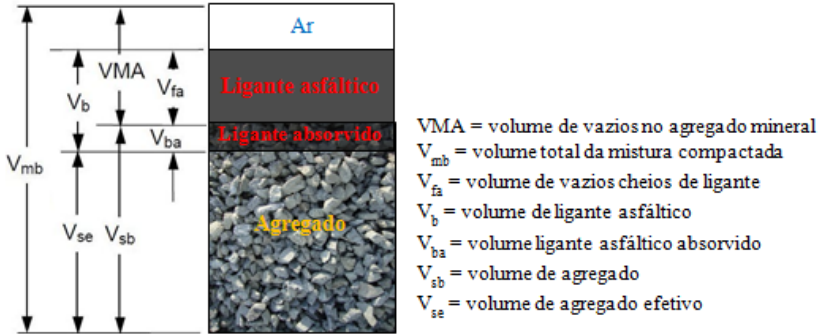
As misturas asfálticas são constituídas majoritariamente por agregado mineral e, em menor proporção, o ligante asfáltico e os vazios ocupados pelo ar (Figura 3).

Quanto à distribuição granulométrica, as misturas asfálticas são classificadas basicamente em: densas, abertas, contínuas e descontínuas. E, quanto à temperatura de produção: quentes, mornas ou frias. O objeto deste trabalho são as misturas asfálticas densas a quente, assim a estas será dada ênfase.

As misturas densas apresentam uma curva granulométrica contínua e bem-graduada de forma a proporcionar um esqueleto mineral com poucos vazios, uma vez que estes são preenchidos pelo material fino. Para uma mistura asfáltica a quente as temperaturas de produção

encontram-se no intervalo dos 120°C aos 180°C, consoante ao ligante asfáltico utilizado (BRASIL, 2006a).

Figura 3 - Diagrama de constituição de uma mistura asfáltica



Fonte: Adaptado de FHWA (1994).

De acordo com Darabi et al. (2011) as misturas asfálticas podem ser representadas em três escalas: (i) a microescala, denominada de mástique, em que os finos (fíler) estão misturados com o ligante asfáltico; (ii) a mesoescala, matriz de agregados finos, composta por agregados miúdos, finos e ligante asfáltico (ou seja, os agregados miúdos envolvidos no mástique); e (iii) a macroescala que inclui os agregados graúdos envolvidos pela matriz de agregados finos. Neste trabalho, é analisada a macroescala, ou seja, a macroestrutura da mistura asfáltica.

Esta conceituação (microescala, mesoescala e macroescala) é utilizada neste trabalho, contudo não há consenso na literatura.

2.2 COMPACTAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Compactação é a operação da qual resulta o aumento da massa específica aparente de um solo (e de outros materiais, como misturas asfálticas, etc), pela aplicação de pressão, impacto ou vibração, o que faz com que as partículas constitutivas do material entrem em contato mais íntimo, pela expulsão de ar; [...] (BRASIL, 2006b).

Assim, a compactação pode ser entendida como um processo mecânico de aplicação de forças externas, destinadas a reduzir o volume

dos vazios, até atingir uma determinada massa específica aparente. A mistura asfáltica sofre um arranjo de partículas e grande parte do ar é expulso, ou seja, a mistura passa de um estado solto para um estado denso/estável (MICAELO, 2008).

A compactação é de suma importância para que as misturas asfálticas tenham um desempenho mínimo, adequado ao fim desejado. Uma matriz de partículas mais compacta/densa torna a mistura asfáltica mais resistente, uma vez que (BERNUCCI et al., 2008; MICAELO, 2008):

- Reduz o percentual de volume de vazios, tornando o material menos susceptível aos agentes climáticos;
- Mais pontos de contato conduzem a forças de contato entre partículas menores;
- Um arranjo mais estável leva a menos reorientações de partículas quando solicitado pelo tráfego;
- Proporciona uma superfície suave e desempenada e aumenta a sua vida útil.

Segundo Micaelo (2008), uma compactação deficiente, que origine misturas asfálticas densas com um percentual de volume de vazios¹ abaixo do intervalo do prescrito em norma pode resultar em degradações como deformação permanente e exsudação do ligante em determinadas condições de carregamento. Por outro lado, misturas com um volume de vazios acima do desejado, pode diminuir o módulo de rigidez, dificultando a distribuição do estado de tensões, além de não garantir a impermeabilidade desejada permitindo a circulação de ar e percolação de água nos vazios.

Para Brown (1990), o percentual de volume de vazios na mistura asfáltica densa compactada não deve ser superior a 8% e, durante a vida útil do pavimento, não inferior a 3%.

No Brasil, a norma “DNIT 031/2006 - ES: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de Serviço” estabelece o intervalo de

¹ Porosidade ou (porcentual) de volume de vazios é o volume total dos vazios de ar entre as partículas de agregado revestidas pela mistura compactada; é expressa como porcentagem do volume total da mistura asfáltica compactada (FHWA, 1994). O termo volume de vazios também pode ser empregado para se referir ao volume total de vazios de ar na mistura asfáltica compactada; é expresso em unidade volumétrica e comumente utilizado na análise de imagens tridimensionais.

volume de vazios a ser atingido (Tabela 1) conforme a faixa granulométrica da mistura asfáltica.

Tabela 1 - Intervalo de volume de vazios para diferentes faixas granulométricas

<i>Faixa granulométrica</i>	<i>Uso</i>	<i>Volume de vazios (%)</i>	
		<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
A	Camada de ligação	4	6
B	Camada de ligação e de rolamento	3	5
C	Camada de rolamento	3	5

Fonte: Adaptado de Brasil (2006a).

Esta norma exige que o grau de compactação (GC), a razão da massa específica dos corpos de prova em campo pela massa específica aparente do projeto da mistura, esteja entre 97% e 101%.

Compreende-se, então, que para uma compactação adequada, é necessário conhecer o intervalo de volume de vazios (ou de massa específica) que se pretende atingir durante o processo de compactação de um revestimento. Esse intervalo é estimado durante o processo de dosagem da mistura, através das características volumétricas dos corpos de prova compactados em laboratório. Estes valores são elementos indicativos de referência durante a compactação no campo, uma vez que o que se pretende, é que a compactação laboratorial, represente as condições do material em serviço, ou seja, que reproduza a soma da compactação de obra durante o processo de execução e da ação do tráfego durante a vida útil do pavimento (MICAEL, 2008).

2.2.1 Compactação de misturas asfálticas em campo

No Brasil, a Norma DNIT 031/2006 - ES define a sistemática a ser empregada na execução de camada do pavimento flexível de estradas de rodagem e na confecção de mistura asfáltica a quente em usina apropriada. Esta norma estabelece ainda os requisitos quanto aos materiais, equipamentos, execução e controle de qualidade dos materiais empregados, além das condições de conformidade e não conformidade e de medição dos serviços.

A mistura asfáltica (concreto asfáltico) deve ser produzida em usina apropriada, transportada por caminhões basculantes cobertos, distribuída e compactada em pista conforme a especificação de serviço estabelecida pelo DNIT (BRASIL, 2006a).

A distribuição da mistura deve ser feita por pavimentadoras automotrizes e acabadoras. As pavimentadoras são responsáveis por espalhar e conformar a mistura na pista e, as acabadoras devem ser equipadas com alisadores e dispositivos para aquecimento, à temperatura requerida, para a colocação da mistura sem irregularidade.

Devem ser realizadas medidas de temperatura durante o espalhamento da massa imediatamente antes de iniciada a compactação. Estas temperaturas devem ser as indicadas, com uma tolerância de $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Segundo Bernucci et al. (2008), cada mistura asfáltica tem uma faixa de temperatura de compactação própria, relacionada ao tipo de ligante asfáltico utilizado. Em geral, é obtida maior eficiência na compactação quando se trabalha com temperaturas próximas do limite superior desta faixa, temperatura essa fixada, experimentalmente, para cada caso (BRASIL, 2006a).

Após a distribuição do concreto asfáltico, inicia-se a rolagem. Chaves et al. (2013) afirmam que os rolos para compactação são selecionados em função do tipo de material e superfície que se pretende alcançar. Os rolos de pneus (Figura 4a) são mais frequentemente utilizados para promover a compactação efetiva da mistura, enquanto que os rolos tandem (Figura 4b) e de chapa são utilizados no acabamento final, removendo marcas de pneu deixadas pelo primeiro.

Figura 4 - Rolos para compactação da mistura asfáltica em campo



a) Rolo de pneus



b) Rolo tandem

Fonte: Chaves et al. (2013).

De acordo com Bernucci et al. (2008), a rolagem de compactação pode ser iniciada com rolos compactadores vibratórios ou rolos tandem lisos estáticos e, em seguida, são utilizados os rolos de pneus. Em algumas obras, inicia-se diretamente com os rolos de pneus. Caso sejam empregados rolos de pneus, de pressão variável, inicia-se a rolagem com

baixa pressão, a qual deve ser aumentada à medida que a mistura seja compactada, e, conseqüentemente, suportando pressões mais elevadas (BRASIL, 2006a). A rolagem de acabamento é executada com rolos tandem lisos estáticos.

Para obter-se uma compactação eficiente é necessário que a largura da pista seja coberta pelos rolos compactadores tantas vezes quantas forem necessárias para que o grau de compactação desejado seja atingido, sem que a temperatura da mistura asfáltica alcance valores abaixo do mínimo correspondente à faixa de trabalho. Segundo Chaves et al. (2013), para a determinação do número de passadas necessário, é indicada a construção de pista experimental, com avaliação da densidade em cada passagem. A produtividade dos rolos também deve ser avaliada durante a construção da pista experimental. Fatores como temperatura da mistura e do ambiente, espessura da camada e características dos equipamentos disponíveis influenciam o processo de compactação.

O controle do grau de compactação (GC) da mistura asfáltica deve ser feito, medindo-se a densidade aparente de corpos de prova extraídos da mistura espalhada e compactada na pista, por meio de sondas rotativas e comparando-se os valores obtidos com os resultados da densidade aparente de projeto da mistura.

Conforme a instrução normativa devem ser realizadas determinações em locais escolhidos, aleatoriamente, durante a jornada de trabalho, não sendo permitidos GC inferiores a 97% ou superiores a 101%, em relação à massa específica aparente do projeto da mistura.

Eventualmente, podem ser extraídos corpos de prova para realização de ensaios de desempenho mecânico (módulo, fadiga, deformação permanente, resistência à tração).

Os revestimentos recém-acabados podem ser liberados ao tráfego após o seu completo resfriamento. Os serviços de execução do revestimento asfáltico só devem ser aceitos se atenderem às prescrições normativas DNIT 031/2006-ES.

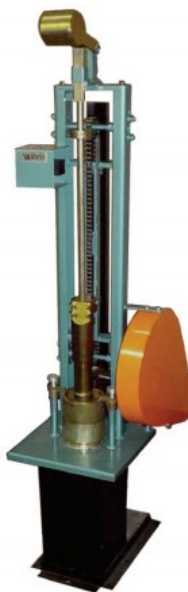
2.2.2 Métodos de compactação laboratorial

Existem vários métodos de compactação laboratorial utilizados para o projeto da mistura asfáltica e determinação dos parâmetros volumétricos. É importante distinguir os métodos corretamente, uma vez que influencia a avaliação das propriedades mecânicas do pavimento como elemento padrão da comparação das características obtidas em campo.

2.2.2.1 Compactador de impacto Marshall

O compactador por impacto, designado por compactador Marshall (Figura 5) em referência ao engenheiro Bruce Marshall, foi desenvolvido na década de 1940 por Marshall com base na modificação do compactador Proctor, utilizado por Hubbard e Field na compactação de misturas asfálticas (BERNUCCI et al., 2008; MICAELO, 2008). Devido à difusão do método empírico de determinação do teor do ligante, o compactador por impacto é muito utilizado mundialmente.

Figura 5 - Compactador Marshall automático



Fonte: Solotest (2014).

O método de dosagem Marshall é preconizado, no Brasil, pela norma DNER-ME 043-95. O procedimento consiste em compactar por impacto uma amostra de mistura asfáltica em um molde, com diâmetro interno de 10,16 cm e 6,35 cm de altura, através da queda de uma massa deslizante (4540 g) com altura de queda livre de 45,72 cm. A norma recomenda um esforço de compactação de 75 golpes por face do corpo de prova (DNER, 1995).

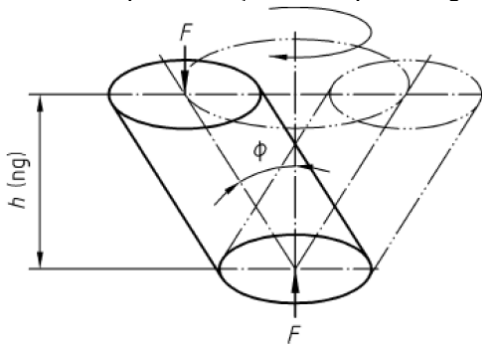
Micaelo (2008) afirma que o método permite uma pequena reorientação do agregado e por vezes provoca degradação. Este método

não é adequado para simular as condições de campo uma vez que este produz corpos de prova com massas específicas superiores àquelas medidas *in situ* (KHAN et al., 1998; MICAELO, 2008). Segundo Khan et al. (1998), isso ocorre, no compactador manual, devido à ação irregular do operador, que faz com que o soquete nem sempre caia na mesma porção da amostra, forçando a um rearranjo das partículas de agregado depois de cada golpe. Além disso, pode ocorrer um efeito de cisalhamento (amassamento) decorrente da inclinação do soquete no compactador Marshall diferente da carga de impacto uniforme aplicada pelo compactador Marshall automático.

2.2.2.2 Compactador giratório

No compactador giratório, a mistura asfáltica é compactada por amassamento. A compactação ocorre pela combinação de uma carga vertical estática e uma ação de cisalhamento originada pelo movimento de rotação imposto ao molde, com inclinação vertical de um ângulo pequeno, descrevendo uma superfície cônica de revolução conforme mostra a Figura 6. Para um mesmo número de giros a mistura pode ser compactada diferentemente em função da alteração dos parâmetros carga aplicada, ângulo de inclinação do eixo e velocidade de rotação (TASHMAN et al., 2001; PETERSON et al., 2004; MICAELO, 2008; SEFIDMAZGI, 2011).

Figura 6 - Princípio de atuação do compactador giratório



Fonte: EN12697, 2004 apud MICAELO, 2008.

O compactador giratório foi idealizado no Texas com o objetivo de simular mais fielmente a compactação em campo e tornou-se uma

maneira eficiente de compactar misturas asfálticas em laboratório. Atualmente, é o principal método utilizado nos Estados Unidos enquanto que no Brasil vem sendo utilizado por algumas universidades e em pesquisas (HARMAN et al., 2002; BERNUCCI et al., 2008).

Nos Estados Unidos, as normas AASHTO² T 312 - *Preparing and determining density of hot mix asphalt (HMA) specimens by means of the superpave gyratory compactor* (AASHTO, 2004) e ASTM D6925 - 09 *Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor* (ASTM, 2009) apresentam as especificações para a dosagem de misturas asfálticas utilizando o compactador giratório. Na Europa, é normalizado pela EN12697-31 (EM, 2004) que prevê a utilização da compactação giratória para avaliar a compactabilidade, determinar a massa específica aparente de referência e moldagem de corpos de prova para ensaios de caracterização mecânica. No Brasil, a norma NBR 15897: *Misturas asfálticas a quente - Preparação de corpos-de-prova com compactador giratório Superpave* (ABNT, 2010) trata da preparação de corpos de prova cilíndricos de misturas asfálticas a quente produzidas em usina ou em laboratório, usando o compactador giratório Superpave.

A AASHTO T 312 especifica que o procedimento de dosagem de misturas asfálticas no compactador giratório, a compactação dos corpos de prova deve ser feita uma frequência de 30 rotações/giros por minuto, tensão normal de 600 kPa \pm 18 kPa, ângulo de giro de $1,25^\circ \pm 0,02^\circ$ e um número de giros variável em função do volume de vazios da mistura e do tráfego de projeto.

Os conceitos do compactador giratório idealizado no Texas em 1939 serviram de base para pesquisas que culminaram no desenvolvimento e aperfeiçoamento de outros compactadores giratórios conforme pode ser visto na Tabela 2.

² AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

Tabela 2 - Evolução do compactador giratório

<i>Ano</i>	<i>Equipamento / agência</i>	<i>Tamanho do CP (mm)</i>	<i>Características da compactação</i>
1939	Concepção, Departamento de Transportes do Texas	D: 101,6 H: 50,8	P: desconhecida α : manual F: manual
1946	Departamento de Transportes do Texas (normatização do procedimento)	D: 101,6 e 152,46 H: 50,8 e 76,2	P: variável α : fixado em 6° F: 60 rpm
1957	USACE	D: 152,4 H: variável	P: variável α : flutuante 0 a 3° F: variável de 12 a 18 rpm Molde aquecido
Década de 1960	Primeiro protótipo de compactador no LCPC, França	Desconhecido	P: variável α : variável F: variável
1968	Segundo protótipo do compactador no LCPC, França	D: 80 ou 120 H: variável	P: variável α : flutuante 0,5 a 5° F: variável Molde aquecido
1974 - 1985	Prensas de Cisalhamento Giratório 1 e 2 no LCPC, França	D: 160 H: 80 a 300	P: 600 kPa α : fixado 1 a 4° F: fixado 6 a 30 rpm Molde aquecido
1991	Equipamento de ensaio de cisalhamento giratório modificado / FHWA	D: 101,6 H: 63,5	P: 600 kPa α : fixado 0,5 a 3° F: 30 rpm
1991	Compactador Giratório do Texas modificado, SHRP	D: 152,4 H: 95,25	P: 600 kPa F: variável Molde aquecido
1993	SHRP / Compactador Giratório Superpave, EUA	D: 150 H: 115	P: 600 kPa α : 1,25° F: 30 rpm
1996	Prensas de Corte Giratório 3 no LCPC, França	D: 150 H: 100 a 160	P: 500 a 800 kPa α : 0,5 a 2° F: 6 a 30 rpm

Nota: D é o diâmetro, H é a altura, P é a tensão normal, α é o ângulo de inclinação do eixo de rotação e F é a frequência de giros.

Fonte: Adaptado de Harman et al. (2002).

Compactador giratório do Texas

Segundo Harman et al. (2002), o primeiro modelo (manual) do Compactador Giratório do Texas foi idealizado por Philippi, Raines e Love do Departamento de Estradas do Texas em 1939. O procedimento de ensaio foi normatizado em 1946. A Figura 7 mostra uma prensa giratória do Texas utilizada entre 1939 e 1946.

Figura 7 - Prensa giratória do Texas



Fonte: Harman et al. (2002).

O desenvolvimento deste equipamento baseou-se em três critérios: o método deveria ser igualmente adaptável ao controle de campo e ao projeto de misturas asfálticas; o produto final da compactação deveria ter massas específicas (aparente) e volumes de vazios semelhantes ao pavimento finalizado exposto ao carregamento do tráfego; e o equipamento deveria simular a degradação do agregado que ocorre durante a compactação em campo (HARMAN et al., 2002).

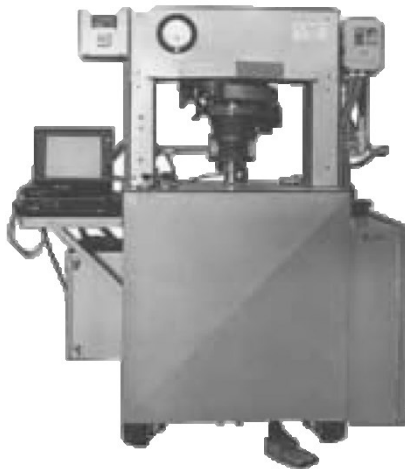
Compactador giratório do USACE

Na década de 1960, baseando-se nos princípios do Departamento de Transportes do Texas, John McRae do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos, do inglês *United States Army Corps of Engineers* - USACE, coordenou uma pesquisa que culminou com o desenvolvimento do *Gyratory Testing Machine* - GTM (Figura 8).

Harman et al. (2002) afirmam que McRae justificou seus estudos com resultados de pesquisas conduzidas pelo USACE que indicavam que o compactador Marshall, o mais utilizado na época nos Estados Unidos, fornecia dados inadequados que não simulavam as condições das misturas asfálticas em campo.

No *Gyratory Testing Machine*, o ângulo de giro era obtido por dois pontos, fazendo com que o molde oscilasse durante a compactação. Nesta época, o ensaio de compactação foi automatizado: os parâmetros ângulo de giro, altura da amostra e pressão aplicada, eram armazenados pelo computador e incorporados ao procedimento de projeto da mistura (HARMAN et al., 2002).

Figura 8 - Compactador giratório do USACE



Fonte: Harman et al. (2002).

Compactador giratório do LCPC

A Prensa de Cisalhamento Giratório - PCG também foi concebida a partir dos conceitos do Compactador Giratório do Texas nas décadas de 1960 e 1970 no *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* - LCPC³, na França. A primeira versão, denominada PCG1, diferenciava-

³ Desde 2011, o LCPC (Laboratório Central de Estradas e Pontes, do francês *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*) fundiu-se ao INRETS (Instituto de Pesquisa Nacional de Transportes e Segurança, do francês *Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité*) para dar origem ao atual IFSTTAR (Instituto Francês de Ciência e Tecnologia de Transportes, do francês *Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux*).

se do compactador giratório do USACE por possuir tensão normal constante de 600 kPa e ângulo de giro fixo em 1° (HARMAN et al., 2002).

Atualmente, a PCG encontra-se em sua terceira geração e está adequada às normas francesas, europeias e do Superpave para a compactação de misturas asfálticas (VECTRA FRANCE, 2015). Segundo Harman et al. (2002), a Comunidade Europeia, com o intuito de padronizar as especificações, adotou os conceitos de compactação desenvolvidos no LCPC.

Compactador giratório Superpave

Entre os anos de 1987 e 1993, nos Estados Unidos, no âmbito do programa *Strategic Highway Research Program* (SHRP), o compactador giratório foi otimizado para o método de dosagem *Superior Performing Asphalt Pavements* - Superpave (HARMAN et al., 2002). Para o autor, assim como seus antecessores, o Compactador Giratório Superpave - CGS (Figura 9) foi desenvolvido para melhor simular a orientação e degradação dos agregados, a compactação em campo e a degradação da mistura asfáltica durante a produção, compactação e ação do tráfego.

A maioria dos compactadores giratórios Superpave produzidos permite o ajuste e controle dos quatro principais parâmetros que influenciam a compactação das misturas asfálticas em laboratório:

- Ângulo de giro ou de rotação ou de inclinação do eixo;
- Frequência de giros ou velocidade de rotação;
- Tensão normal ou de compressão vertical; e
- Número de giros.

O equipamento possui o modo calibração que permite a padronização dos parâmetros: altura do corpo de prova; ângulo de inclinação do eixo de rotação e pressão de compactação.

As especificações do programa Superpave quanto aos parâmetros mencionados são (AASHTO, 2004):

- Ângulo de rotação de $1,25 \pm 0,02^\circ$;
- Velocidade de rotação de 30 rpm;
- Tensão de compressão vertical (carga estática) de 600 kPa; e
- Número de giros variável, sendo característico para cada mistura em função do tráfego de projeto, conforme mostra a Tabela 3.

Figura 9 - Compactador Giratório Superpave



Fonte: IPC Global[®] (2015).

Na Tabela 3, os esforços de compactação N_{inicial} e $N_{\text{máximo}}$ são usados para avaliar a compactabilidade da mistura enquanto que o N_{projeto} serve para determinar o teor de ligante de projeto.

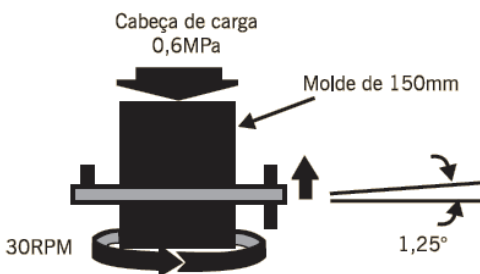
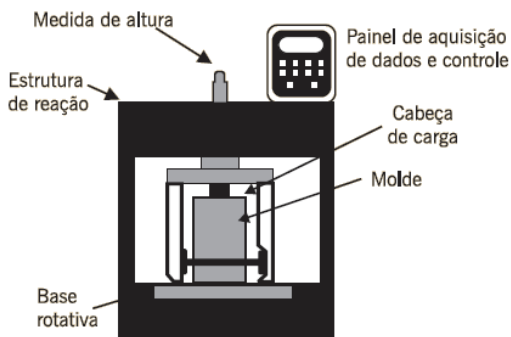
Tabela 3 - Número de giros especificados pela dosagem Superpave

<i>Tráfego ($N_{8,2t}$)</i>	<i>Parâmetros de compactação</i>		
	N_{inicial}	N_{projeto}	$N_{\text{máximo}}$
Muito leve ($< 3 \times 10^5$)	6	50	75
Médio ($3 \times 10^5 - 3 \times 10^6$)	7	75	115
Médio a alto ($3 \times 10^6 - 3 \times 10^7$)	8	100	160
Alto ($> 3 \times 10^7$)	9	125	205

Fonte: Adaptado de FHWA (1994); ASTM (2009).

A Figura 10 apresenta uma representação esquemática das características supracitadas do Compactador Giratório Superpave.

Figura 10 - Ilustração esquemática do compactador giratório Superpave (CGS)



Fonte: Adaptado de FHWA (1994).

No Compactador Giratório Superpave é possível produzir corpos de prova com diâmetros internos de 150 e 100 mm.

2.2.2.3 Compactadores de rolo

De acordo com Micaelo (2008), o compactador de rolo é aquele que melhor reproduz as condições de campo em laboratório. Neste grupo enquadram-se os compactadores de roda metálica, o cilindro metálico de rasto liso (Figura 11), rodas com pneumáticos e o compactador com placas metálicas. Esses equipamentos são capazes de produzir placas, utilizadas em ensaios para avaliar o desempenho de misturas asfálticas à deformação permanente e à fadiga. Placas são compactadas de acordo com as dimensões do rolo e os prismas, no caso do ensaio à fadiga, são extraídos por serragem.

Figura 11 - Rolo liso compactador



Fonte: Fontes (2009).

O equipamento com rolo de pneumáticos (Figura 12), modelo disponível no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina, foi desenvolvido na França no LCPC. Também conhecido como mesa compactadora, a compactação ocorre devido a um movimento cíclico e longitudinal de dois pneumáticos que rolam sobre a placa (molde) alternando a posição transversal em torno do eixo médio.

Figura 12 - Mesa compactadora LCPC



Fonte: Otto (2009).

Outros modelos

Chaves et al. (2013) desenvolveram um equipamento de compactação laboratorial por rolagem, visualizado na Figura 13. A compactação por rolagem integra o procedimento francês e tem a finalidade de produzir amostras para ensaios de comportamento mecânico. O equipamento molda placas de concreto asfáltico de 60 cm de comprimento e 18 cm de largura. Segundo os autores, o equipamento permite a compactação de amostras de pavimento com espessuras variáveis, atendendo às solicitações distintas. O esforço é aplicado por roda metálica com a largura total da placa (18 cm).

Figura 13 - Equipamento de compactação por rolagem



Fonte: Chaves et al. (2013).

2.2.2.4 Compactador *kneading*

O compactador *kneading* (Figura 14) foi desenvolvido nos Estados Unidos para a compactação de corpos de prova cilíndricos (*kneading* californiano) sendo posteriormente adaptado para compactar corpos de prova prismáticos (*kneading* linear) e utilizados em ensaios de flexão. Segundo Micaelo (2008), é utilizado nas metodologias de dosagem Hveem e Smith ou Triaxial do *Asphalt Institute*.

Neste método, a compactação da mistura asfáltica ocorre por um processo de “pisoteamento”: a força é aplicada por um suporte que transmite um esforço cisalhante elevado e localizado (SWIERTZ; MAHMOUD; BAHIA, 2010). Para os corpos de prova cilíndricos, o suporte apresenta uma seção circular enquanto que para corpos de prova prismáticos, trata-se de um suporte de base retangular que se desloca nos sentidos horizontal e vertical para cobrir toda a superfície.

O uso deste equipamento de compactação laboratorial não é difundido no Brasil. No entanto, também foi avaliado em um estudo comparativo de compactação laboratorial (KHAN et al., 1998).

Figura 14 - Compactador *kneading*

Fonte: James Cox & Sons (2014).

2.2.2.5 Compactador vibratório

No compactador vibratório, a energia de compactação é transmitida pelo martelo vibrador, com uma potência entre 750 e 1000 W e frequência entre 20 e 50 Hz (MICAÉLO, 2008). A energia de compactação é aplicada no molde manualmente com o martelo vibrador. Na Figura 15 apresentam-se os equipamentos utilizados: molde, martelo vibrador e pés. O procedimento pretende simular o efeito dos cilindros. O uso do compactador vibratório não é difundido no Brasil. Contudo, foi avaliado em alguns estudos comparativos de compactação laboratorial (TASHMAN et al., 2001; HUNTER; AIREY; COLLOP, 2004; ZHANG et al., 2008; HUNTER; MCGREAVY; AIREY, 2009; HASSAN; AIREY; KAHN, 2012).

Figura 15 - Compactador vibratório

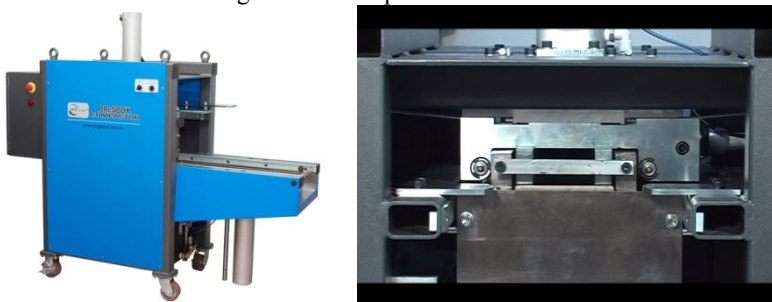


Fonte: Controls apud Micaelo (2008).

2.2.2.6 Compactador Presbox

No Compactador Presbox, ou Caixa de cisalhamento Presbox, é possível compactar corpos de prova prismáticos de concreto asfáltico de 450 x 150 mm e altura variável entre 145 a 185 mm. O esforço cisalhante do equipamento reproduz as condições de compactação em campo, além de produzir amostras homogêneas. A caixa de cisalhamento Presbox, ilustrada na Figura 16, não é difundida no Brasil. Contudo, foi também avaliado em um estudo comparativo de compactação laboratorial (HAMZAH; VON; ABDULLAH, 2013).

Figura 16 - Compactador Presbox



Fonte: IPC Global® (2016).

2.2.3 Estudos comparativos sobre métodos de compactação

A comparação dos métodos de compactação laboratorial é salutar, uma vez que estes são utilizados para determinar a massa específica aparente de projeto usada como referência da compactação

em obra (MICAELLO, 2008). Além do controle da compactação em campo, na dosagem das misturas asfálticas e na confecção de corpos de prova para ensaios de desempenho é importante reduzir a dispersão e as diferenças entre campo e laboratório.

A dosagem é realizada por meio de misturas asfálticas compactadas para definição de importantes parâmetros como o percentual de volume de vazios e o teor de ligante asfáltico. Posteriormente, os corpos de prova moldados a partir da dosagem são utilizados em ensaios de desempenho. Os dados de ensaios de desempenho mecânico são usados no dimensionamento da estrutura do pavimento em campo. De qualquer forma, a possibilidade de reproduzir, o mais fielmente possível, o arranjo dos componentes da mistura por meio da compactação pode minimizar o efeito da compactação no desempenho da mistura asfáltica em campo.

As diferenças entre os métodos de compactação laboratorial ou dos diferentes parâmetros adotados, no caso do compactador giratório, podem ser quantificadas por meio da massa específica aparente e do percentual do volume de vazios. Contudo, alguns autores (KHAN et al., 1998; HUNTER, MCGREAVY, AIREY, 2009; HASSAN, AIREY, KAHN, 2012) sugerem que misturas com a mesma densidade podem apresentar comportamentos diferentes uma vez que a distribuição dos vazios e orientação dos agregados, por exemplo, podem influenciar no desempenho da mistura asfáltica.

A seguir, apresentam-se resultados de investigações que envolvem a compactação laboratorial de misturas asfálticas e/ou a aplicação do compactador giratório, importantes para o objeto deste estudo.

Khan et al. (1998) compararam a compactação de misturas asfálticas (diâmetro máximo do agregado 19 mm) em laboratório e em campo. Neste experimento, foram produzidas misturas asfálticas de quatro trechos experimentais de localidades distintas, na Província Oriental da Arábia Saudita, e em laboratório nos compactadores Marshall manual e automático, *kneading* californiano e giratório (ângulos de rotação 1,25° e 6°). Ainda, foram extraídos oito corpos de prova de cada trecho experimental antes da abertura ao tráfego. A massa específica aparente dos corpos de prova fabricados com o compactador giratório com ângulo de rotação 1,25° apresentou-se muito próxima dos extraídos em obra, pois a compactação era finalizada quando o percentual de volume de vazios se aproximava de 5% (conforme o projeto da mistura), enquanto nos outros métodos era aplicada uma energia predefinida (número de golpes ou número de giros

fixos/normatizados). Dessa forma, os compactadores Marshall produziram corpos de prova com massas específicas superiores. Isso ocorre devido à ação irregular do operador, que faz com que o soquete nem sempre caia na mesma porção da amostra, forçando a um rearranjo das partículas de agregado depois de cada golpe. Além disso, pode ocorrer um efeito de cisalhamento (amassamento) decorrente da inclinação do soquete no compactador Marshall diferente da carga de impacto uniforme aplicada pelo compactador Marshall automático. Os resultados dos ensaios de estabilidade Marshall, módulo de resiliência e fluência permitiram concluir que os corpos de prova produzidos com o giratório 1,25° foram os que mais se aproximaram aqueles compactados em obra, embora ocorresse alguma variabilidade. A massa específica dos corpos de prova fabricados com o giratório com ângulo de rotação 6° apresentou-se mais elevada, mas o módulo de resiliência e o comportamento à fluência foram semelhantes ao giratório 1,25°.

Peterson et al. (2004) investigaram o efeito do controle de parâmetros do compactador giratório na compactação da mistura asfáltica. Para a análise, também foram compactadas em campo três seções teste, localizadas na *Ohio Route 44* em Ohio nos Estados Unidos, com padrões diferentes de compactação. Os parâmetros avaliados no compactador giratório foram: ângulo de rotação (1,25°, 1,50° e 2,00°); altura do molde (50, 75 e 135 mm); pressão ou tensão vertical de compressão (400, 600 e 800 kPa) e temperatura de aquecimento do molde (135°C e 149°C). A combinação dos parâmetros ângulo 1,25°, altura do molde 75mm e tensão de compressão 800 kPa foi a que produziu corpos de prova com os menores módulos para uma frequência de 10Hz. O ângulo de rotação 1,5° e corpos de prova com altura de 50 ou 75 mm foram os que melhor simularam as propriedades mecânicas em campo. Para o ângulo de rotação de 1,25°, especificado pelo Superpave, a tensão normal de compressão de 400 kPa foi a que apresentou resultados de compactação mais similares ao campo. Ainda, os autores salientaram a importância do estudo de uma ampla matriz de parâmetros (ângulo de inclinação do eixo de rotação, pressão de compactação, altura e diâmetro do molde) do compactador giratório para identificar a combinação ótima dos parâmetros que melhor simulam a compactação *in situ*.

Hunter, McGreavy e Airey (2009) compararam o efeito de três métodos de compactação laboratorial (giratório, vibratório e pneu com rolo) com a compactação em campo de uma mistura asfáltica típica utilizada no Reino Unido. O objetivo foi quantificar o efeito dos diferentes métodos de compactação nas propriedades mecânicas e no

volume de vazios dos corpos de prova moldados. O estudo mostrou que os compactadores giratório e vibratório tendem a produzir corpos de prova com maior rigidez e resistência à deformação permanente do que misturas compactadas com o rolo (em laboratório). Quanto aos compactadores giratórios, foram utilizados cinco equipamentos com parâmetros diferentes. Em termos do compactador giratório, observaram que nos corpos de prova moldados com ângulo de rotação $1,25^\circ$, pressão vertical 600 kPa e frequência 30 rpm, a média do volume de vazios e do módulo de rigidez são comparáveis aos obtidos com o compactador de rolo em campo. Esses parâmetros são normatizados pela AASHTO e amplamente utilizados. O compactador giratório no ângulo de rotação $55''$ (menor que 1°), pressão vertical 662 kPa e frequência 30 rpm produziu corpos de prova com módulo de rigidez significativamente maiores. Em geral, os corpos de prova compactados com o compactador giratório foram aqueles que apresentaram volume de vazios mais similar ao encontrado em campo, contudo, tendem a produzir misturas com quase o dobro do módulo de rigidez. Os autores apontam que a diferença na rigidez pode estar relacionada com a estrutura interna da mistura asfáltica. Em termos do comportamento à fadiga, os resultados indicaram que os modos de compactação não afetam significativamente este desempenho mecânico.

Estudos realizados por Al-Khateeb et al. (2002), Prowel, Brown e Huner (2003), Buchanan, Brumfield e Sheffield (2004) e DeVol et al. (2007) avaliaram a influência do ângulo de rotação do compactador giratório e ressaltaram a sensibilidade e a importância da calibração deste parâmetro.

No Compactador Giratório Superpave, antes da compactação, devem ser calibrados:

- i. Altura: a referência é fornecida ao equipamento por meio de anéis cilíndricos de 50 e 200 mm de altura (que acompanham o compactador), solicitados durante o modo de calibração;
- ii. Ângulo de inclinação do eixo de rotação: pode ser calibrado externamente com elementos padrões que acompanham o equipamento ou internamente por meio de *softwares* e extensômetros que atuam verificando o ângulo de inclinação instantaneamente. Na calibração externa (modo calibração), três cilindros de 66 mm de altura são posicionados em forma de triângulo equilátero de modo calibrar o ângulo de inclinação do eixo igual a zero; o

procedimento é repetido com cilindros de 78 mm de altura; e

- iii. Pressão de compactação: aferida por meio de um dinamômetro durante o modo calibração.

Uma vez que o ângulo de rotação é um fator bastante sensível que influi significativamente na compactação da mistura asfáltica, Al-Khateeb et al. (2002) propuseram que a calibração do ângulo de rotação dos CGS devem ser tais quais se obtenha o mesmo ângulo de rotação para os diferentes modelos de equipamento de forma a garantir a homogeneidade dos projetos de misturas asfálticas. Após estudos, os autores concluíram que os padrões sugeridos pela AASHTO, ângulo de rotação $1,25^\circ$ e tolerância de $\pm 0,02^\circ$, precisam ser revistos. Portanto, foi sugerido um *kit* de calibração para o ângulo de rotação sendo proposto um ângulo dinâmico interno de rotação de $1,16^\circ$ e tolerâncias de $\pm 0,03^\circ$ para a calibração.

Prowel, Brown e Huner (2003) avaliaram a influência do ângulo de rotação em diferentes compactadores giratórios no estado do Alabama, nos Estados Unidos. Os autores concluíram que uma variação do ângulo interno de rotação explica 37% da variação da massa específica aparente de um corpo de prova. Assim como Al-Khateeb et al. (2002), os autores sugerem a utilização de um *kit* de calibração com um ângulo dinâmico interno de rotação de $1,16^\circ \pm 0,03^\circ$.

Buchanan, Brumfield e Sheffield (2004) avaliaram doze compactadores giratórios e verificaram que nenhum estava de acordo com as especificações da AASHTO T312 para o ângulo de rotação. Os autores reportaram ter encontrado uma diferença de 0,9% no volume de vazios em corpos de prova compactados por 12 diferentes compactadores giratórios.

De acordo com pesquisa realizada por DeVol et al. (2007) no Departamento de Transporte do Estado de Washington (do inglês, *Washington State Department of Transportation - WSDOT*) quando é observada uma diferença entre os ângulos externo e interno de compactação a massa específica aparente (Gmb) é consideravelmente menor. Uma massa específica aparente menor aumenta o volume de vazios da mistura além de aumentar os espaços vazios no agregado mineral e diminuir os vazios preenchidos com ligante asfáltico. Consequentemente, essa alteração de ensaio pode afetar a aceitação de misturas asfálticas produzidas. No estudo realizado, observou-se que 41% dos equipamentos avaliados estavam em desacordo e precisavam ser calibrados. Os autores sugerem a calibração interna do ângulo de rotação por ser menos variável.

Khosla e Ayyla (2013) realizaram um estudo para otimizar o número de giros (N) de projeto utilizado no compactador giratório para aprimorar o projeto de misturas asfálticas para altos volumes de tráfego ($N_{8,2t}$ maior que 3×10^7). A otimização do número de giros de projeto foi feita com base no comportamento à fadiga e à deformação permanente das misturas ensaiadas. Khosla e Ayyla (2013) recomendam 85 giros enquanto que a especificação Superpave estabelece 100 e 125 giros para volumes médio a alto e elevado tráfego, respectivamente. Os autores afirmam que os números de giros especificados pelo Superpave produzem misturas com melhor desempenho e teores de ligante asfáltico superiores sendo antieconômico.

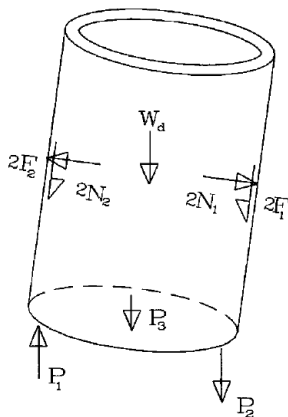
Verificou-se que diversos autores (KHAN et al., 1998; TASHMAN et al., 2001; DESSOUKY, MASAD, BAYOMY, 2004; PETERSON et al., 2004; HUNTER, MCGREAVY, AIREY, 2009; KHOSLA, AYYLA, 2013) investigaram o efeito da variação de um ou mais parâmetros de operação do compactador giratório, bem como compararam a compactação por amassamento com a compactação em campo e/ou com outros métodos laboratoriais. Não houve consenso quanto à influência da variação dos parâmetros de operação do equipamento nem quanto às metodologias empregadas nas análises.

Para compreender as diferenças de comportamento mecânico da mistura que decorrem do processo de compactação, têm sido conduzidas investigações sobre a distribuição do volume de vazios nos corpos de prova e sobre orientação dos agregados. Para tanto, tecnologias como tomografia computadorizada de raios-X, que permitem obter a distribuição dos materiais em cada seção analisada, estão sendo utilizadas (YU et al., 2006; WANG, 2007; HASSAN; AIREY; KAHN, 2012; KHAN et al., 2013; KHOSRAVI et al., 2013; ABDUL HASSAN; AIREY; HAININ, 2014; LIU et al., 2014). Outro recurso é a análise de imagens de cortes do corpo de prova tratadas que permite visualizar a orientação dos agregados e os contatos intergranulares. Esta abordagem de análise da compactação será explorada nos subitens 2.3 e 2.4.

Outras pesquisas foram realizadas recentemente utilizando o compactador giratório e ressaltam a aplicabilidade deste equipamento.

Dessouky, Masad e Bayomy (2004) utilizaram o compactador giratório Superpave para prever a estabilidade de misturas asfálticas durante a fase de projeto. A estabilidade da mistura foi estimada por meio do índice de contato de energia (do inglês, *Contact Energy Index - CEI*) cuja determinação foi feita com base no somatório das forças que atuam na compactação do corpo de prova durante um giro, conforme mostra a Figura 17.

Figura 17 - Forças atuantes em um molde com ângulo inclinação do eixo de rotação α



Fonte: Dessouky, Masad e Bayomy (2004).

Nota: W_d é a força devido ao peso próprio; P_1 , P_2 e P_3 são as forças atuantes na direção vertical; N_1 e N_2 são as forças normais e F_1 e F_2 são as forças de atrito.

Nesse estudo, foi determinado o índice de contato de energia para dezesseis diferentes misturas. A influência da pressão de compactação e do ângulo de rotação sobre o índice de contato de energia foi investigada, a fim de determinar a melhor combinação que captura a diferença entre as misturas com diferentes constituintes. Os autores concluíram que os valores utilizados atualmente pela metodologia Superpave (ângulo de rotação $1,25^\circ$ e pressão 600 kPa) são adequados para a determinação do índice de contato de energia. Foram também compactados corpos de prova com ângulos de inclinação do eixo 0° ; $0,75^\circ$; $1,5^\circ$; $2,25^\circ$ e 3° . Misturas compactadas sem a inclinação do eixo (0°) colapsaram logo após serem extraídas dos moldes, o que enfatiza a influência do esforço de cisalhamento no desenvolvimento dos contatos entre agregados (DESSOUKY; MASAD; BAYOMY, 2004). O índice de contato de energia aumenta com o aumento do ângulo de inclinação do eixo de rotação. Quanto à pressão de compactação, o índice não se mostrou sensível a este parâmetro. Ainda, o índice foi capaz de capturar a influência da variação dos constituintes da mistura na estabilidade do material e apresentou boas correlações com as propriedades mecânicas. O valor do índice foi menor em misturas com areia natural, excesso de ligante asfáltico e agregados com superfície lisa.

Xiao et al. (2012) avaliaram a viabilidade de utilização do compactador giratório para dosar asfalto borracha com revestimento asfáltico reutilizado (do inglês, *reclaimed asphalt pavement* - RAP). Os resultados mostraram a viabilidade de utilização da metodologia Superpave para a dosagem deste tipo de mistura.

Archilla (2006) e Ziari, Divandari e Behbahani (2012) utilizaram o compactador giratório para determinar os parâmetros de modelos de estimativa de deformação permanente em misturas asfálticas.

Outros trabalhos foram realizados com a temática da comparação entre os métodos de compactação Marshall e Superpave. Marques (2004) comparou o efeito dos dois processos de compactação no módulo resiliente de uma mistura asfáltica. Vasconcelos (2004) comparou as dosagens Marshall e Superpave variando as distribuições granulométricas (três granulometrias contínuas e duas granulometrias descontínuas). El-Hage (2012) estudou a utilização dos compactadores Marshall e Superpave em misturas asfálticas tipo *Stone Matrix Asphalt* (SMA).

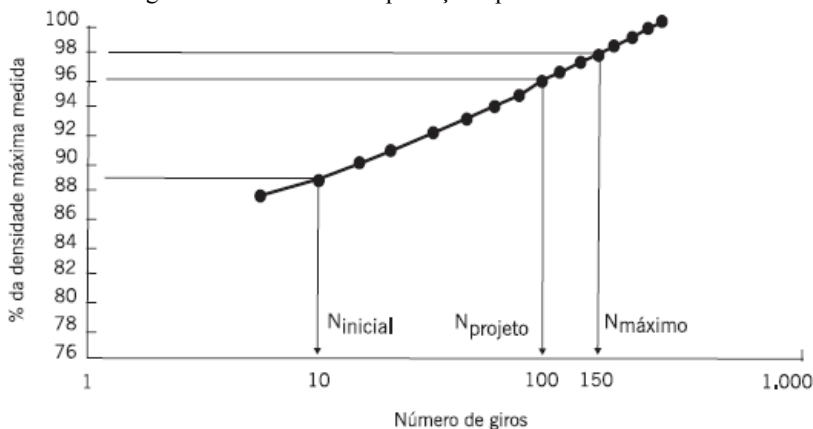
2.2.4 Compactabilidade de misturas asfálticas

A compactabilidade é a relação entre a massa específica, ou a porosidade, e a energia de compactação aplicada, sendo um indicador da trabalhabilidade da mistura asfáltica. A trabalhabilidade é a propriedade que determina a produção, manuseamento, colocação e compactação com uma aplicação mínima de energia (MICAELO, 2008).

A norma europeia EN12697-10 (2001) especifica a medição da compactabilidade com base na monitoração da compactação, através da massa específica, da porosidade ou da altura do corpo de prova, com a energia de compactação aplicada por um dos métodos de compactação laboratorial (Marshall, giratório e vibratório).

No que diz respeito ao método de dosagem Superpave, são definidos limites de compactação em três momentos da compactação dos corpos de prova em laboratório, com o compactador giratório. De acordo com as classes de tráfego e de temperatura, as quais o pavimento estará sujeito em campo, previsivelmente, são definidos os números de rotações $N_{inicial}$, $N_{projeto}$ e $N_{máximo}$, respectivamente por ordem crescente, conforme mostra a Figura 18.

Figura 18 - Curva de compactação típica obtida do CGS

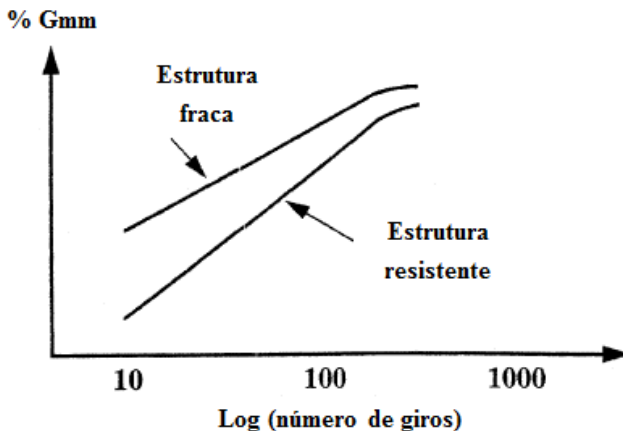


Fonte: Controls (2016).

Para um número de rotações igual a $N_{inicial}$ o grau de compactação (função da massa específica máxima teórica) terá de ser inferior a 89%, para $N_{projeto}$, igual a 96%; e para $N_{máximo}$, menor que 98%. Desta forma, a curva de compactação é controlada com o objetivo de especificar um comportamento adequado quer em construção, quer em serviço. Com os limites de $N_{projeto}$ e $N_{máximo}$, especifica-se o valor do volume de vazios pretendido para a mistura asfáltica em serviço, entre 4% (após construção) e 2% (após compactação pelo tráfego).

O valor máximo do grau de compactação para $N_{inicial}$ é 89% da Gmm (massa específica aparente máxima teórica). De acordo com Micaelo (2008), misturas com uma massa específica muito elevada, quando colocadas no molde, apresentam baixo atrito interno e são bastante compactáveis (Figura 19), podendo ocorrer problemas de estabilidade durante os trabalhos de compactação em obra. Ou seja, a mistura asfáltica espalhada deve ser estável para suportar o peso do rolo compactador em campo.

Figura 19 - Curvas de densificação de duas misturas com estruturas minerais distintas



Fonte: Adaptado de Controls (2016).

O grau de compactação apresenta uma variação quase linear em função de $\log N$. Assim o método Superpave define N_{inicial} e $N_{\text{máximo}}$ em função do N_{projeto} , de acordo com as Equações 1 e 2.

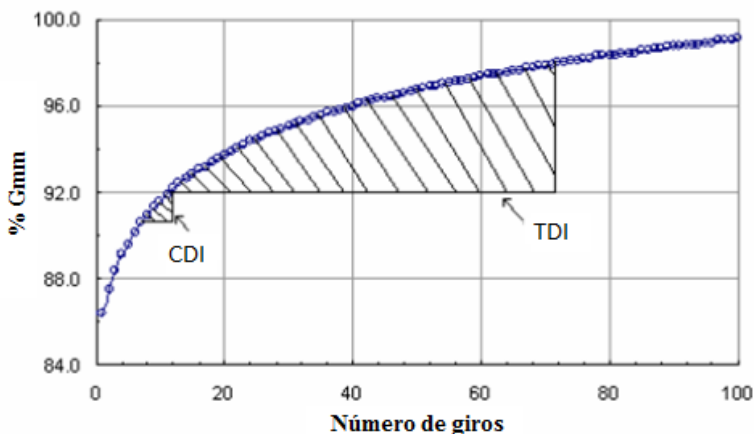
$$\log N_{\text{inicial}} = 0,45 \times \log N_{\text{projeto}} \quad (1)$$

$$\log N_{\text{máximo}} = 1,10 \times \log N_{\text{projeto}} \quad (2)$$

Onde: N_{inicial} é o número de giros inicial; N_{projeto} é o número de giros de projeto; e $N_{\text{máximo}}$ é o número de giros máximo.

Pesquisadores da Universidade de Wisconsin desenvolveram uma metodologia de análise da compactabilidade durante a construção e sob a ação do tráfego, com base na curva de crescimento da massa específica aparente durante a compactação laboratorial com o compactador giratório (STAKSTON; BAHIA, 2003). Nesta metodologia, a mistura asfáltica deverá apresentar uma compactabilidade elevada durante a construção e uma resistência elevada à compactação pelo tráfego durante o período de vida útil. Os elementos de análise são o CDI (*Compaction Densification Index*) e o TDI (*Traffic Densification Index*) que representam as áreas tracejadas ilustradas na Figura 20. As variáveis CDI e TDI são obtidas a partir dos dados extraídos da curva de compactação do CGS.

Figura 20 - Representação gráfica dos índices de energia



Fonte: Stakston e Bahia (2003).

O CDI está relacionado com a energia despendida em campo durante a construção do revestimento asfáltico para alcançar o grau de compactação requerido, definido em 92% da Gmm. O CDI é o valor da área entre três curvas: (i) a de compactação, (ii) a reta horizontal que cruza a curva de compactação no número de giros inicial ($N_{inicial}$) e (iii) a reta vertical que cruza com a curva de compactação quando a massa específica aparente é equivalente a 92% da Gmm. De acordo com Onofre et al. (2011), quanto menor o valor de CDI, melhor a trabalhabilidade da mistura asfáltica.

O TDI faz menção ao trabalho realizado pela ação do tráfego durante a vida de serviço do pavimento. Segundo Anderson et al. (2002), o limite de 98% da Gmm é aplicado no cálculo do TDI por tratar-se de uma densidade crítica, na qual a mistura está na zona de ruptura plástica. TDI é definido pelo valor da área entre as seguintes curvas: (i) a de compactação, (ii) a reta horizontal em que se observa 92% da Gmm e (iii) a reta vertical que cruza a curva de compactação quando a massa específica aparente aparente é equivalente a 98% da Gmm. Segundo Onofre et al. (2011), para algumas misturas com baixos percentuais de ligante, ou até um alto percentual de agregados graúdos, é utilizado o TDI modificado (TDI_m). Nesse caso, a curva de compactação deve atingir 96% da Gmm da mistura asfáltica.

Misturas com altos valores de TDI refletem uma boa resistência à deformação permanente (ANDERSON et al., 2002; NASCIMENTO, 2008; ONOFRE et al., 2011). Nascimento (2008) relatou que o TDI_m ,

assim como o TDI, apresenta boas correlações com resultados de ensaios de desempenho à deformação permanente. O autor recomenda, como critérios para a dosagem de misturas asfálticas densas em rodovias brasileiras de alto tráfego, valores de CDI superiores a 50 e de TDI maiores do que 400.

Para a compactação no Compactador Giratório Superpave, Prowell e Brown (2007) propõem caracterizar o intertravamento da mistura asfáltica, denominado *Locking point*, analisando os giros e a respectiva altura⁴ do corpo de prova.

Leandro et al. (2015) definem o *Locking point* como o ponto em que a estrutura de agregado começa a travar e números de giros adicionais resultam em maior potencial de quebra do agregado e pouca compactação adicional. Além deste ponto, a densidade das amostras continuará aumentando devido ao aumento da quantidade de partículas mais finas produzidas pela quebra das partículas maiores que irão preencher os espaços vazios da estrutura. Tal situação, em campo, gera superfícies de agregados não ligadas, que tornam a mistura mais suscetível ao dano por umidade e acelera a deterioração do pavimento (WATSON et al., 2008).

Prowell e Brown (2007) avaliaram o *Locking point* de quatro formas diferentes:

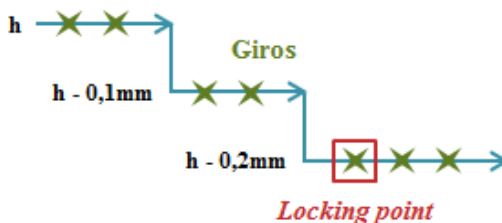
- i. Primeira ocorrência de três giros consecutivos em que a altura da amostra permaneceu constante e, precedida de duas ocorrências em que a altura se manteve inalterada para dois giros consecutivos (LP 3-2-2);
- ii. Primeira ocorrência em que a altura permaneceu constante para dois giros consecutivos;
- iii. Segunda ocorrência de dois giros consecutivos em que amostra não mudou de altura; e
- iv. A primeira ocorrência de dois giros consecutivos em que a amostra apresentou a mesma altura, precedida de duas ocorrências para dois giros consecutivos em que não houve alteração na altura do corpo de prova.

Os resultados indicaram que a primeira forma de considerar o *Locking point*, esquematizada na Figura 21, foi a que melhor reproduziu

⁴ Para determinação do *Locking point*, a altura deve ser expressa com precisão de décimo de milímetro (0,1 mm).

a massa específica aparente última de campo (PROWELL; BROWN, 2007). Os autores propuseram que o LP 3-2-2 poderia ser uma alternativa ao $N_{projeto}$ para seleção do teor de ligante, produzindo corpos de prova com 96% da Gmm (massa específica aparente máxima teórica). Contudo, Prowell e Brown (2006) advertem que ainda faltam mais estudos comprobatórios.

Figura 21 - Representação do *Locking point* 3-2-2



Nota: h é a altura do corpo de prova.

Fonte: Adaptado de Prowell e Brown (2007).

2.2.4.1 Influência dos materiais e da temperatura

A compactabilidade (ou trabalhabilidade) de uma mistura é influenciada pelo tipo e proporções do agregado, pelo teor de ligante, pela temperatura de mistura e de compactação, dentre outros fatores.

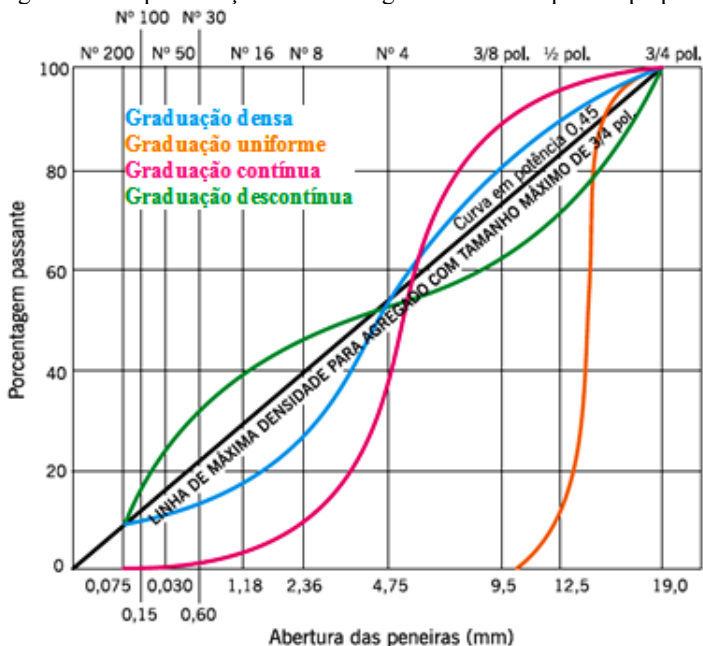
Agregados

Quanto aos agregados da mistura asfáltica, será abordado como a granulometria, a dimensão máxima dos agregados, a quantidade de materiais finos (filer), a forma e a rugosidade influenciam na compactabilidade da mistura.

A granulometria (faixa granulométrica) de uma mistura é a característica que define o tipo de mistura asfáltica, a finalidade e os objetivos de desempenho pretendidos. As granulometrias típicas das misturas asfálticas são representadas na Figura 22.

Micaelo (2008) complementa que a resistência à compactação é mínima para uma granulometria que conduz a máxima densidade. Em outras palavras, pode-se afirmar que há uma melhora da compactabilidade quanto mais contínua for a distribuição granulométrica da mistura.

Figura 22 - Representação das curvas granulométricas pelo Superpave



Adaptado de: Pavement Interactive (2009).

Segundo Bernucci et al. (2008), a faixa granulométrica para a densidade máxima mais conhecida é a curva de Fuller proposta por Fuller e Thompson em 1907. Esta pode ser obtida a partir da Equação 3.

$$P = \left(\frac{d}{D}\right)^n \quad (3)$$

Onde: P é a porcentagem de material que passa na peneira de diâmetro d; d é o diâmetro da peneira em questão; e D é o diâmetro máximo do agregado.

Os estudos de Fuller mostraram que a granulometria de densidade máxima pode ser obtida para um agregado quando $n = 0,50$. Na década de 1960, a *Federal Highway Administration* dos Estados Unidos adotou o expoente como 0,45 (FHWA, 1994).

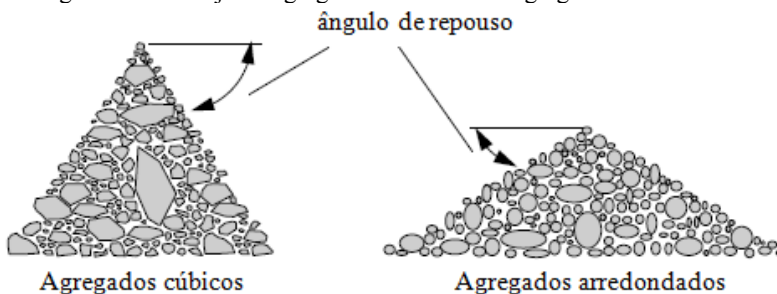
Ao analisar as amostras de compactadores giratórios, Dubois, De La Roche e Burban (2009) verificaram que misturas tipo HRA (*Hot Rolled Asphalt*) produzem corpos de prova mais homogêneos. Isso se

justifica porque misturas tipo HRA possuem uma pequena quantidade de agregados graúdos que são colocados dentro de uma matriz de areia, ou seja, uma granulometria mais uniforme.

A dimensão máxima do agregado ($D_{máx}$) exerce influência na compactação devido à sua relação com a espessura da camada, podendo ocorrer a formação de uma estrutura mineral inadequada devido ao impedimento da reorganização das partículas (FHWA, 1994). Estudos analisados por Micaelo (2008) apontam que a razão entre a espessura da camada e o diâmetro máximo do agregado ótimo deve estar entre 2,5 e 8.

Relativamente aos agregados graúdos, forma, rugosidade e número de faces fraturadas podem afetar a compactação. De acordo com *Pavement Interactive* (2010), texturas ásperas, agregados cúbicos e partículas altamente angulares (alta porcentagem de faces fraturadas) tendem a aumentar o esforço de compactação. Além do aumento da resistência à compactação, tem-se um maior entrosamento das partículas de agregado, que conduz ao aumento da rigidez da mistura (FHWA, 1994; MICAELO, 2008). A Figura 23 expõe a diferença de entrosamento das partículas de agregados cúbicos (mais resistente) e arredondados (menos resistente). Quanto maior o ângulo de repouso, maior a resistência ao cisalhamento.

Figura 23 - Arranjo de agregados cúbicos e de agregados arredondados



Fonte: Adaptado de FHWA (1994).

Hamzah, Von e Abdullah (2013) acrescentam que agregados geometricamente cúbicos tendem a proporcionar um melhor intertravamento das partículas. A ligação adequada entre os espaços adjacentes garante melhora a resistência do revestimento, uma vez que não é facilmente quebrável quando exposto a carga de compressão contínua.

DelRio-Prat et al. (2011), analisaram a influência da forma do agregado na energia de compactação necessária para atingir uma especificação de 5% de volume de vazios. Os autores concluíram que em misturas compactadas com o compactador giratório, a porcentagem de agregados arredondados tem uma influência muito maior do que a porcentagem e do tipo de ligante asfáltico sobre a energia necessária para se atingir a especificação. Misturas fabricadas com 92,5% de agregados arredondados exigem cerca de um sexto da energia que as misturas produzidas com agregados lamelares. Os casos mais aceitáveis, em que o teor de agregado de forma arredondada foi cerca de 15% pode conduzir a uma economia de energia de compactação de 40%.

Quanto à quantidade de finos (material passante na peneira de abertura 0,075 mm), Jönsson (2000), apud Micaelo (2008), faz referência a um estudo em que se concluiu que, em pequenas quantidades, o filer é benéfico à medida que torna a granulometria contínua.

Para misturas asfálticas densas, pequenas porcentagens de filer (em torno de 3 a 5%) melhoram a adesividade do ligante aos agregados. No entanto, para quantidades elevadas de filer, a rigidez do mástique aumenta tornando a mistura menos compactável (PAVEMENT INTERACTIVE, 2010).

Ligante asfáltico e temperatura

Segundo *Pavement Interactive* (2010), o ligante asfáltico afeta a compactação conforme a viscosidade. Um ligante mais viscoso e/ou mais envelhecido resulta numa mistura que é mais resistente à compactação.

A temperatura interfere na resistência à compactação uma vez que afeta a viscosidade do ligante (MICAELO, 2008). Para temperaturas menores o ligante é muito viscoso e aumenta a resistência ao movimento das partículas enquanto para temperaturas mais elevadas, como a viscosidade é baixa, a película de recobrimento não atua e o atrito entre as partículas dificulta o movimento do agregado. Assim para ligantes demasiadamente viscosos, a compactação torna-se extremamente difícil, pois a coesão da mistura impede a reorganização das partículas durante a compactação. Da mesma forma, um ligante pouco viscoso permite o maior contato entre partículas, dificultando a sua ação lubrificante, o que conduz a um aumento da resistência à compactação.

Quanto ao teor de ligante, misturas com baixo teor de ligante são geralmente difíceis de compactar devido à lubrificação insuficiente (PAVEMENT INTERACTIVE, 2010). Por outro lado, o excesso de

ligante diminui a resistência à compactação, mas também pode ocorrer a exsudação além de tornar o material mais suscetível à formação das trilhas de roda.

2.2.5 Controle da compactação

O controle da compactação é realizado por meio da verificação de variáveis que de alguma forma se relacionam com a compactação, como por exemplo, a massa específica. A partir desta é possível definir o grau de compactação e o volume de vazios da mistura asfáltica compactada.

O grau de compactação (GC) é a variável de controle mais utilizada no Brasil, prevista pela norma de especificação de serviço do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) - 031/2006. O GC é obtido pela razão entre a massa específica aparente da mistura compactada e a massa específica aparente de projeto, conforme a Equação 4.

$$GC = \frac{\gamma_{campo}}{\gamma_{projeto}} \times 100 \quad (4)$$

Onde: GC é o grau de compactação (%); γ_{campo} é a massa específica aparente de corpos de prova extraídos da mistura espalhada e compactada na pista; e, $\gamma_{projeto}$ é a massa específica aparente da mistura determinada em laboratório.

Os métodos laboratoriais de medição da massa específica podem ser divididos em tradicionais e inovadores. Os tradicionais utilizam-se da relação física e calculam a massa específica como a razão da massa pelo volume do corpo de prova enquanto os inovadores utilizam equipamentos especiais como ondas eletromagnéticas de alta frequência (FAUCHARD et al., 2013). Alguns compactadores giratórios fornecem simultaneamente à compactação, o número de giros e a respectiva massa específica aparente⁵ do material.

⁵ A massa específica aparente estimada pelo CGS instantaneamente difere da massa específica aparente medida.

2.3 ANÁLISE DA ESTRUTURA INTERNA DE MISTURAS ASFÁLTICAS

A estrutura interna de uma mistura asfáltica é influenciada por alguns fatores, incluindo a granulometria, distribuição e forma dos agregados, o teor de asfalto e a condição de compactação. Segundo Zhang et al. (2008), a estrutura interna da mistura exerce um papel importante no desempenho do revestimento asfáltico em relação à deformação permanente, à fadiga e ao trincamento térmico. Masad et al. (1999) afirmaram que os diferentes métodos e esforços de compactação são responsáveis pelo arranjo dos agregados. A formação do esqueleto mineral resulta da forma com que esses agregados são distribuídos na mistura (orientação) e da presença de zonas de contato entre as partículas (VASCONCELOS; EVANGELISTA JR.; SOARES, 2005). Segundo Bahia (2013), o esqueleto mineral exerce uma função importante no desempenho do concreto asfáltico, uma vez que a resistência ao cisalhamento (relacionada à deformação permanente) depende do intertravamento dos agregados.

Diferentes métodos de compactação podem produzir misturas asfálticas com características diferentes, tais como: distribuição de vazios, orientação dos agregados e posicionamento das zonas de contato entre as partículas. A diferença nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas com a mesma dosagem, porém compactadas por métodos diferentes, têm sido atribuída principalmente à distribuição e orientação dos agregados graúdos (YUE et al., 1995 apud MASAD et al., 2009). Sendo assim, para analisar e realizar a previsão do desempenho de uma determinada mistura asfáltica, Vasconcelos, Evangelista Jr. e Soares (2005) afirmaram que é necessário que as amostras de laboratório sejam fabricadas de forma a simular a compactação que ocorre no campo. Essa simulação está relacionada com a estrutura interna do material, ou seja, é indispensável considerar a natureza heterogênea do material.

Sefidmazgi (2011) afirma que há dois principais enfoques de análise da estrutura interna de uma mistura asfáltica: (i) esqueleto mineral e (ii) distribuição e quantificação dos vazios de ar. Na abordagem do esqueleto mineral, pressupõe-se que a carga aplicada é transferida pelos contatos existentes entre as partículas de agregado. Enquanto que no enfoque dos vazios de ar, o comportamento do material é controlado pela concentração de tensões em torno dos vazios, que se assume serem deficiências em um material contínuo. Neste trabalho, foi utilizada a abordagem do esqueleto mineral posto que

investigar os vazios de ar constitui uma limitação tanto do sistema de aquisição de imagens (escaneamento de imagens bidimensionais), quanto do *software* utilizado para caracterizar a estrutura interna da mistura asfáltica.

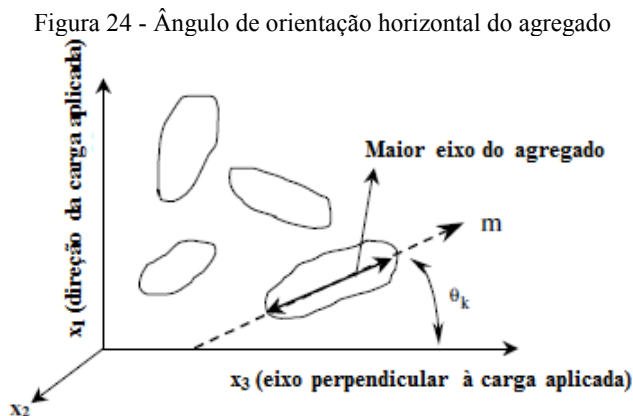
2.3.1 Orientação das partículas

A orientação das partículas de agregado é analisada, na estrutura interna de uma mistura asfáltica, por meio dos parâmetros: ângulo médio de orientação; ângulo médio absoluto de orientação e vetor magnitude de orientação (Δ). Dependendo do formato da seção analisada e da finalidade (comparar diferentes métodos de compactação, por exemplo), podem ser avaliados os ângulos de orientação horizontais ou radiais.

Ângulo de orientação

A orientação de um agregado, apresentada na Figura 24, é a medida angular existente entre o maior eixo de uma partícula e o eixo horizontal ou radial. Esse eixo é definido pela maior distância entre dois pontos do contorno da partícula (MASAD et al., 1999; TASHMAN et al., 2001). A Figura 24 exemplifica o ângulo de orientação horizontal (θ_k) do agregado em uma seção transversal (vertical).

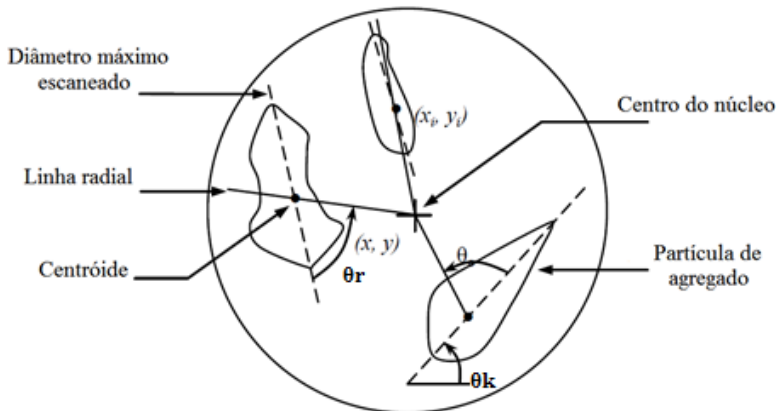
Em seções transversais, um ângulo médio de orientação horizontal menor do que 45° indica que há uma orientação preferencial dos agregados no plano horizontal (TASHMAN et al., 2001; HAMZAH; VON; ABDULLAH, 2013).



Fonte: Adaptado de Tashman et al. (2005).

A diferença entre os ângulos de orientação horizontal e radial é apresentada na Figura 25. Os ângulos de orientação horizontal e radial são representados pela simbologia θ_k e θ_r , respectivamente.

Figura 25 - Orientação das partículas do agregado em uma seção circular



Fonte: Adaptado de Hassan, Airey e Kahn (2012).

O ângulo de orientação radial dos agregados, designado por θ_r , é utilizado para avaliar o efeito de borda e varia de 0° a 90° (isto é, o menor ângulo entre a linha radial e o maior eixo do agregado). Se este ângulo for igual a 0° , significa que as partículas estão alinhadas na direção radial; se for igual a 90° , as partículas estão alinhadas na direção circunferencial, isto é, paralelas à circunferência do molde (HUNTER; AIREY; COLLOP, 2004).

Vetor magnitude

Com os valores do ângulo horizontal de orientação de cada partícula é possível quantificar a distribuição direcional dos agregados por meio do parâmetro vetor magnitude (Δ), como mostra a Equação 5.

$$\Delta = \left(\frac{100}{N}\right) \times \sqrt{(\sum \sin 2\theta_k)^2 + (\sum \cos 2\theta_k)^2} \quad (5)$$

Onde: Δ é o vetor magnitude, em %; θ_k é o ângulo com a horizontal de um agregado isolado e N é o número de agregados analisados na imagem.

O vetor magnitude descreve a orientação preferencial das partículas de agregados e, teoricamente, varia entre zero (0 ou 0%) e um (1 ou 100%). Um valor zero indica que os agregados estão distribuídos de forma completamente aleatória, que é análogo aos materiais isotrópicos; e um valor igual a uma unidade indica que os agregados estão totalmente orientados em uma direção, que é análogo aos materiais anisotrópicos perfeitamente transversais (SEFIDMAZGI, 2011; MASAD et al., 2009; TASHMAN et al., 2001).

De acordo com Tashman et al. (2001), a anisotropia é causada pela distribuição não-uniforme dos constituintes da microestrutura. Em materiais anisotrópicos as propriedades mecânicas variam conforme a disposição de suas partículas.

Para Tashman et al. (2005), quanto mais anisotrópica (maior vetor magnitude) for a distribuição dos agregados, mais resistente será o material na direção da carga aplicada. Isso ocorre, pois o aumento da anisotropia reflete em um aumento na orientação preferencial do agregado na direção perpendicular à carga aplicada. Como os agregados tendem a se orientar mais na direção perpendicular à carga aplicada, as direções normais dos contatos de agregados tendem a aproximar-se da direção da carga aplicada, aumentando assim a resistência.

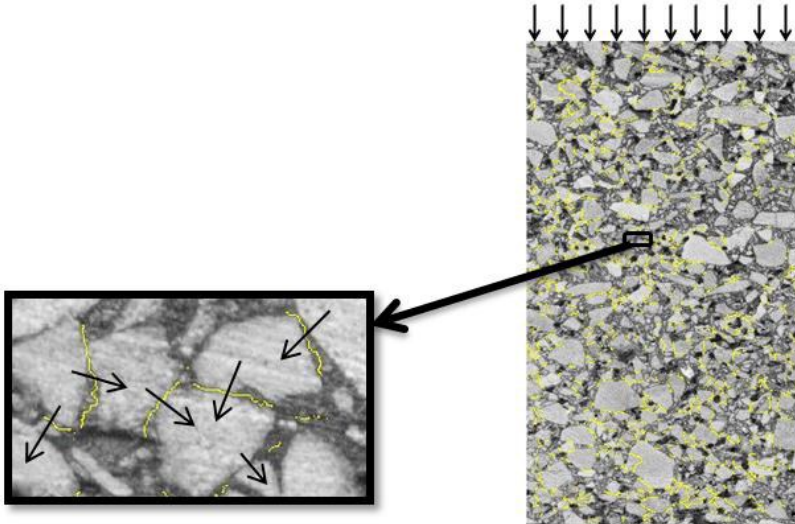
2.3.2 Zonas de contato

A quantidade de zonas de contatos entre agregados em uma mistura asfáltica representa a conectividade do esqueleto mineral. O aumento do número de zonas de contato conduz a uma melhor distribuição de tensões no material. De acordo com Sefidmazgi (2011), a eficácia de um contato entre agregados adjacentes depende do comprimento do contato e de sua orientação. Um aumento do comprimento de contato aumenta o atrito e o intertravamento entre agregados. A orientação do contato define a efetividade dos contatos em relação à distribuição das tensões decorrentes da aplicação de uma carga. Quanto mais próxima a orientação do contato for do sentido da orientação normal, mais eficaz será o contato na resistência à carga axial, conforme ilustrado na Figura 26.

No *software* IPAS-2, a ocorrência de um ponto de contato entre dois agregados é estabelecida quando os *pixels* dos perímetros desses estiverem separados um do outro a uma distância máxima a ser definida pelo usuário no *software*, conforme esquematizado na Figura 27. Bessa

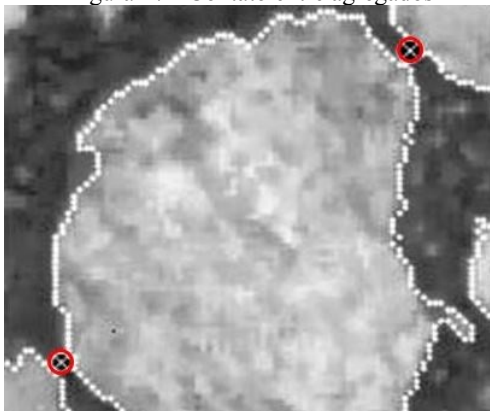
(2012) adotou a distância entre perímetros dos agregados menor ou igual a 0,5 mm, que é o valor padrão adotado pelo *software*. Outras pesquisas não relatam os valores adotados.

Figura 26 - Linhas de contato e orientação em uma mistura asfáltica



Nota: As linhas de contatos normais (90°) são mostradas com setas.
Fonte: Sefidmazgi, Tashman e Bahia (2012).

Figura 27 - Contato entre agregados



Fonte: Adaptado de Bahia (2013).

Ao analisar as zonas de contato no *software* Ipas-2, podem ser quantificados:

- O número de zonas/regiões de contato por área de imagem analisada (convencionou-se 100 cm²);
- O somatório dos comprimentos, em milímetros, de contatos por área;
- O ângulo médio de orientação do contato em relação à horizontal;
- O ângulo médio absoluto de orientação do contato em relação à horizontal;
- O vetor magnitude da distribuição da orientação dos contatos (Δ_c), cujo cálculo é análogo ao vetor magnitude da orientação dos agregados (Δ), descrito pela Equação 5.

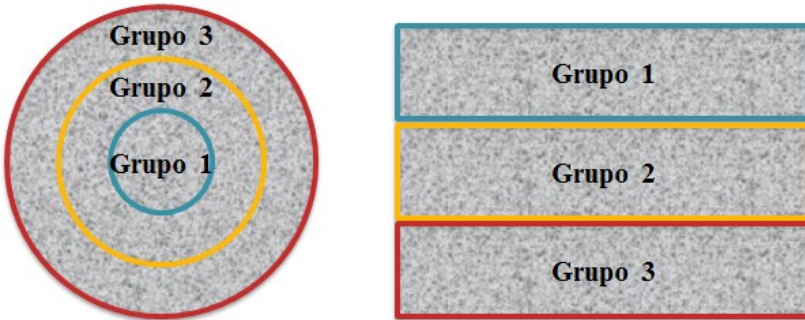
Sefidmazgi (2011) afirma que o número de contatos entre os agregados, o comprimento de contato por área e a orientação dos contatos, obtidos de imagens paralelas ao sentido de aplicação da carga (cortes verticais), eram os parâmetros que ditavam a resistência à deformação permanente de misturas asfálticas. Os resultados obtidos mostraram que os parâmetros número de contatos, comprimento de contato e orientação do contato foram capazes de capturar as diferenças na estrutura interna de diferentes misturas (SEFIDMAZGI; TASHMAN; BAHIA, 2012). Contudo, a resistência à deformação permanente (*flow number test*) de uma mistura melhor se correlaciona com uma combinação de parâmetros da estrutura interna (comprimento de contato e orientação do contato), denominado índice ISI (*Internal Structure Index*).

2.3.3 Segregação das partículas

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 em um grau suficiente para acelerar os defeitos do pavimento (STROUP-GARDINER; BROWN, 1998 apud MASAD et al., 2009). Segundo Masad et al. (1999), a segregação não é desejada, uma vez que misturas com agregados segregados tendem a um desempenho mecânico inferior ao esperado. A Figura 28 ilustra os grupos de segregação Grupo 1 (G1), Grupo 2 (G2) e

Grupo 3 (G3), padronizados pelo *software* IPAS-2, em cortes de corpos de prova.

Figura 28 - Grupos de segregação radial e vertical



Fonte: Adaptado de Bahia (2013).

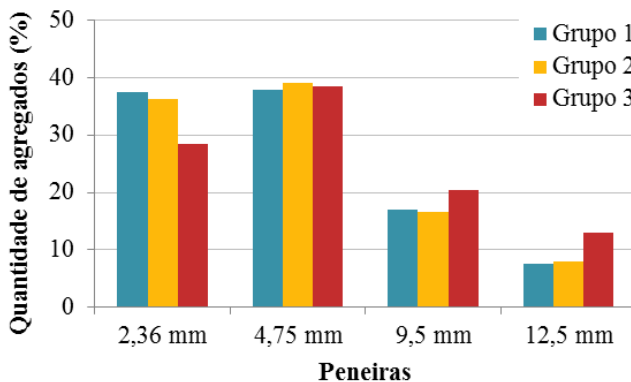
Em relação à segregação radial das partículas: (i) grupo 1, relativo ao círculo mais interno, de raio igual a um terço do raio da superfície do corpo de prova; (ii) grupo 2, relativo ao anel intermediário, de raio igual a dois terços do raio do corpo de prova; e (iii) grupo 3, relativo ao anel da borda externa, de raio igual ao raio do corpo de prova.

Quanto à segregação vertical das partículas: (i) grupo 1, relativo à fatia inferior, de altura igual a um terço da altura do corpo de prova; (ii) grupo 2, relativo à fatia intermediária, de altura igual a um terço da altura do corpo de prova; e (iii) grupo 3, relativo à fatia superior, de altura igual a um terço da altura do corpo de prova.

Convém salientar que os três grupos de segregação são fixos e definidos pelo software independente do raio/área de imagem analisada. Assim, tem-se uma análise distorcida em relação aos grupos, pois, a área ocupada por um grupo não é representativa. Não há uma proporcionalidade/relação entre a área dos grupos e o tamanho dos agregados. Agregados graúdos e grupos de áreas reduzidas implicam em análises não representativas e distorcidas.

A segregação é apresentada pelo *software* por meio de histogramas de frequência, como exemplificado na Figura 29. Vasconcelos, Evangelista Jr. e Soares (2005) concluíram que esta análise qualitativa mostrou-se ineficaz ao tentar conclusões sobre algum padrão de distribuição das partículas.

Figura 29 - Histograma de frequências para análise da segregação



Fonte: Autoria própria.

Ibrahim, Mahmoud e Ali (2013) propuseram um parâmetro quantitativo para a segregação avaliada pelo *software* IPAS. O Índice de Segregação (IS) é calculado com base na distribuição dos agregados nas três regiões, radiais ou verticais, tal como definido na Figura 29. Em cada região, o *software* calcula a porcentagem ocupada por cada tamanho de agregado (conforme a série de abertura de peneiras da AASHTO). A média e o desvio padrão da porcentagem ocupada por cada tamanho de agregado entre as três regiões são utilizados para calcular o coeficiente de variação. Um maior coeficiente de variação indica um elevado nível de segregação, enquanto que uma distribuição uniforme nas três regiões irá resultar num desvio padrão zero (nenhuma segregação). O índice de segregação (IS) é calculado pela Equação 6.

$$IS = \sum CV_i \times D_i \quad (6)$$

Onde: D é o tamanho do agregado (peneira retida) em mm; CV é o coeficiente de variação do agregado *i* nas três regiões de segregação; e *i* é o tamanho do agregado (peneira retida).

Para Hunter, Airey e Collop (2004), uma mistura asfáltica com granulometria contínua deve possuir uma distribuição uniforme de seus agregados. No entanto, os processos de compactação em laboratório tornam inevitável a segregação das partículas, devido à dificuldade em depositar uniformemente a mistura quente nos moldes.

Hamzah, Von e Abdullah (2013) acrescentam que a segregação pode ocorrer se, na etapa anterior à compactação, a mistura asfáltica não

for corretamente manuseada. Assim sendo, recomenda-se que a mistura seja homogeneizada, em laboratório, após ser retirada da estufa e antes de ser colocada nos moldes e, preferencialmente, que a mistura seja vertida no molde de uma mesma altura.

Convém destacar que no campo também se tem a dificuldade de depositar a mistura asfáltica de forma homogênea e uniforme. Isto ocorre porque a mistura tende a segregar no caminhão durante o transporte da usina para o local de aplicação.

2.3.4 Estudos realizados acerca da análise da estrutura interna de misturas asfálticas

A seguir, são relatados alguns estudos realizados sobre análise da estrutura interna (notadamente a macroestrutura) de misturas asfálticas.

Masad et al. (1999)

Os autores analisaram misturas asfálticas compactadas no compactador giratório e em campo a partir de imagens obtidas por câmera fotográfica. Corpos de prova de 15 cm de diâmetro foram seccionados verticalmente em quatro partes (três cortes equidistantes).

- Orientação dos agregados

No compactador giratório, foi verificada uma tendência de orientação uniforme dos agregados com o aumento do esforço de compactação das misturas asfálticas até 100 giros. A partir de 100 giros, a estrutura de agregados começa a ter uma orientação que pode ser considerada aleatória. Ao comparar misturas compactadas com o CGS e amostras extraídas do campo, os autores concluíram que, para atingir o grau de orientação *in situ* é necessário um número de giros mais elevado do que o necessário para obter o volume de vazios ($V_v\%$) especificado. O volume de vazios das amostras no campo foi obtido com aproximadamente 25 giros, e o vetor magnitude com 100 giros. Com 100 giros, o volume de vazios das amostras investigadas era a metade do volume de vazios de projeto.

- Segregação

A segregação dos agregados foi avaliada através de dois procedimentos que apresentaram resultados próximos. O primeiro método consistiu na divisão da imagem em quatro quadrantes e o cálculo do diâmetro médio dos agregados no respectivo quadrante. A variação do diâmetro médio nos quadrantes foi utilizada para quantificar a segregação. No segundo procedimento, a distribuição dos agregados

foi comparada com a distribuição estatística de Poisson. Estes autores verificaram que as amostras extraídas do campo possuíam agregados mais segregados, ou seja, eram misturas menos homogêneas se comparadas àquelas produzidas em laboratório. Essa segregação não é desejada, uma vez que misturas com agregados segregados tendem a um desempenho mecânico inferior ao esperado. Embora se deva buscar a melhor compactação, é importante ter em mente que a compactação realizada em laboratório deve simular a compactação em campo. A caracterização mecânica de misturas parte deste pressuposto, qual seja, que propriedades estão sendo obtidas de um material semelhante ao que estará em serviço.

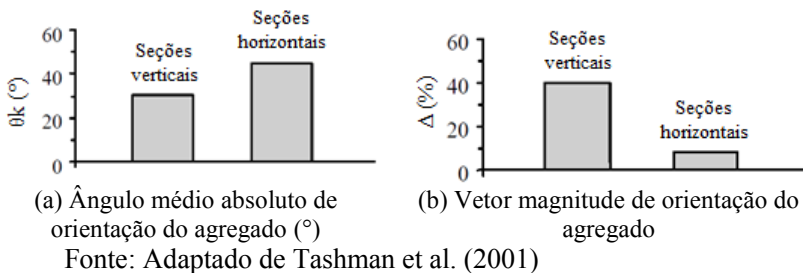
Tashman et al. (2001)

Três seções teste em campo (localizadas no estado de Ohio nos Estados Unidos) foram construídas utilizando diferentes padrões de compactação (combinações de rolos compactadores vibratório e estático). A fim de determinar a melhor combinação de variáveis internas que simulam compactação no campo, corpos de prova foram moldados no CGS utilizando diferentes valores para ângulo de rotação (1,25°; 1,5° e 2°), pressão aplicada (400, 600 e 800 kPa), altura da amostra (50, 75 e 135mm) e temperatura do molde (149°C e 175°C, sendo a temperatura de compactação igual a 149°C). Foram extraídos de cada seção teste seis amostras para a análise da estrutura interna da mistura asfáltica. A mesma mistura, produzida na usina e compactada em campo, foi transferida para o laboratório para a moldagem dos corpos de prova no CGS. Foram moldados dois corpos de prova (um para cortes verticais e um para cortes horizontais) para cada combinação de ângulo, pressão e altura do corpo de prova. As imagens foram obtidas de cortes verticais e horizontais; para cada situação, foram realizados dois cortes no corpo de prova resultando em quatro imagens. Para a análise da macroestrutura da mistura asfáltica, foram considerados os agregados com diâmetros maiores do que 4,75mm. Foram seccionados três corpos de prova em cada sentido, vertical e horizontal, e cada um dos corpos de prova foi moldado em um ângulo de inclinação do eixo do CGS (1,25; 1,5 e 2°).

- Orientação dos agregados

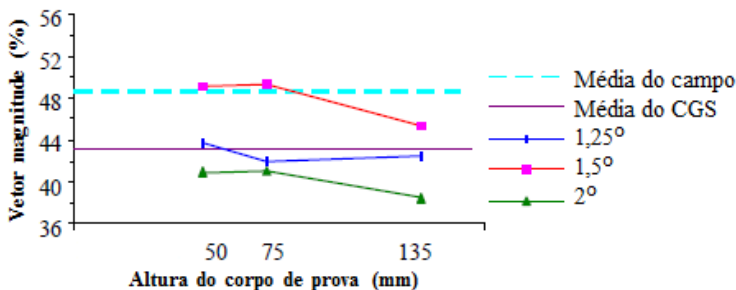
O ângulo médio absoluto de orientação dos agregados foi menor nas seções verticais, como pode ser visualizado na Figura 30. O estudo mostrou que existe uma anisotropia transversal, isto é, ocorre uma orientação preferencial dos agregados graúdos no plano horizontal.

Figura 30 - Comparação da orientação dos agregados nas seções horizontais e verticais



A orientação dos agregados (ângulo médio absoluto e vetor magnitude) sofre maior influência com a variação da inclinação do eixo de rotação e da altura do corpo de prova. Diferentes pressões interferem na densificação ou consolidação do corpo de prova. O ângulo médio de orientação do agregado não foi afetado pelos diferentes modos de compactação, indicando que a anisotropia transversal permanece inalterada independente das variáveis de compactação. Dentre as pressões ensaiadas (400, 600 e 800 kPa), a pressão de compactação igual a 600 kPa foi a que produziu corpos de prova mais semelhantes com o campo. Para esta pressão, corpos de prova moldados com 50 e 75 mm de altura com o ângulo de inclinação do eixo $1,5^\circ$ foram os que apresentaram os valores de vetor magnitude de orientação do agregado (Figura 31) e de ângulo médio absoluto de orientação dos agregados (Figura 32) mais próximos do campo. Os autores ressaltam que essa conclusão não pode ser generalizada uma vez que foi testada para um tipo de mistura.

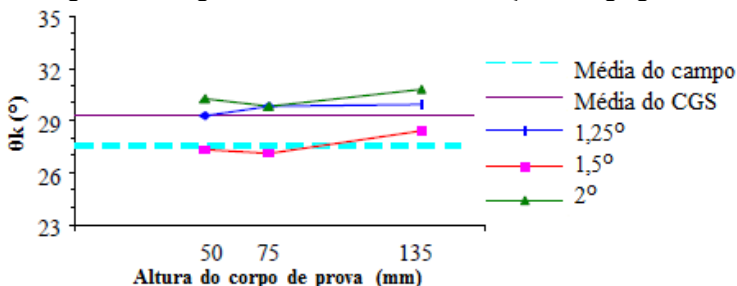
Figura 31 - Vetor magnitude de orientação dos agregados



Nota: pressão de compactação 600 kPa.

Fonte: Adaptado de Tashman et al. (2001)

Figura 32 - Ângulo médio absoluto de orientação dos agregados



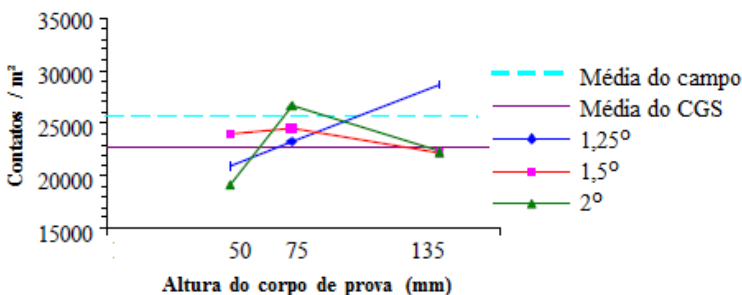
Nota: pressão de compactação 600 kPa.

Fonte: Adaptado de Tashman et al. (2001)

- Zonas de contato

O número de contatos entre os agregados de uma mistura depende dos parâmetros (ângulo de inclinação, altura do molde) e dos métodos de compactação. Em geral, as amostras do campo apresentaram mais pontos de contato (por área) do que os corpos de prova produzidos no CGS, conforme mostra a Figura 33. Os corpos de prova moldados no CGS com altura de 135 mm apresentaram o ângulo médio absoluto de inclinação das linhas de contato mais semelhantes com o campo, apresentado na Figura 34. O valor do vetor magnitude dos contatos, exposto na Figura 35, apresentou uma diminuição com o aumento da altura do corpo de prova.

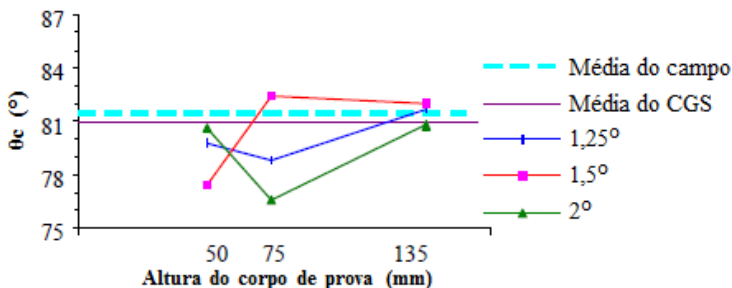
Figura 33 - Número de zonas de contatos



Nota: pressão de compactação 600 kPa.

Fonte: Adaptado de Tashman et al. (2001)

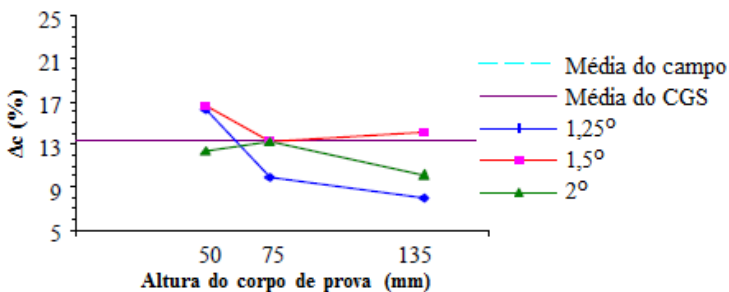
Figura 34 - Ângulo médio absoluto da direção dos contatos



Nota: pressão de compactação 600 kPa.

Fonte: Adaptado de Tashman et al. (2001)

Figura 35 - Vetor magnitude da distribuição dos contatos



Nota: pressão de compactação 600 kPa.

Fonte: Adaptado de Tashman et al. (2001)

- Segregação

Quanto à segregação radial, Tashman et al. (2001) observaram que não houve diferença significativa entre as seções de teste no campo e as amostras produzidas no CGS. Contudo, os corpos de prova produzidos no CGS apresentaram maiores índices de segregação quando comparados ao campo. Os agregados graúdos tendem a se localizar na parte mais externa da seção horizontal de um corpo de prova, quando estes são compactados no CGS. Este fato não aconteceu em amostras extraídas do campo, nas quais os agregados se encontravam menos segregados.

Hunter, Airey e Collop (2004)

Hunter, Airey e Collop (2004) investigaram a compactação de uma mistura asfáltica típica utilizada no Reino Unido em três

compactadores distintos: giratório⁶, vibratório e compactador de placas. Foram produzidos dez corpos de prova de diâmetro igual a 150 mm em cada compactador, giratório e vibratório. Foram moldadas cinco placas de 300 x 300 x 100 mm, das quais foram extraídos dois corpos de prova cilíndricos (diâmetro igual a 150 mm) por placa. Cada corpo de prova ou amostra extraída foi seccionado em dois cortes horizontais a fim de investigar a orientação e distribuição dos agregados no plano horizontal e verificar a ocorrência de um alinhamento circunferencial.

- Orientação dos agregados

A orientação das partículas é induzida pela presença de condições de contorno de confinamento. Neste sentido, placas de misturas asfálticas compactadas apresentaram um ângulo de orientação radial menor do que misturas produzidas nos compactadores giratório e vibratório. Corpos de prova compactados no compactador giratório possuem menor grau de liberdade de organização (orientação) devido aos esforços vertical (pressão de compactação) e horizontal (cisalhamento induzido pela inclinação do eixo de rotação) combinados.

- Segregação

Os métodos de compactação giratória e vibratória induzem a uma maior ocorrência de segregação se comparados aos métodos de fabricação de placas. A compactação vibratória pode induzir a uma migração das partículas de agregado para as bordas do corpo de prova.

Vasconcelos, Evangelista Jr. e Soares (2005)

Foram analisadas três diferentes granulometrias contínuas enquadradas na faixa C do DNIT. Foram moldados cinco corpos de prova com diâmetro de 100 mm no teor ótimo de ligante para cada mistura e método de compactação (Marshall e CGS). No CGS, foram adotados os parâmetros pressão 600 kPa, 30 rpm e ângulo igual a 1,25°. Os corpos de prova sofreram dois cortes horizontais, totalizando 4 imagens por corpo de prova e 20 imagens por mistura. As imagens foram analisadas pelo *software* Imagetool.

- Orientação dos agregados

Foram analisados agregados maiores do que 2 mm (retidos na peneira número 10). A orientação dos agregados foi quantificada por

⁶ Parâmetros operacionais do equipamento normatizados pela AASHTO: ângulo de inclinação do eixo de rotação 1,25°; pressão de compactação 600 kPa e velocidade de rotação 30 rpm.

meio do vetor magnitude e do ângulo médio de orientação horizontal (θ_k). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores de vetor magnitude e ângulo de orientação

<i>Mistura</i>	<i>ARZ</i>		<i>BRZ</i>		<i>TRZ</i>	
	Δ	θ_k (°)	Δ	θ_k (°)	Δ	θ_k (°)
<i>Marshall</i>	0,18	45	0,15	45	0,12	44
<i>CGS</i>	0,18	46	0,16	46	0,14	43

Fonte: Vasconcelos, Evangelista Jr. e Soares (2005).

O vetor magnitude mostrou-se superior para a compactação giratória em relação à compactação por impacto, caracterizando misturas com distribuição mais randômica para a compactação Marshall. Porém, dos resultados obtidos concluiu-se que, tanto a compactação Marshall quanto a compactação giratória (realizada pelo CGS) geraram misturas com agregados aleatoriamente orientados. Observou-se que a média dos ângulos foi similar para as misturas, não sendo influenciada pela forma de compactação.

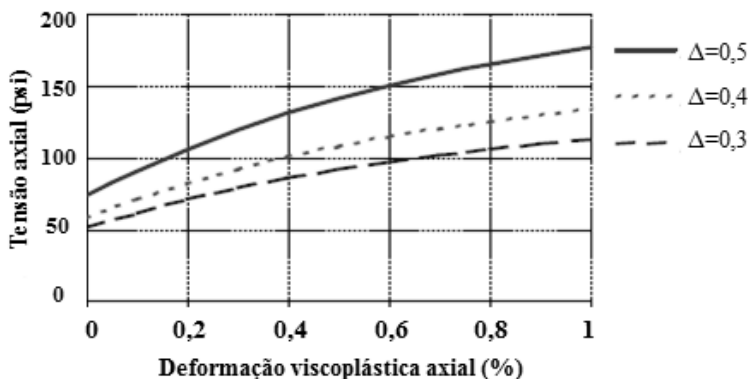
- Segregação

A segregação radial foi avaliada em cinco setores, cada um com 10 mm de raio. Para a análise qualitativa, a segregação foi descrita por meio de histogramas de frequência. Quanto à segregação radial dos agregados retidos nas peneiras 1/2” e 3/8”, ocorreu uma menor variabilidade para as misturas compactadas no CGS. As partículas menores (retidas nas peneiras N° 4 e N° 10) encontravam-se mais uniformemente distribuídas do que as partículas maiores. A medida que se diminui o tamanho dos agregados, a distribuição destes tende a ser mais uniforme, não existindo diferença entre os métodos de compactação Marshall e CGS.

Tashman et al. (2005)

Tashman et al. (2005) avaliaram se ocorre alteração da anisotropia (variação do vetor magnitude) com a deformação do material, obtida por meio de ensaios. Os resultados mostraram que não houve alteração significativa do vetor magnitude com a deformação das amostras ensaiadas. Também foram submetidos a um carregamento axial três corpos de prova com diferentes vetores magnitude (0,3; 0,4 e 0,5). Como mostra a Figura 36, quanto mais anisotrópica for a distribuição dos agregados, mais resistente será o material na direção da carga aplicada.

Figura 36 - Efeito da anisotropia na relação tensão-deformação



Fonte: Adaptado de Tashman et al. (2005)

Zhang et al. (2008)

Zhang et al. (2008) avaliaram a anisotropia de quatro misturas asfálticas com granulometrias distintas, compostas de agregados obtidos na construção de uma rodovia nacional na China. Corpos de prova foram produzidos nos compactadores giratório (CGS) e vibratório. As imagens foram obtidas por câmera fotográfica e os agregados analisados foram aqueles com diâmetro superior a 2,36 mm.

- Orientação dos agregados

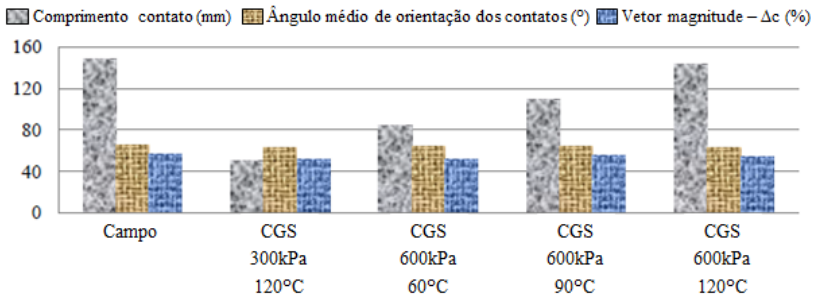
Para as quatro granulometrias, o ângulo médio de orientação do agregado obtido foi menor nos corpos de prova compactados no CGS enquanto que o vetor magnitude foi menor nos corpos de prova compactados no compactador vibratório. As partículas possuíam uma orientação preferencial na direção horizontal nos corpos de prova compactados no CGS, enquanto amostras produzidas no compactador vibratório possuíam agregados mais aleatoriamente distribuídos.

Sefidmazgi (2011)

Sefidmazgi (2011) analisou amostras compactadas no campo (extraídas de um trecho da rodovia americana US 53) e no CGS em diferentes temperaturas e pressões. Amostras de uma mistura asfáltica com granulometria aberta foram compactadas com pressão de 600 kPa (a 120°C, 90°C e 60°C) e de 300 kPa a 60°C. As imagens analisadas foram obtidas de 3 cortes verticais equidistantes em amostras cilíndricas com 10 cm de diâmetro. O parâmetro comprimento de contato foi capaz de capturar o esforço e a temperatura de compactação. A média do

ângulo de orientação dos contatos e o vetor magnitude não apresentaram diferenças significativas, como mostra a Figura 37.

Figura 37 - Efeito do esforço e da temperatura de compactação nos parâmetros da estrutura interna



Fonte: Adaptado de Sefidmazgi (2011).

Bessa, Castelo Branco e Soares (2012)

Bessa, Castelo Branco e Soares (2012) utilizaram o processamento digital de imagens para caracterizar agregados naturais (de origem granítica) e alternativos (escória de aciaria e resíduo de construção e demolição - RCD) além das misturas asfálticas constituídas desses agregados. Foram fabricadas quatro misturas distintas: (I) mistura densa composta por agregado granítico; (II) mistura densa composta por 50% agregado granítico e 50% agregado RCD; (III) mistura densa composta por 50% agregado granítico e 50% agregado escória de aciaria e; (IV) mistura tipo SMA (*Stone Matrix Asphalt*) composta por agregado granítico. Os autores ressaltaram que, devido à cor acinzentada da escória e às limitações do *software*, houve dificuldade de se diferenciar, na imagem digitalizada, os agregados de escória do ligante. Foram compactados corpos de prova no CGS e na mesa compactadora tipo LCPC. Para a análise de imagens, foram extraídos corpos de prova com diâmetro de 100 mm e esses seccionados em dois cortes horizontais ou um corte vertical. Foram analisados doze corpos de prova por mistura.

- Orientação dos agregados

A distribuição da orientação dos agregados foi analisada por meio do vetor magnitude, apresentados na Tabela 5. O processamento digital da imagem foi realizado pelo *software* Imagetool. Foram considerados agregados graúdos e miúdos na análise.

Tabela 5 - Valores de vetor magnitude (seções horizontais e verticais)

Δ (%)	Seção	Compactador giratório Superpave		Mesa compactadora tipo LCPC	
		Mistura I	Mistura II	Mistura I	Mistura II
Média	Horizontal	55,4	48,2	53,2	52,3
CV (%)		4,7	3,8	15,7	5,3
Média	Vertical	32,0	33,8	52,8	51,6
CV (%)		3,0	6,5	4,1	8,0

Fonte: Adaptado de Bessa, Castelo Branco e Soares (2012).

Pôde-se observar que as amostras extraídas das placas apresentaram características semelhantes em ambas as direções. Estes materiais tendem a ser isotrópicos, isto é, as distribuições dos agregados são semelhantes em ambos os sentidos. Para corpos de prova produzidos no CGS, não houve uniformidade para o vetor magnitude para ambos os sentidos. As seções horizontais apresentaram resultados mais semelhantes aos encontrados para as amostras das placas. As misturas I (agregados graníticos) e II (agregados graníticos e de RCD) apresentaram resultados semelhantes, independente do método de compactação. A mistura tipo SMA (mistura IV) apresentou um vetor magnitude 16% maior do que a mistura densa com agregado granítico (mistura I).

- Zonas de contato

Na análise dos pontos de contatos⁷, realizada pelo *software Digital Image Analysis System*, foram analisados os agregados graúdos (diâmetro maior do que 4,75 mm). Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 6. O número de contatos entre as partículas dos agregados foi mais elevado (12%) para a mistura tipo SMA. As amostras extraídas das placas apresentaram mais pontos de contato (12%), quando comparadas com a mistura compactada no CGS (mistura I). Para as misturas compostas por agregados RCD (mistura II), as amostras compactadas usando ambos os métodos apresentaram resultados semelhantes. Os valores de coeficiente de variação (CV) distintos indicaram que os

⁷ A versão 1 do *software* IPAS não possuía a opção de análise do comprimento de contato. Sendo, portanto, utilizado a terminologia ponto de contato.

diferentes métodos de compactação produzem amostras com características distintas.

Tabela 6 - Número de pontos de contato

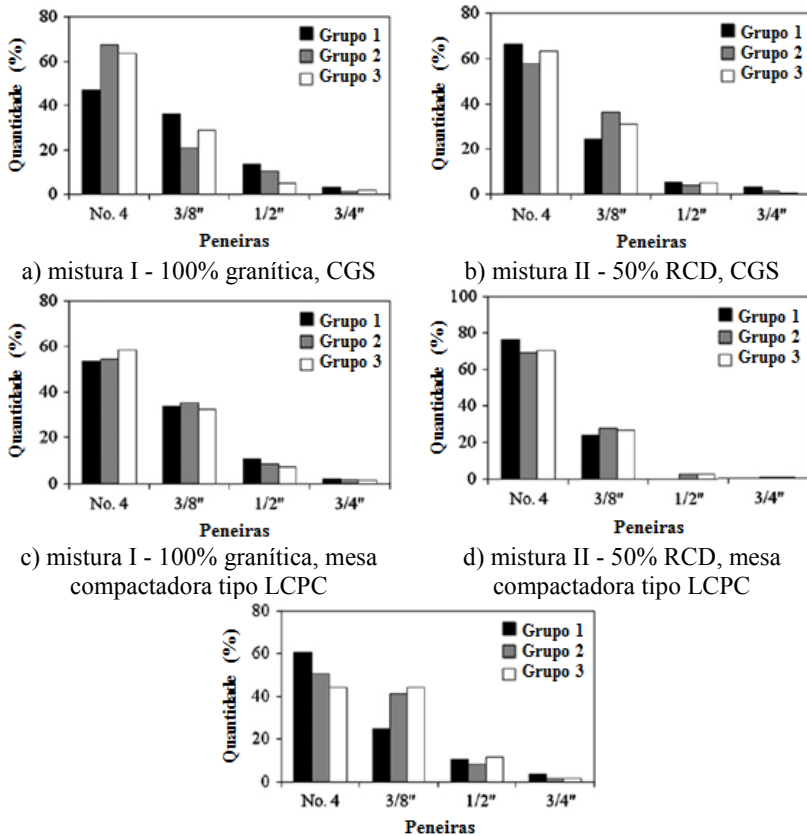
<i>Pontos de contato/100cm²</i>	<i>Compactador giratório Superpave</i>			<i>Mesa compactadora tipo LCPC</i>	
	<i>Mistura I</i>	<i>Mistura II</i>	<i>Mistura IV (SMA)</i>	<i>Mistura I</i>	<i>Mistura II</i>
<i>Média</i>	267	279	298	298	278
<i>CV (%)</i>	15,6	9,3	3,8	5,8	5,1

Fonte: Adaptado de Bessa, Castelo Branco e Soares (2012).

- Segregação

A segregação radial das partículas foi avaliada no *software Digital Image Analysis System*, que considera os agregados retidos nas peneiras número 4, 3/8", 1/2" e 3/4". Os autores concluíram que os corpos de prova produzidos no CGS apresentaram maior segregação, especialmente para a mistura tipo SMA, do que amostras extraídas de placas compactadas na mesa compactadora tipo LCPC. Os resultados obtidos podem ser visualizados na Figura 38.

Figura 38 - Segregação radial para cada mistura



Fonte: Adaptado de Bessa, Castelo Branco e Soares (2012).

Hassan, Airey e Kahn (2012)

Hassan, Airey e Kahn (2012) investigaram a orientação e segregação do agregado em corpos de prova compactados com o compactador giratório, vibratório e de rolo com placas metálicas. Os corpos de prova foram cortados horizontalmente e submetidos à tomografia computadorizada de raios-X. A granulometria da mistura asfáltica ensaiada era composta por 60% de agregado graúdo com um diâmetro máximo de 20 mm. Os parâmetros utilizados no compactador giratório foram: pressão vertical de 600 kPa, ângulo de rotação de 1,25° e frequência de 30 rpm.

- Orientação dos agregados

Os resultados obtidos, convergentes para os três métodos de compactação analisados, mostraram que as partículas de agregado próximas à borda do corpo de prova tendem a formar um alinhamento circular enquanto que, na região central, os agregados tendem a se orientar aleatoriamente. A média dos ângulos de orientação dos agregados, das misturas compactadas pelos três métodos mencionados, obtida foi de 50° . Em misturas compactadas com o compactador giratório, a média do ângulo de orientação do agregado graúdo foi $53,3^\circ$.

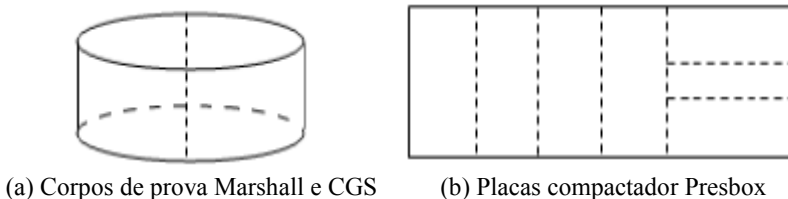
- Segregação

Quanto à graduação, foi observada uma concentração das partículas graúdas no fundo em relação ao topo do corpo de prova.

Hamzah, Von e Abdullah (2013)

A técnica do processamento digital de imagens foi utilizada para comparar a orientação das partículas de agregado de misturas asfálticas produzidas nos compactadores Marshall, giratório (CGS) e Presbox. Ainda foram testados, nos compactadores Marshall e CGS, a incorporação de agregados cúbicos nas proporções 0, 25, 50, 75 e 100%. As imagens analisadas foram obtidas por escaneamento de cortes verticais, realizados conforme ilustra a Figura 39. Foram compactados corpos de prova com 100 mm de diâmetro: dez (dois para cada proporção de agregados cúbicos, especificada) corpos de prova no CGS e dez no compactador Marshall, totalizando vinte corpos de prova. Os autores salientaram que não puderam ser realizados cortes com uma distância inferior a 50 mm.

Figura 39 - Seccionamento vertical dos corpos de prova



(a) Corpos de prova Marshall e CGS

(b) Placas compactador Presbox

Fonte: Hamzah, Von e Abdullah (2013).

- Orientação dos agregados

O ângulo de orientação médio dos agregados nos corpos de prova cilíndricos, Marshall e CGS, podem ser visualizados na Tabela 7. A

Tabela 8 apresenta os valores encontrados para amostras produzidas no compactador Presbox. A Figura 40 expõe a comparação dos compactadores utilizados.

Tabela 7 - Ângulo médio absoluto de orientação dos agregados (corpos de prova cilíndricos)

Agregados cúbicos	Ângulo médio de orientação - θ_k (°)					
	Marshall			CGS		
	CP 1	CP 2	Diferença	CP 1	CP 2	Diferença
0%	30,2	32,4	2,2	34,4	28,3	6,1
25%	32,6	31,3	1,3	32,4	35,9	3,5
50%	37,4	35,5	1,9	29,4	33,1	3,7
75%	41,4	35,8	5,6	32,3	34,5	2,2
100%	40,5	33,0	7,5	31,5	42,0	10,5

Fonte: Adaptado de Hamzah, Von e Abdullah (2013).

Para os autores, os compactadores Marshall e CGS produziram amostras replicadas consistentes (pequena diferença do ângulo de orientação médio entre duas amostras).

Tabela 8 - Ângulo médio absoluto de orientação dos agregados (placas Presbox)

Ângulo médio de orientação - θ_k (°)	Agregados cúbicos			
	0%	Média	100%	Média
H1	32,4	27,9	34,8	32,7
H2	23,4		30,5	
V1	24,6	29,5	27,8	33,1
V2	28,2		32,3	
V3	33,6		39,3	
V4	31,5		32,9	

Nota: H1 e H2 referem-se aos cortes verticais longitudinais e, V1, V2, V3 e V4 aos cortes verticais transversais.

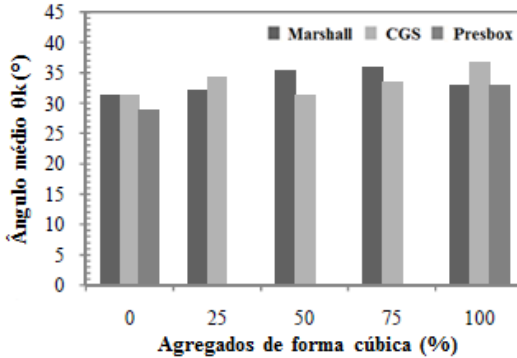
Fonte: Adaptado de Hamzah, Von e Abdullah (2013).

A caixa de cisalhamento Prebox produziu placas igualmente consistentes. As variações foram pequenas considerando que as placas possuíam 25 kg cada. O ângulo médio de orientação do agregado para 0% e 100% de agregados geometricamente cúbicos variou entre 27,9° a 32,7° e 29,5° a 33,1°, respectivamente.

A Figura 40 sintetiza os resultados encontrados para o ângulo de orientação médio dos agregados. Independente do método de compactação, os agregados apresentaram um ângulo de orientação

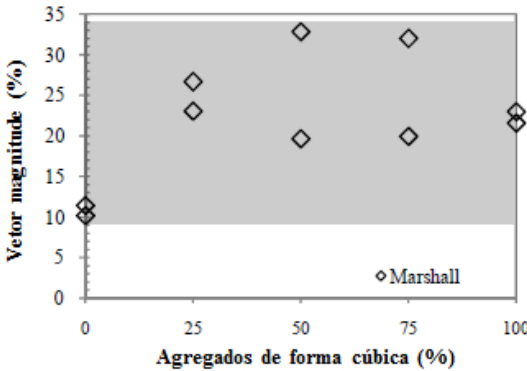
médio menor do que 45°, indicando que as partículas tendem a orientação preferencial ao longo da direção/plano horizontal.

Figura 40 - Ângulo médio de orientação dos agregados para diferentes compactadores



Fonte: Adaptado de Hamzah, Von e Abdullah (2013).

Figura 41 - Vetor magnitude dos corpos de prova Marshall

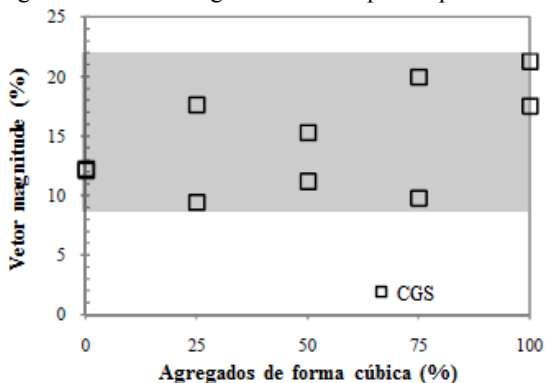


Fonte: Adaptado de Hamzah, Von e Abdullah (2013).

Foram avaliados os efeitos dos agregados cúbicos no vetor magnitude para ambos os compactadores, Marshall e CGS. Os resultados mostraram que não há tendência evidente de como a forma e o teor de agregado afeta a distribuição direcional dos agregados. O vetor magnitude sofreu maior alteração nos corpos de prova Marshall, que

variaram de $10,2^\circ$ a $32,9^\circ$; e as amostras produzidas no CGS entre $9,4^\circ$ e $21,3^\circ$.

Figura 42 - Vetor magnitude dos corpos de prova CGS

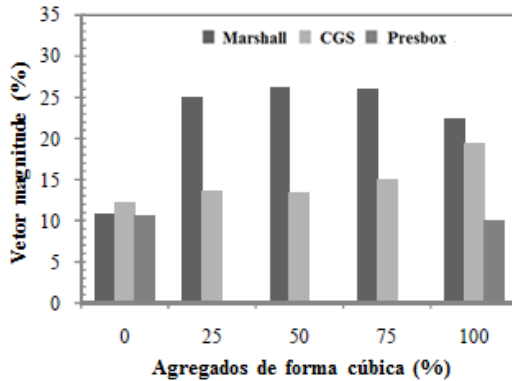


Fonte: Adaptado de Hamzah, Von e Abdullah (2013).

A Figura 43 resume o comportamento do vetor magnitude para diferentes percentuais de agregados cúbicos e diferentes compactadores. A partir dos resultados experimentais, concluíram que o método de compactação exerce maior influência do que o percentual de agregados cúbicos. As alterações da grandeza do vetor magnitude com a incorporação de agregados cúbicos são maiores nos corpos de prova Marshall. Não existe um padrão de alteração do vetor magnitude com a incorporação de agregados cúbicos para os três compactadores investigados. Diferente do compactador Marshall e do CGS, o compactador Presbox produziu corpos de prova com orientação mais aleatória com a incorporação de 100% de agregados cúbicos.

De um modo geral, o vetor magnitude é menor nos corpos de prova produzidos no CGS em comparação com as amostras Marshall. Isso indica que o compactador giratório produziu amostras com agregados mais orientados aleatoriamente. As placas produzidas no compactador Presbox, com 0% ou 100% de agregados cúbicos, apresentaram os menores valores de vetor magnitude indicando agregados orientados mais aleatoriamente na amostra.

Figura 43 - Vetor magnitude para diferentes compactadores



Fonte: Adaptado de Hamzah, Von e Abdullah (2013).

Sefidmazgi e Bahia (2014)

Os autores analisaram diferentes métodos de compactação (Marshall, CGS, mesa compactadora LCPC). Os corpos de prova foram produzidos a partir da mesma fonte de mistura solta, compactados em diferentes lugares e coletados. As análises foram realizadas a partir de imagens obtidas de dois cortes horizontais equidistantes em cada corpo de prova cilíndrico investigado (extraído ou moldado). Foi analisada uma amostra para cada condição. O número de zonas de contato, o comprimento de contato, a média do ângulo de orientação do contato e o vetor magnitude da distribuição da orientação dos contatos foram significativamente diferentes e podem ser visualizados na Tabela 9.

Tabela 9 - Análise de diferentes métodos de compactação

Método de compactação	Nº zonas de contatos	Σ Comprimento de contato (mm)/100 cm ²	Δc (%)	Média θ_c (°)
CGS	1153	1127,5	27,5	54,7
Marshall	1128	1319,5	33,4	56,1
Pista experimental no LCPC ¹	1527	1189,4	44,2	61,2
Pista experimental no LCPC ²	2363	2325,1	44,7	59,4

Nota: ¹ Amostra extraída na trilha de roda; ² Amostra extraída entre as trilhas de roda.

Fonte: Adaptado de Sefidmazgi e Bahia (2014).

A amostra sob a trilha do pneu da mesa compactadora LCPC apresentou o máximo comprimento de contato, entretanto, a distribuição da orientação dos contatos para as duas amostras da mesa compactadora foram semelhantes. O corpo de prova compactado no CGS apresentou a anisotropia mais elevada em termos distribuição da orientação dos contatos.

Resumo dos resultados e conclusões acerca dos estudos realizados

A Tabela 10 apresenta uma síntese dos estudos relatados anteriormente neste subitem sobre análise da estrutura interna de misturas asfálticas.

Tabela 10 - Síntese dos estudos sobre análise da estrutura interna de misturas asfálticas.

<i>Autor(es)</i>	<i>Método(s) de compactação investigado(s)</i>	<i>Resultados e conclusões</i>
Masad et al. (1999)	CGS (número de giros) e campo.	Orientação aleatória dos agregados a partir de 100 giros; mais giros do que Vv% para atingir o grau de orientação das partículas no campo; Amostras do campo são mais segregadas.
Tashman et al. (2001)	CGS (α 1,25°, 1,5° e 2°; pressão 400, 600 e 800 kPa; altura 50, 75 e 135 mm; temperatura 149 e 175°C) e campo.	Orientação preferencial dos agregados no plano horizontal/anisotropia transversal (θ_k maior nas seções horizontais); anisotropia vertical independente do parâmetro de compactação; pressão 600 kPa, α 1,5° e alturas 50 e 75 mm produziram corpos de prova mais semelhantes com o campo. As zonas de contato dependem do parâmetro de compactação; campo mais contatos do que CGS; Δc diminui com o aumento da altura; orientação dos contatos mais semelhante com o campo α 1,5°. CGS maiores índices de segregação que o campo.

(Continua)

Hunter, Airey e Collop (2004)	CGS; compactador vibratório e compactador de placas.	Orientação das partículas induzida pelo confinamento do molde; placas apresentaram θ_r menor. Maior segregação nos métodos giratório e vibratório; migração das partículas para as bordas na compactação vibratória.
Tashman et al. (2005)	Alteração da anisotropia com a deformação (ensaios triaxiais).	Não há alteração significativa no Δ com a deformação das amostras; quanto mais anisotrópica for a distribuição dos agregados, mais resistente será o material na direção da carga aplicada.
Vasconcelos, Evangelista Jr. e Soares (2005)	Marshall e CGS.	Δ superior no CGS; distribuição mais randômica para Marshall; Marshall e CGS geraram misturas com agregados aleatoriamente orientados; θ_k similares para Marshall e CGS. Menor segregação radial dos agregados graúdos no CGS; agregados menores distribuídos uniformemente; quanto menor o agregado, mais uniforme a distribuição.
Zhang et al. (2008)	CGS e compactador vibratório.	θ_k menor nos corpos de prova CGS; Δ menor para compactação vibratória; orientação preferencial dos agregados na direção horizontal no CGS; agregados mais aleatoriamente distribuídos no compactador vibratório.
Sefidmazgi (2011)	CGS (α 1,25°; pressão 300 e 600 kPa; temperatura 60, 90 e 120°C) e campo.	Comprimento de contato foi capaz de capturar o esforço e a temperatura de compactação; θ_c e Δ_c não apresentaram diferenças significativas.
Bessa, Castelo Branco e Soares (2012)	CGS e mesa compactadora tipo LCPC. Agregados naturais e alternativos.	Placas apresentaram distribuição dos agregados semelhante nas direções horizontal e vertical (isotropia); CGS não apresentou isotropia. Placas apresentaram mais pontos de contatos para misturas graníticas; misturas com agregados graníticos e de RCD, pontos de contatos similares; diferentes métodos de compactação produzem amostras com características distintas.

(Continua)

		CGS produz amostras mais segregadas do que a mesa compactadora.
<i>Hassan, Airey e Kahn (2012)</i>	<i>CGS, compactador vibratório e compactador de rolo com placas metálicas.</i>	Alinhamento circular dos agregados nas bordas. Segregação dos agregados graúdos no fundo em relação ao topo.
Hamzah, Von e Abdullah (2013)	Marshall, CGS e Presbox. Incorporação de agregados cúbicos.	Independente do método de compactação, orientação preferencial das partículas no plano horizontal (seções verticais $\theta_k < 45^\circ$); não existe um padrão de alteração Δ com incorporação de agregados cúbicos; método de compactação exerce maior influencia do que os agregados cúbicos; alterações do Δ com a incorporação de agregados cúbicos são maiores no Marshall; compactador Presbox produziu corpos de prova com orientação mais aleatória; CGS produziu amostras com agregados mais orientados aleatoriamente (Δ menor); placas Presbox apresentaram os menores Δ indicando agregados orientados mais aleatoriamente.
Sefidmazgi e Bahia (2014)	Marshall, CGS e mesa compactadora tipo LCPC.	O número de zonas de contato, o comprimento de contato, θ_c e Δ_c foram significativamente diferentes para os métodos de compactação; amostras sob a trilha de roda apresentou o máximo comprimento de contato; duas amostras da pista experimental Δ_c semelhantes; CGS apresentou a anisotropia mais elevada (maior Δ_c).

Nota: Quando não descritos os parâmetros da compactação giratória, entendem-se os parâmetros da AASHTO (1,25°; 600 kPa; 30 rpm).

Fonte: Autoria própria⁸.

⁸ Tabela elaborada a partir das informações dos autores referenciados.

2.4 ANÁLISE DE IMAGEM NA CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA INTERNA

As técnicas de análise de imagens digitais são amplamente utilizadas em muitas áreas de engenharia e ciências de investigação, como médica, física e ciência dos materiais. No domínio dos materiais de construção civil, a análise de imagens vem se destacando na caracterização da microestrutura de materiais como concreto de cimento Portland e misturas asfálticas (WANG, 2007).

Com o advento de técnicas computadorizadas de imagem, tornou-se possível a caracterização do material com base na distribuição de sua estrutura interna real (SOUZA; EVANGELISTA JÚNIOR; SOARES, 2006; BESSA, 2012). A caracterização da estrutura interna é salutar, pois está diretamente relacionada ao processamento/fabrico do material e as propriedades físicas macroscópicas resultantes. Segundo Souza, Evangelista Júnior e Soares (2006), as causas dos principais defeitos observados nos revestimentos asfálticos ocorrem em escalas menores. Sendo assim, o revestimento asfáltico não pode ser considerado homogêneo, mas, deve-se considerar a macroescala em que há a distinção entre os agregados e o mástique considerando o comportamento individual de seus constituintes e suas respectivas interações.

As etapas fundamentais para o processamento de imagens são: a aquisição de imagens; o processamento (compreende o pré-processamento e a segmentação binária); e a análise de imagens (reconhecimento de padrões e quantificação). Tais etapas são explanadas dando ênfase à aplicabilidade para a caracterização de misturas asfálticas.

2.4.1 Técnicas de aquisição de imagens de misturas asfálticas

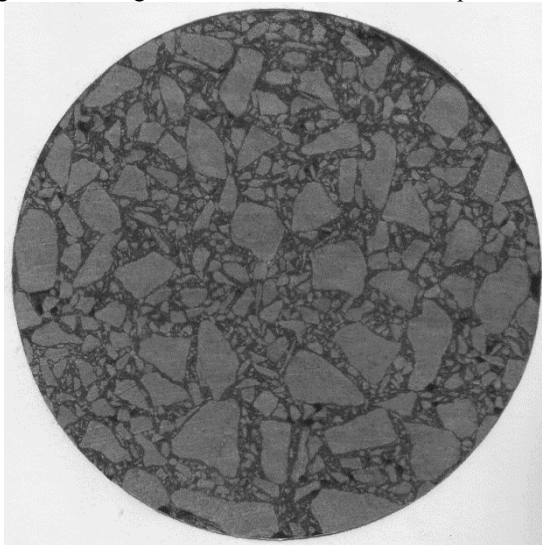
As imagens de misturas asfálticas podem ser capturadas por: câmeras fotográficas, *scanners*, tomografia computadorizada de raios-X e microscopia eletrônica. Os equipamentos diferem entre si: pelo sistema de aquisição, pelo tipo de imagem obtida (bidimensional ou tridimensional), pela caracterização destrutiva ou não destrutiva, pela escala de caracterização e pelo custo de operação do equipamento.

De acordo com Al-Rousan et al. (2007), a principal desvantagem de utilizar imagens em escala de cinza é que essas precisam de um sistema de captura de alta resolução.

Câmeras fotográficas e *scanners*

Embora não sejam as ferramentas mais adequadas e completas para a caracterização da estrutura interna de misturas asfálticas, os *scanners* e as câmeras fotográficas têm sido utilizados na aquisição de imagens convencionais (YUE, CHEN, THAM, 2003; HUNTER, AIREY, COLOP, 2004; BRUNO, PARLA, CELAURO, 2012; BESSA, 2012; HAMZAH et al., 2014; SEFIDMAZGI, BAHIA, 2014). Estes equipamentos apresentam como vantagens o fácil uso e o menor custo de aquisição quando comparados à tomografia computadorizada de raios-X. Contudo, segundo Yu et al. (2006), as imagens adquiridas por estes meios, apresentadas nas Figuras 44 e 45, são incapazes de distinguir os vazios de ar e o mástique a partir das cores das imagens.

Figura 44 - Imagem de mistura asfáltica obtida por *scanner*



Nota: Imagem sem escala.

Fonte: Autoria própria.

Figura 45 - Imagem de mistura asfáltica obtida por câmera fotográfica



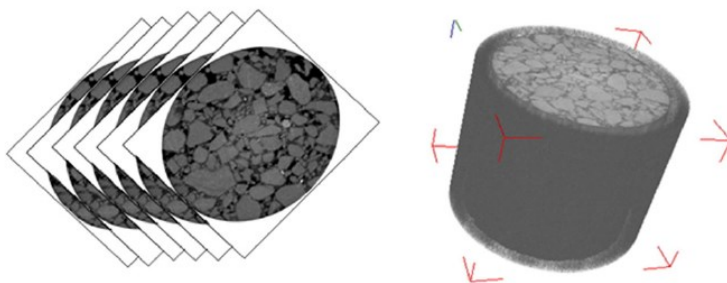
Fonte: Bruno, Parla e Celauro (2012).

Tomografia computadorizada de raios-X

Segundo Abdul Hassan, Airey e Hainin (2014), a tomografia computadorizada de raios-X permite que a investigação de misturas asfálticas, bem como outros materiais, atinja níveis microscópicos. Esta técnica não requer prévia preparação do corpo de prova para escaneamento e ainda possui a vantagem de ser não destrutiva (WANG, 2007).

A técnica consiste na obtenção de uma pilha de imagens em alta resolução, conforme mostra a Figura 46, em cortes transversais da estrutura interna da amostra. Permite o escaneamento de uma grande quantidade de fatias, limitadas pela tecnologia e pelo tempo computacional, e, em seguida, com operações de reconstrução matemática é possível gerar a imagem tridimensional.

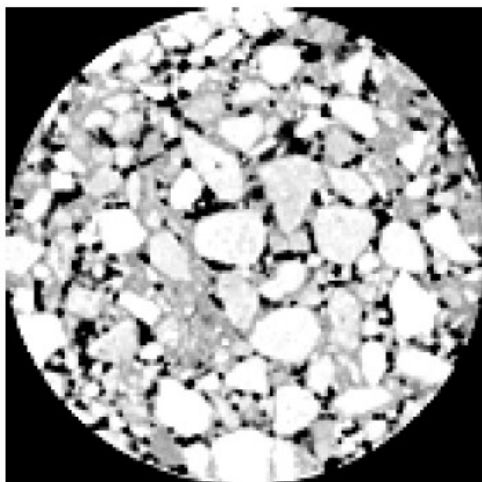
Figura 46 - Escaneamento das imagens por tomografia computadorizada de raios-X



Fonte: Khan et al. (2013).

A Figura 47 apresenta uma imagem bidimensional obtida por tomografia computadorizada de raios-X. Na imagem, as três composições volumétricas da mistura asfáltica (agregados, ligante asfáltico e vazios de ar) podem ser facilmente identificados. As diferentes tonalidades da imagem (preto, branco e cinza) representam a massa específica do material e o poder de atenuação dos raios-X incidentes (YU et al., 2006). Na Figura 47, as áreas mais brancas são os agregados, as áreas cinzentas são o mástique de asfalto e as áreas pretas são os vazios de ar.

Figura 47 - Imagem de mistura asfáltica obtida por tomografia computadorizada de raios-X



Fonte: Yu et al. (2006).

Apesar de ser uma ferramenta eficaz para o estudo da relação entre a microestrutura e macro desempenho, ainda é utilizada em menor escala devido, principalmente, aos elevados custos de aquisição, de manutenção e de operação (WANG, 2007; BESSA, 2012).

2.4.2 Processamento digital e análise de imagens de misturas asfálticas

De acordo com Masad et al. (1999) e Yue, Chen e Tham (2003), Processamento Digital de Imagem - PDI (do inglês, *Digital Image Processing* - DIP) é o termo utilizado para o processo de converter imagens de vídeo em um formato digital, e, por meio da aplicação de algoritmos matemáticos, extrair informações significativas da imagem.

As imagens de misturas asfálticas, por serem em escala de cinza, não podem ser utilizadas diretamente para a análise. O processamento digital de uma imagem é realizado para separar os diferentes constituintes (fases) que compõe o material (WANG, 2007).

Softwares de processamento e análise de imagens

De acordo com Bessa, Castelo Branco e Soares (2012), existem diversos *softwares* que podem ser utilizados para realizar o processamento de imagens, tais como:

- *ImageTool* (desenvolvido pelo Departamento de Odontologia e Diagnóstico da Universidade do Texas);
- *ImageJ* (desenvolvido pelo Institutos Nacionais da Saúde dos Estados Unidos);
- *Image Processing & Analysis System - IPAS* (desenvolvido pela Universidade de Wisconsin-Madison);
- *Abaqus 2008* (desenvolvido pela Simulia®, a versão 2008 possui uma ferramenta de edição de imagens).

O processo de utilização de *software* de imagem requer a digitalização de uma imagem real e da análise de seus componentes para a obtenção dos parâmetros relacionados com a estrutura interna da mistura (zonas de contato, orientação dos agregados, segregação).

Optou-se pelo uso do *software IPAS-2* neste trabalho, pois: a segunda versão do programa apresenta aprimoramentos em relação à análise de imagens de misturas asfálticas, especificamente; apresenta dois tipos de filtros, proporcionando uma imagem de melhor qualidade para análise e; o uso foi validado por Sefidmazgi (2011). Ainda, de

acordo com Ibrahim, Mahmoud e Ali (2013), uma proposta de procedimento da AASHTO “*Determining Aggregate Structure in Asphalt Mixes by Means of Planar Imaging*” resumiu as técnicas de processamento e análise de imagens incorporadas no *software*.

Software IPAS-2

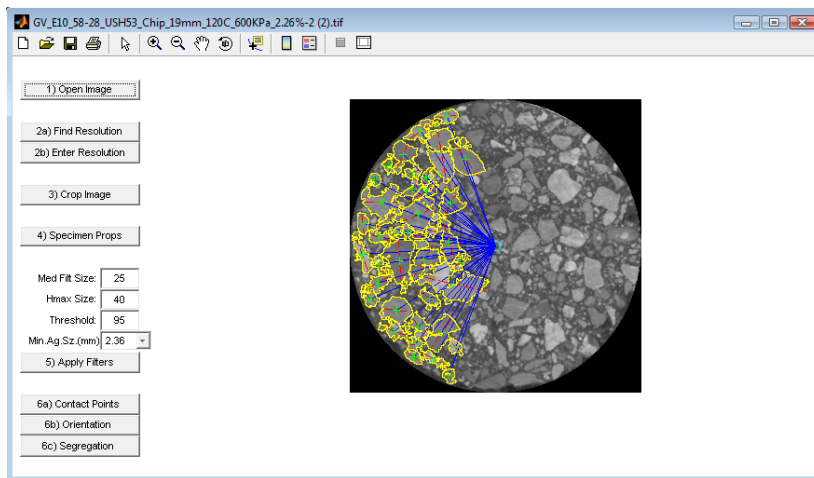
IPAS (*Image Processing & Analysis System*) é um pacote computacional desenvolvido pela Universidade de Wisconsin-Madison e pela Universidade Estadual de Michigan especificamente para a análise de imagens de pavimentos. Este *software* pode ser utilizado para analisar a estrutura interna do agregado de misturas asfálticas a quente.

A segunda versão do *software*, IPAS-2, foi desenvolvida pela Universidade de Wisconsin-Madison e apresenta benefícios quanto à caracterização estrutural dos agregados como: identificação das zonas de contato dos agregados, determinação do comprimento de contato, bem como a identificação do esqueleto mineral (orientação dos agregados).

Sefidmazgi (2011) validou a utilização do *software* IPAS-2 e concluiu que a caracterização da estrutura interna de misturas asfálticas pode ser realizada com sucesso a partir de imagens bidimensionais. Neste estudo, foram analisadas três misturas distintas (densa e aberta) sendo que em misturas densas foram analisados agregados com diâmetro maior do que 2,36mm e, em misturas abertas, maior do que 4,36mm (valores estes recomendados por Sefidmazgi (2011) para análises). Também foi investigada a sensibilidade do *software* em detectar variações no esqueleto mineral decorrentes da variação do tipo de ligante asfáltico e das condições de compactação (método de compactação, temperatura e pressão).

Para a utilização do IPAS-2, exemplo de interface apresentado na Figura 48, é necessário um aparato composto por um *scanner* e um computador (onde deve estar instalado o *software*). A preparação da amostra consiste em serrar um corpo de prova moldado em laboratório ou extraído de campo com as propriedades volumétricas requeridas por critérios estabelecidos. As faces do corpo de prova são digitalizadas em duas dimensões por um *scanner* convencional. Após a aquisição das imagens, são realizados procedimentos para o tratamento e para a transformação dessas imagens (aplicação de filtros e divisão dos elementos) para que enfim ocorra a análise das partículas de agregados e a posterior obtenção dos resultados, tais como: orientação das partículas, zonas de contato entre os agregados e segregação das partículas.

Figura 48 - *Software* de processamento e análise de imagens IPAS-2

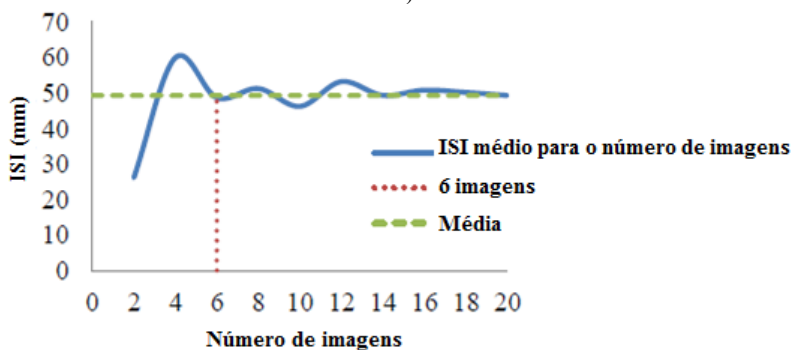


Fonte: Bahia (2013).

Sefidmazgi (2011) propôs um método de implementação do *software IPAS-2* para caracterização da estrutura interna de amostras de misturas asfálticas. Neste sentido, foi determinado um número ótimo de cortes nos corpos de prova que são necessários para representar as propriedades tridimensionais da mistura por meio de imagens bidimensionais. Sefidmazgi e Bahia (2014) avaliaram o índice *Internal Structure Index* (ISI)⁹ e o respectivo coeficiente de variação, conforme apresenta as Figuras 49 e 50 respectivamente. Os autores concluíram, com base no ISI, que para capturar a estrutura interna da mistura com um erro inferior a 5% é necessário realizar no mínimo 3 cortes no material (o que resulta em 6 imagens posto que são digitalizadas as duas superfícies do corte).

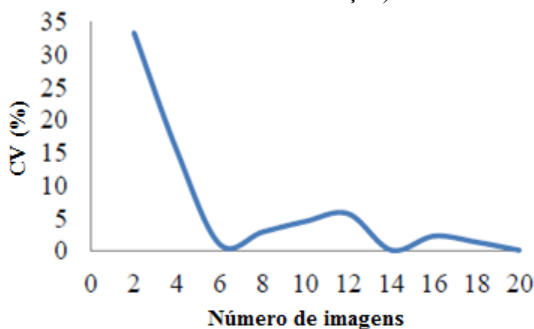
⁹ Índice que se refere a uma combinação de parâmetros da estrutura interna (comprimento de contato e orientação do contato).

Figura 49 - Análise do número ótimo de seções (número de imagens *versus* ISI)



Fonte: Adaptado de Sefidmazgi (2011).

Figura 50 - Análise do número ótimo de seções (número de imagens *versus* coeficiente de variação)



Fonte: Adaptado de Sefidmazgi (2011).

A Figura 49 mostra que a partir de seis imagens analisadas ocorre uma tendência de convergência do valor do ISI e, conseqüentemente, uma diminuição do coeficiente de variação deste parâmetro, ilustrada na Figura 50.

Sefidmazgi (2011) utilizou uma amostra de material por condição investigada. Entretanto, não há consenso, nem recomendações e estudos a respeito do número de amostras/corpos de prova a serem analisados (MASAD et al., 1999; TASHMAN et al., 2001; HUNTER; AIREY; COLLOP, 2004; VASCONCELOS; EVANGELISTA JR.; SOARES, 2005; TASHMAN et al., 2005; ZHANG et al., 2008; SEFIDMAZGI, 2011; BESSA; CASTELO BRANCO; SOARES, 2012; HASSAN;

AIREY; KAHN, 2012; HAMZAH; VON; ABDULLAH, 2013; SEFIDMAZGI; BAHIA, 2014).

2.4.3 Outras aplicações da análise de imagens na caracterização de misturas asfálticas

Estudos vêm sendo conduzidos utilizando as mais diversas técnicas de obtenção de imagens para caracterizar misturas asfálticas e/ou analisar seu comportamento.

Alguns autores (ABDUL HASSAN, AIREY, HAININ, 2014; AMELIAN, ABTAHI, HEJAZI, 2014; HAMZAH et al., 2014; KHAN et al., 2013) utilizaram a técnica de obtenção e análise de imagens para caracterizar o dano por umidade e permeabilidade em misturas asfálticas.

Abdul Hassan, Airey e Hainin (2014) aplicaram a técnica de análise de imagens para caracterizar o dano, causado por umidade, na estrutura interna de misturas asfálticas tipo *gap graded*. Imagens bidimensionais foram capturadas por tomografia computadorizada de raios-X em fatias distantes entre si 4 mm e 8 mm. Os vazios de ar e as propriedades da fratura foram analisados após ensaios de compressão uniaxial e de resistência à tração indireta.

Amelian, Abtahi e Hejazi (2014) utilizaram a abordagem da análise de imagens para realizar a avaliação visual do material submetido a ensaio de fervura, normatizado pela ASTM D3625 - *Standard Practice for Effect of Water on Bituminous-Coated Aggregate Using Boiling Water*. O ensaio foi realizado em misturas preparadas com cinco diferentes tipos de agregados e dois aditivos anti-*stripping*¹⁰. Por meio da análise de imagens, distinguiu-se a película de ligante asfáltico descolada do agregado revestido. Além disso, foram realizados ensaio de tração indireta, ensaio para determinação do módulo de rigidez e teste de estabilidade Marshall em amostras condicionadas e não condicionadas a fim de comparar os métodos. A técnica da análise de imagens demonstrou ser um método eficiente e mais objetivo para estimar a desagregação da mistura asfáltica.

¹⁰ *Stripping* ocorre quando a ligação entre o ligante asfáltico e o agregado é rompida devido à intrusão de água na interface agregado-ligante (HAMZAH et al., 2014).

Hamzah et al. (2014) avaliaram a sensibilidade à umidade de misturas asfálticas mornas por meio da técnica de análise de imagens. Misturas preparadas com diferentes ligantes e condicionadas em diferentes percentuais de umidade foram analisadas após serem submetidas ao ensaio de tensão direta. Os autores concluíram que quando comparado ao método de visualização a olho nu, a técnica de análise de imagens torna mais precisa as medições qualitativas do dano (*stripping* ou falha adesiva) do material.

Khan et al. (2013) utilizaram a técnica não destrutiva de análise de imagens para estudar a permeabilidade interna de misturas asfálticas que resulta dos danos causados pela umidade. Misturas com agregados graníticos e calcários foram avaliadas por meio do teste de resistência à tração retida por umidade induzida juntamente com a análise de imagens. As amostras foram escaneadas com tomografia computadorizada de raios-X antes do teste, após a saturação inicial e após a conclusão do teste. A varredura dos corpos de prova foi realizada a fim de determinar o teor de vazios de ar e distribuição destes no corpo de prova antes da saturação. As propriedades reológicas do ligante também foram avaliadas. A partir do estudo, concluiu-se que as estruturas dos ligantes virgem e envelhecido são diferentes. Quanto aos valores de saturação obtidos pela análise de imagens, os valores encontrados são comparáveis com os determinados em laboratório pelo método de pesagem, revelando a confiabilidade da técnica de análise de imagens.

No que tange ao mecanismo de segregação em misturas asfálticas, Khosravi et al. (2013) devolveram um método de análise baseado na distribuição de vazios de ar. Para isso, um sistema de tomografia computadorizada de raios-X foi utilizado para captar a estrutura interna das amostras e técnicas de análise de imagens foram utilizadas para quantificar a distribuição de vazios de ar. O método de análise, baseado em uma ferramenta não destrutiva, mostrou ser preciso e confiável. No estudo, a granulometria da mistura refletiu diretamente na quantidade e tamanho dos vazios de ar na mistura.

A aplicação de análise de imagens não se restringe às misturas asfálticas densas. Martin, Putman e Kaye (2013) usaram a ferramenta para medir e avaliar a distribuição de volume de vazios em pavimentos porosos. Conclui-se que, em campo, a presença de vazios é maior na superfície, devido à textura superficial, e atinge um mínimo cerca de 2 a 3 cm de profundidade. Não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas entre as medidas de percentual de volume

de vazios obtidas a partir de análise de imagem e os métodos volumétricos laboratoriais preexistentes.

Liu et al. (2014) pesquisaram a homogeneidade de um pavimento asfáltico utilizando a tomografia computadorizada de raios-X. Para o estudo foram extraídos aleatoriamente nove corpos de prova de uma rodovia recém-pavimentada na província de Hunan, na China. Na avaliação foram incluídos, além da análise de imagens, índices físicos (massa específica aparente e percentual de volume de vazios) e parâmetros de desempenho (deformação permanente, vida de fadiga e módulo de rigidez). Dos nove corpos de prova avaliados, apenas dois apresentaram segregação moderada¹¹. Devido ao número limitado de amostras, não foi possível estabelecer uma relação entre a segregação do corpo de prova e o desempenho à fadiga.

Estudos (AL-ROUSAN et al., 2007; BRUNO, PARLA, CELAURO, 2012) também foram conduzidos com ênfase na avaliação dos agregados da mistura asfáltica: quantificação da forma, textura e angularidade dos agregados e, até mesmo, a identificação da granulometria da mistura por meio da análise de imagens.

Al-Rousan et al. (2007) averiguaram propriedades dos agregados, como forma, textura e angularidade. De acordo com os autores, a maioria dos métodos de análise de imagens é limitada para diferenciar algumas características dos agregados. Contudo, alterações na resolução e no nível de ampliação das imagens tornaram possível medidas de textura e angularidade, por exemplo. Dentre as características dos agregados foram avaliadas: esfericidade, circularidade, índice de forma, lamelaridade, angularidade, textura, entre outros índices e relações. Concluiu-se que as técnicas de análise de imagens, aliadas à processos matemáticos e algoritmos, provaram ser capazes de quantificar as características morfológicas dos agregados.

A análise de imagens também foi utilizada como ferramenta para detecção da granulometria da mistura asfáltica por Bruno, Parla e Celauro (2012). A partir de 24 imagens planas, obtidas de seis superfícies de revestimento expostas, foram estimadas curvas granulométricas para o material *in situ* sem a necessidade de separar o ligante asfáltico do agregado. As diferenças encontradas entre a curva granulométrica de projeto (real) e a encontrada a partir da análise de

¹¹ A segregação tridimensional foi avaliada por meio do método da dimensão fractal.

imagens foram mínimas e satisfizeram o controle de aceitação. A técnica mostrou-se eficaz para realizar o controle de qualidade/aceitação da granulometria do agregado utilizada para produzir a mistura asfáltica em usina.

No Brasil, Bessa, Castelo Branco e Soares (2012) utilizaram o PDI para caracterizar os agregados e avaliar a estrutura interna de misturas asfálticas produzidas com agregados graníticos, escória de aciaria e resíduos de construção e demolição com diferentes granulometrias. As misturas foram analisadas quanto: às zonas de contato entre os agregados, à orientação das partículas e ao potencial de segregação. O processamento digital de imagens demonstrou ser um método mais rápido e fácil para a caracterização dos agregados além de se obter resultados mais precisos do que os testes laboratoriais.

Dado o exposto, conclui-se que o Processamento Digital de Imagens exerce um papel importante na caracterização e análise de misturas asfálticas. O método permite uma caracterização precisa, a partir de imagens reais, do esqueleto mineral e da distribuição dos vazios além de permitir a análise de métodos de compactação, de diferentes granulometrias, e até mesmo, de danos no material.

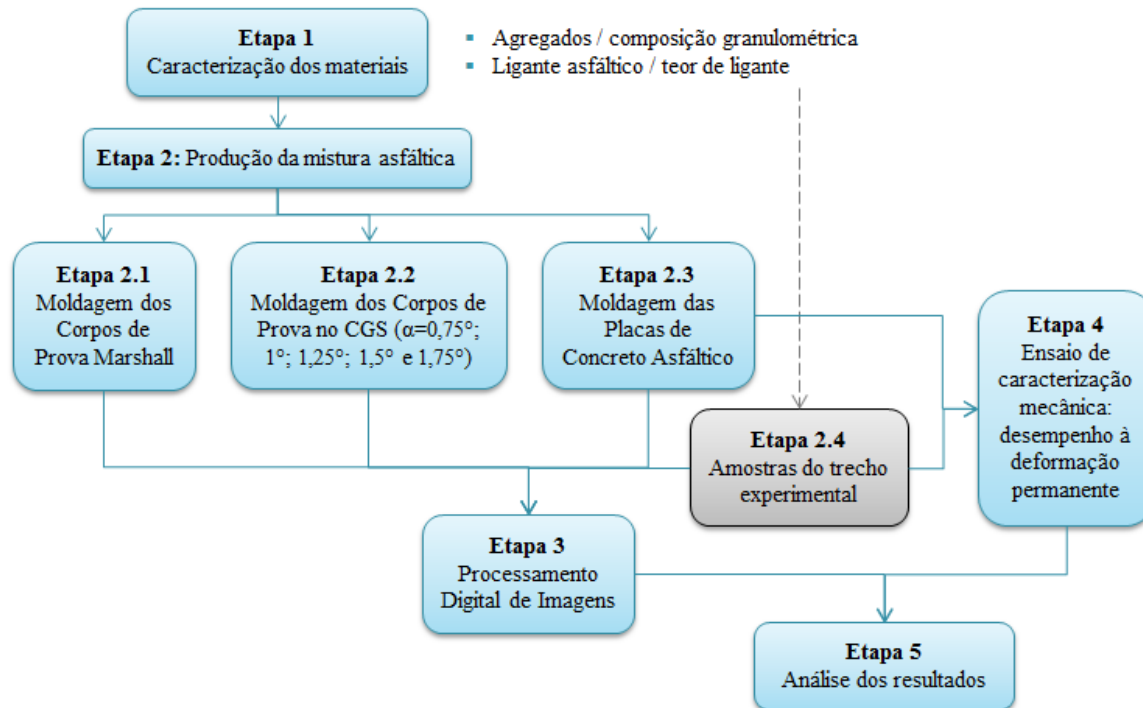
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho propôs-se a desenvolver um programa experimental a fim de avaliar a macroestrutura de misturas asfálticas densas usinadas a quente, submetidas a diferentes tipos de compactação, utilizando o Processamento Digital de Imagem - PDI. Para tanto, foram comparados corpos de prova moldados em laboratório (Marshall, CGS e mesa compactadora) e extraídos de campo.

As amostras do trecho experimental analisadas neste trabalho foram aquelas avaliadas no segmento monitorado (TRICHÊS, 2014). Para que a compactação laboratorial pudesse ser comparada com a compactação em campo, as misturas asfálticas produzidas em laboratório foram fabricadas com a mesma composição granulométrica do trecho experimental do estudo. O trecho está localizado na Rodovia BR-101, km 409 ao km 437. O tráfego estimado para a rodovia é de $N_{8,2t} = 1,64 \times 10^8$ (USACE - *United States Army Corps of Engineers*), para um período de 10 anos.

Para alcançar o objetivo, o programa experimental foi estruturado em cinco etapas apresentadas na Figura 51 e detalhadas a seguir.

Figura 51 - Fluxograma das etapas do programa experimental



Nota: α é o ângulo de inclinação do eixo de rotação do CGS.

Fonte: Autoria própria.

3.1 ETAPA 1 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Nesta etapa é realizada a caracterização dos materiais, como agregados e ligante asfáltico, e a dosagem da mistura asfáltica. A composição granulométrica das misturas moldadas em laboratório foi definida a partir da curva granulométrica do trecho experimental em estudo, localizado na Rodovia BR-101 Sul, atendendo aos critérios Superpave para um diâmetro nominal máximo de 19 mm. O ligante asfáltico utilizado foi caracterizado quanto ao ponto de amolecimento e à penetração. A mistura de concreto asfáltico foi dosada de acordo com a metodologia Superpave.

3.1.1 Agregados

Os agregados (brita 3/4", pedrisco e pó de pedra) utilizados no estudo foram os mesmos utilizados na execução do lote 29 da Rodovia BR-101 Sul no estado de Santa Catarina. A pedreira está localizada no município de Sombrio-SC, instalada sobre basaltos, encaixados em arenitos Botucatu.

Foram realizados os seguintes ensaios de caracterização tecnológica de acordo com as seguintes normas:

- Angularidade do agregado graúdo: *ASTM D 5821 - Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate*;
- Angularidade do agregado miúdo: *ASTM C 1252 - Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate*;
- Partículas planas e alongadas: ABNT NBR 6954 - Lastro padrão: Determinação da Forma do Material;
- Teor de argila: *AASHTO T 176 - Plastic Fines in Graded Aggregates and Soils by Use of the Sand Equivalent Test*;
- Dureza: *ASTM C 131 - Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*;
- Sanidade: *ASTM C 88 - Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate*;

- Materiais deletérios: *AASHTO T 112 - Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates*;
- Massa específica real, aparente e absorção do agregado graúdo: *ASTM C 127 - Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*;
- Massa específica real do agregado miúdo: DNER-ME 084 - Agregado Miúdo: Determinação da Densidade Real;
- Massa específica real do material pulverulento: DNER-ME 085 - Material Finamente Pulverizado: Determinação da Massa Específica Real.

3.1.2 Composição granulométrica

No campo, a curva granulométrica foi formulada a partir da combinação dos agregados (brita $\frac{3}{4}$ ", pedrisco e pó de pedra) e do filer (cal hidratada). A cal hidratada utilizada é do tipo CH-1 dolomítica e foi fabricada no Paraná pela Pinocal Indústria e Comércio de Cal Ltda.

3.1.3 Ligante asfáltico

Foi utilizado na moldagem dos corpos de prova um ligante asfáltico do tipo Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) especificado por penetração como CAP 50/70. O ligante asfáltico é proveniente da Refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR), localizada no município de Araucária no estado do Paraná.

Os ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade aparente foram realizados de acordo com as seguintes normas:

- Viscosidade aparente: *ASTM D 4402 - Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer*;
- Penetração: *ASTM D 5 - Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*;
- Ponto de amolecimento: *ASTM D 36 - Standard Test Method for Softening Point of Bitumen: Ring-an-ball Apparatus*.

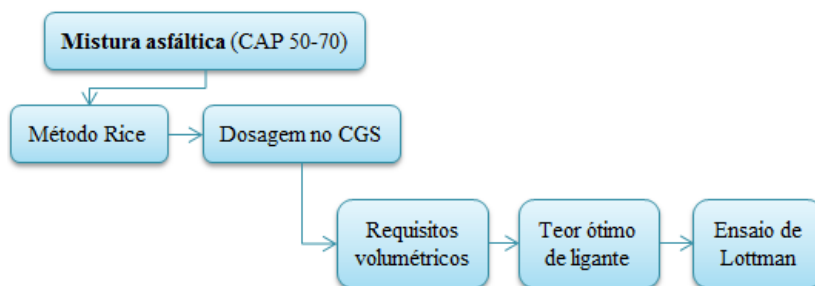
Para a determinação das faixas de temperatura de usinagem e de compactação das misturas, foi traçada a curva viscosidade aparente

versus temperatura. A viscosidade aparente foi determinada pelo viscosímetro Brookfield.

3.1.4 Determinação do teor de ligante asfáltico / Dosagem da mistura asfáltica

O procedimento de dosagem da mistura asfáltica, designada por Melo (2014) como “Mistura 3: Referência”, atendeu aos critérios da metodologia Superpave. A dosagem contemplou requisitos volumétricos da mistura, teor de filer e sensibilidade à água (resistência ao dano pela umidade induzida), conforme pode ser visualizado na Figura 52.

Figura 52 - Fluxograma da dosagem da mistura asfáltica



Fonte: Adaptado de Melo (2014).

A dosagem da mistura asfáltica foi realizada utilizando o compactador giratório Superpave (CGS) da marca IPC Global® Servopac, apresentado na Figura 53.

Os procedimentos adotados na dosagem seguiram as recomendações das normas *AASHTO M 323 - Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design* e *AASHTO R 35 - Standard Practice for Superpave Volumetric Design for Hot-Mix Asphalt (HMA)*. Foram fixados três parâmetros na moldagem: ângulo de compactação de 1,25°, pressão de compactação de 600 kPa e velocidade de giro de 30 rpm. Os corpos de prova foram moldados com diâmetro de 150 mm e altura de aproximadamente 110 mm.

O estudo da dosagem da mistura foi feito moldando-se os corpos de prova com 125 giros (N_{projeto}), o qual é aplicado para alto volume de tráfego, com N_{inicial} de 9 giros e $N_{\text{máximo}}$ de 205 giros. Durante a dosagem, os corpos de prova foram moldados até o N_{projeto} . Definido o

teor ótimo de ligante, foram moldados corpos de prova até o $N_{\text{máximo}}$ de 205 giros para a verificação dos critérios exigidos na especificação.

Figura 53 - Compactador Giratório Superpave



Fonte: IPC Global[®] (2015).

Para a determinação do teor de ligante, estimou-se um teor inicial com base em formulação empírica. Procedeu-se à moldagem de corpos de prova no teor inicial (4,0%) e em teores de ligante de -0,5%, +0,5% e +1,0% em relação ao teor inicial.

Posteriormente, para avaliar a resistência das misturas ao efeito destrutivo da ação da água, foi realizado o ensaio de Lottman modificado, segundo a norma *AASHTO T 283 - Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage*.

Seis corpos de prova com diâmetro de 100 mm foram moldados no CGS, vazios entre 6,5% e 7,5% e teor de ligante definido no estudo de dosagem. Destes seis corpos de prova, três foram submetidos ao condicionamento conforme a norma (saturação dos vazios de 70% a 80% de água; congelamento (-18°C) por 16 horas; e banho em água a 60°C pelo período de 24 horas). Em seguida, foram determinadas as resistências à tração indireta estática na temperatura de 25°C para os corpos de prova.

A sensibilidade à água foi definida como a relação entre a resistência à tração do subgrupo condicionado e a resistência à tração do subgrupo de controle. O resultado deve ser maior que 70%, ou seja, que apresentem um dano máximo de 30%. A resistência à tração estática por compressão diametral foi calculada conforme Equação 7.

$$RT = \frac{2.F}{100.\pi.D.h} \quad (7)$$

Onde: RT é a resistência à tração, em MPa; F é a carga de ruptura, em N; D é o diâmetro do corpo de prova, em cm; h é a altura do corpo de prova, em cm.

3.2 ETAPA 2 - PRODUÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA

A produção das misturas de concreto asfáltico estudadas neste trabalho (confecção de corpos de prova cilíndricos no CGS e no compactador Marshall, confecção de placas) foi realizada conforme preconiza a norma *AASHTO R 30 - Mixture Conditioning of Hot-Mix Asphalt*.

Para a preparação das misturas, a composição dos agregados foi 43% de brita 3/4"; 15,5% de pedrisco; 40% de pó de pedra e 1,5% de cal. Esta composição foi adotada para ser aquela fabricada no campo.

As misturas foram preparadas em um misturador mecânico com prévio aquecimento dos materiais em estufa. O ligante asfáltico foi aquecido até obter uma viscosidade aparente de 0,17 Pa.s (conforme a curva viscosidade *versus* temperatura) e os agregados sob uma temperatura de 10 a 15°C acima da temperatura do ligante asfáltico. Após a homogeneização mecânica, e antes da compactação, as misturas foram condicionadas durante 2 horas em estufa, na temperatura de compactação, na qual o ligante asfáltico apresentou viscosidade de 0,28 Pa.s. À exceção, as misturas produzidas para a moldagem dos corpos de prova Marshall não foram condicionadas em estufa, conforme preconiza a norma DNER - 043 /1995.

Para evitar a segregação dos agregados, as misturas foram homogeneizadas com uma espátula antes de serem despejadas nos moldes. Ao colocá-las nos moldes, foram despejadas de uma mesma altura e de maneira uniforme.

3.2.1 Etapa 2.1 - Moldagem dos corpos de prova Marshall

Para a moldagem dos corpos de prova foi utilizada a metodologia Marshall de acordo com a norma DNER-ME 043/95. Foram utilizados moldes com diâmetro interno de 10cm e 1200 gramas de materiais (agregados e ligante asfáltico). A moldagem dos corpos de prova Marshall foi realizada, pois este é utilizado como controle da mistura asfáltica em campo.

Os corpos de prova foram moldados em um Compactador Marshall automático, ilustrado na Figura 54. As amostras sofreram um esforço de compactação de 75 golpes por face.

Figura 54 - Compactador Marshall automático (LAB PAV/UFSC)



Fonte: Autoria própria.

3.2.2 Etapa 2.2 - Moldagem dos corpos de prova no CGS

Corpos de prova de 15 cm de diâmetro e massa aproximada de 4800 g foram moldados no Compactador Giratório Superpave, Figura 55, para comparar diferentes parâmetros desta compactação laboratorial. De acordo com Tashman et al. (2001), o parâmetro ângulo de inclinação

do eixo é o fator que mais influencia/altera a compactação laboratorial. Sendo assim, este foi o parâmetro variável neste estudo. Os parâmetros pressão e velocidade de rotação foram fixos. Foram adotadas a pressão de compactação, 600 kPa, e a velocidade de rotação, 30 rpm, determinadas pelo método Superpave. Tashman et al (2001) afirmaram ser esta a pressão de compactação que mais aproxima a estrutura interna (macroestrutura) da mistura obtida em laboratório com a do campo. Dessouky, Masad e Bayomy (2004), Hunter, Airey e Collop (2004), Vasconcelos, Evangelista Jr. e Soares (2005), Hunter, McGreavy e Airey (2009) e Hassan, Airey e Kahn (2012) também adotaram em seus estudos a pressão 600 kPa e velocidade de rotação 30 rpm, parâmetros normatizados pela AASHTO.

Figura 55 - Compactador Giratório Superpave (LAB PAV/UFSC)



Fonte: Autoria própria.

Antes da compactação dos corpos de prova, o equipamento foi calibrado por meio do modo calibração disponível no próprio CGS. Foram aferidos os parâmetros:

- i. Altura: a referência foi fornecida ao equipamento por meio de anéis cilíndricos de 50 e 200 mm de altura que acompanham o compactador;

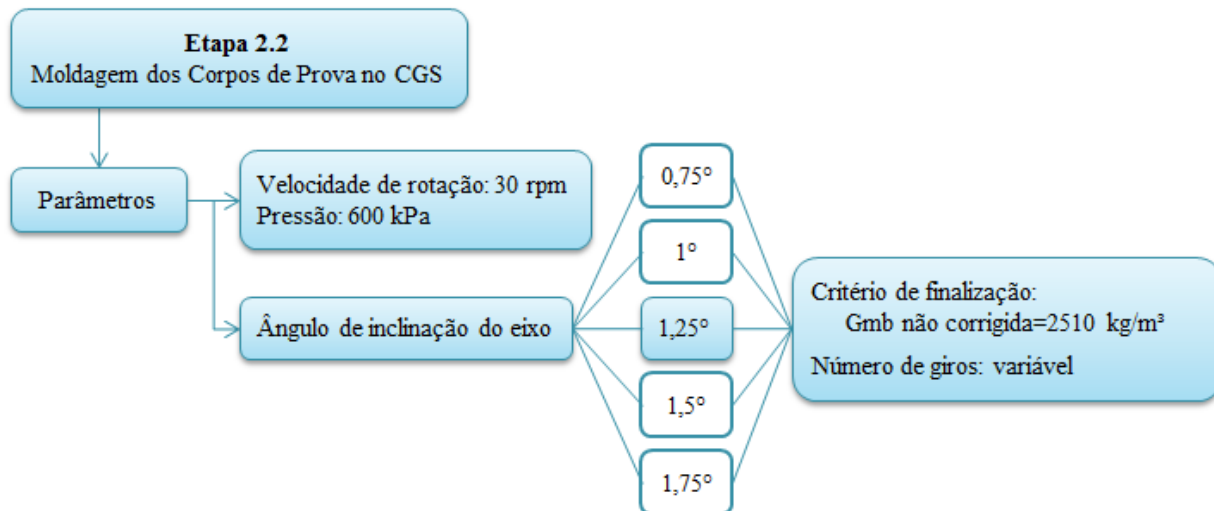
- ii. Ângulo de inclinação do eixo de rotação: calibrado externamente com elementos padrões que acompanham o equipamento. Três cilindros de 66 mm de altura foram posicionados em forma de triângulo equilátero de modo calibrar o ângulo de inclinação do eixo igual a zero; o procedimento foi repetido com cilindros de 78 mm de altura; e
- iii. Pressão de compactação: aferida por meio de um dinamômetro.

O critério de finalização da compactação adotado foi a massa específica aparente calculada pelo equipamento, ou seja, a G_{mb} (massa específica aparente) não corrigida¹². Não foi adotado o número de giros de projeto (igual a 125), pois, com a variação do ângulo do eixo de rotação do equipamento há uma variação do esforço de compactação alterando conseqüentemente o número de giros para a massa específica aparente desejada. No *software* que aciona o equipamento foi selecionada a opção em que a compactação é finalizada após atingir uma determinada massa específica. Com base nas curvas de compactação obtidas por Melo (2014), $N_{projeto}$ igual a 125, para esta mistura convencional no teor ótimo de ligante, foi feita uma média das massas específicas não corrigidas que representa a massa específica alvo para atingir 99% do grau de compactação (o valor médio do intervalo 97% a 101% do Grau de Compactação preconizado pelo DNIT) que resultou em 2510 kg/m³. Sendo assim, foi inserido o valor de 2510 kg/m³ como critério de finalização da compactação.

A Figura 56 apresenta um fluxograma esquemático da moldagem dos corpos de prova no CGS.

¹² O Compactador Giratório Superpave calcula a massa específica aparente, G_{mb} , como sendo a relação entre a massa (dado de entrada fornecido pelo usuário) e o volume calculado pelo *software* do equipamento por meio da altura instantânea do corpo de prova aferida após cada giro.

Figura 56 - Fluxograma da moldagem dos corpos de prova no CGS



Fonte: Autoria própria.

A fim de comparar diferentes ângulos de inclinação do eixo no CGS, foram moldados no mínimo 4 corpos de prova (2 corpos de prova para seccionamento horizontal e 2, para o vertical para a análise digital das imagens) para cada ângulo de inclinação do eixo de rotação do CGS para a caracterização da estrutura interna (Tabela 11).

Tabela 11 - Corpos de prova para caracterização da estrutura interna

<i>Ângulo de inclinação do eixo</i>	<i>Número de corpos de prova</i>	
	<i>Corte horizontal</i>	<i>Corte vertical</i>
0,75°	2	2
1°	2	2
1,25°	2	2
1,5°	2	2
1,75°	2	2
<i>Total</i>	<i>20</i>	

Fonte: Autoria própria.

Crítério de seleção

Como foi verificada uma variabilidade na compactação dos corpos de prova, para minimizá-la, foi estabelecido um critério de seleção dos corpos de prova baseado no ponto (número de giros) da inflexão da curva de compactação e no número de giros total. Os limites estabelecidos para cada um dos critérios foram a média mais ou menos um desvio-padrão dos corpos de prova moldados para cada ângulo de inclinação do eixo de rotação.

Análise/parâmetros da compactação

Para melhor entendimento do efeito da alteração do ângulo de inclinação do eixo de rotação na compactação dos corpos de prova no CGS, foram analisadas as curvas de densificação dos corpos de prova, bem como outros parâmetros da compactação (inclinação da curva, *locking point*, inflexão, entre outros).

Durante a compactação, o *software* do equipamento CGS adquire a altura do corpo de prova após cada giro. Com esses dados e a massa específica aparente determinada, foram elaborados os gráficos (i) altura *versus* número de giros; (ii) volume de vazios *versus* número de giros e, (iii) %Gmm (massa específica aparente máxima teórica) *versus* número

de giros. Além disso, foram determinados índices/parâmetros de compactação, tais como:

- Inclinação da curva (I_{curva}): obtida a partir da tangente da curva %Gmm *versus* Número de giros (curva de densificação) a partir do ponto em que %Gmm é maior do que 92%.
- Inflexão: ponto na curva Altura *versus* Número de giros em que ocorre uma mudança na taxa de compactação (redução da altura por giro) do corpo de prova. Este parâmetro foi obtido a partir da derivada da equação polinomial que relaciona a Altura *versus* Número de giros. A equação derivada foi igualada a zero para obter o ponto de inflexão da curva. Foi determinado o número de giros e o respectivo volume de vazios (%) em que este ponto ocorre para cada corpo de prova moldado no CGS.
- *Locking point*: obtido a partir dos dados número de giros e altura do corpo de prova a cada giro. O *locking point* é definido como a primeira ocorrência de três giros consecutivos em que a altura da amostra permaneceu constante e foi precedida de duas ocorrências em que a altura se manteve inalterada para dois giros consecutivos (LP 3-2-2).

3.2.3 Etapa 2.3 - Moldagem das placas de concreto asfáltico

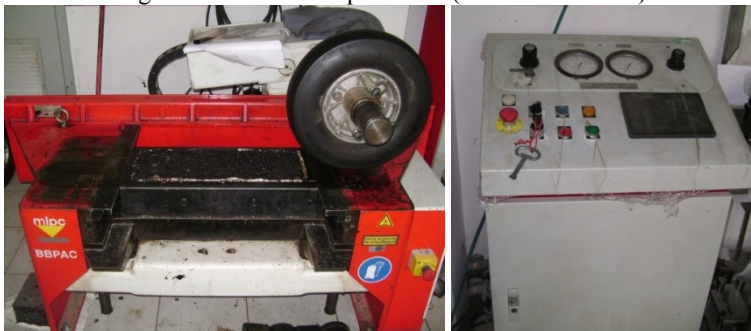
As placas de concreto asfáltico foram moldadas a fim de caracterizar a estrutura interna material (zonas de contato, orientação dos agregados e segregação) da mistura asfáltica compactada na mesa compactadora LCPC e para realizar o ensaio de desempenho à deformação permanente. Para cada finalidade foram moldadas 2 placas de 50 x 18 x 10 cm, totalizando 4 placas. A opção de moldar placas de 10 cm de altura foi por possuir maior área para análise de imagens.

Para a moldagem das placas foi utilizada a mesa compactadora LCPC, Figura 57, desenvolvida pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, atual IFSTTAR, na França.

A compactação das placas seguiu o prescrito na especificação francesa *AFNOR NF P 98-250-2 - Essais Relatifs Aux Chaussées, Préparation des Mélanges Hydrocarbonés, Partie 2: Compactage des Plaques*. A norma francesa especifica para rodovias de tráfego pesado a

compactação forte “tipo 2” para placas de concreto asfáltico de 50 x 18 x 10 cm, utilizadas no ensaio de deformação permanente.

Figura 57 - Mesa Compactadora (LAB PAV/UFSC)



Fonte: Autoria própria.

3.2.4 Etapa 2.4 - Amostras do trecho experimental

As informações sobre o trecho experimental estudado foram obtidas de Trichês (2014). O trecho está localizado na rodovia BR-101, Km 409 ao Km 437 e foi executado entre outubro e novembro de 2012. No Segmento Monitorado 2, o revestimento foi executado em três camadas com espessura de 6 cm, totalizando 18 cm. A primeira e a segunda camada (de acordo com a ordem de execução) foram objeto de investigação neste trabalho. O procedimento executivo que segue se baseia no estudo dos trechos monitorados realizados por Trichês (2014).

Execução do revestimento asfáltico

No Trecho 1 - Na pista direita foi utilizado concreto asfáltico com ligante convencional CAP 50/70 para a execução da camada de revestimento. A produção do concreto asfáltico foi feita em uma usina de asfalto do tipo gravimétrica. Após, a mistura asfáltica foi transportada em caminhões basculantes, devidamente cobertos por lona, até o local da obra. A aplicação da mistura pela vibro acabadora foi acompanhada por um rolo compactador liso Dynapac CC21. Em seguida, prosseguia-se a compactação com 2 rolos de pneus Dynapac CP 224 de 21 tf. A pressão utilizada nos pneus era menor no início da compactação e aumentava conforme a sequência de compactação, tendo sido feitas 12 coberturas por camada. Para acabamento da camada, era utilizado 1 rolo

compactador liso Dynapac CC422 de 10,4 t. A Figura 58 ilustra a execução do revestimento asfáltico.

Figura 58 - Execução de revestimento asfáltico convencional



a) Aplicação da mistura pela vibro acabadora



b) Compactação com rolo compactador liso



c) Compactação com rolo de pneus

Fonte: Trichês (2014).

O controle de execução da mistura de concreto asfáltico foi feito através da análise das características do material durante as etapas de usinagem, aplicação da mistura e compactação na pista. As características finais, como espessura e grau de compactação, bem como a análise do desempenho das misturas utilizadas foi efetuada através da retirada de amostras da pista e pela moldagem de corpos de prova em laboratório.

Antes do início dos trabalhos de usinagem da mistura asfáltica, amostras dos agregados foram coletadas na correia transportadora da usina e ensaiadas a fim de verificar se a granulometria atendia a faixa especificada em projeto. Após a usinagem, foram realizados ensaios de extração de ligante asfáltico e granulometria da mistura. Na chegada do

caminhão na pista, a mistura foi coletada e levada para o laboratório para a moldagem de corpos de prova Marshall. O controle de temperatura da mistura asfáltica foi realizado no momento da saída do material da usina, na chegada do caminhão na pista, durante o espalhamento e no início da compactação.

Após a execução de cada camada do revestimento, foram extraídas amostras com sonda rotativa para determinação do grau de compactação (GC) e espessura da camada. Amostras cilíndricas e placas foram extraídas para serem utilizadas nos ensaios de desempenho da mistura asfáltica como resistência à tração, módulo resiliente, deformação permanente e fadiga. A Figura 59 ilustra o processo de extração de amostras do trecho experimental.

Figura 59 - Corpos de prova e placas extraídos do trecho experimental



a) Corpos de prova cilíndricos extraídos com sonda rotativa



b) Serragem da placa na pista



c) Retirada da placa obtida a partir da serragem



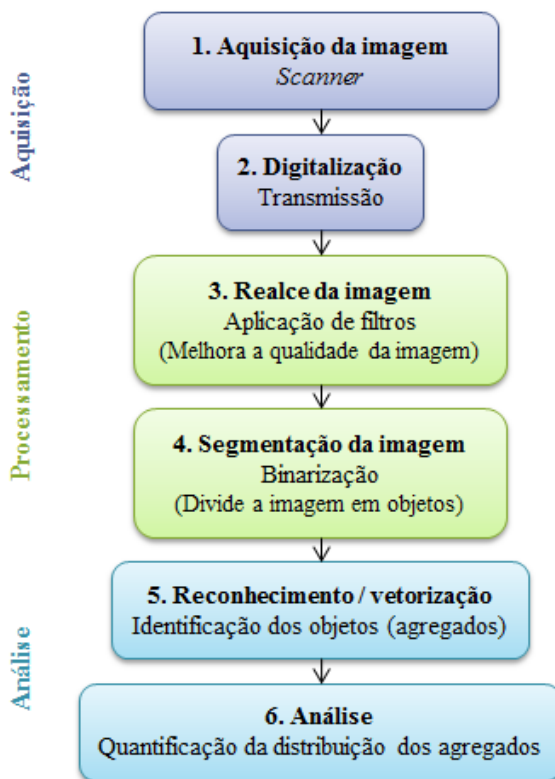
d) Placa extraída da pista com máquina de corte

Fonte: Trichês (2014).

3.3 ETAPA 3 - PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Para a caracterização da estrutura interna das misturas asfálticas foi utilizado o método do Processamento Digital de Imagem que compreende as etapas apresentadas na Figura 60. À exceção da aquisição das imagens, as demais etapas foram realizadas no software IPAS-2¹³.

Figura 60 - Etapas para a análise de imagens

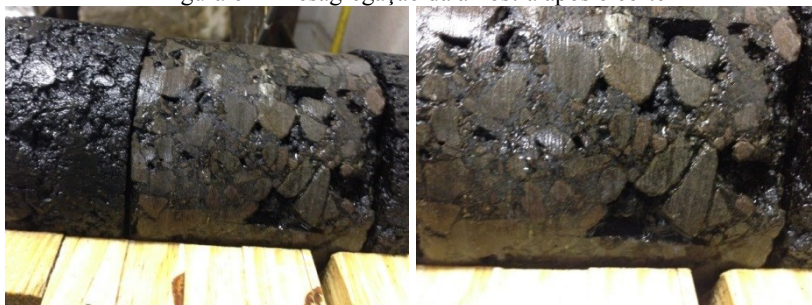


Fonte: Autoria própria.

¹³ Uma licença do *software* foi cedida pelo professor Hussain Bahia, da Universidade de Wisconsin, para a utilização neste trabalho científico.

Para avaliar a compactação das misturas asfálticas por meio do Processamento Digital de Imagens, foi realizado o seccionamento das amostras atendendo o mínimo de 3 cortes (6 imagens) por amostra conforme proposto por Sefidmazgi e Bahia (2014). Como a espessura é um fator limitador do número de cortes, esse critério não pôde ser atendido nos cortes verticais dos corpos de prova Marshall. Espessuras delgadas e seções de pouca área favorecem a desagregação do material, exemplificada na Figura 61.

Figura 61 - Desagregação da amostra após o corte



a) Amostra extraída do trecho experimental posicionada para o corte



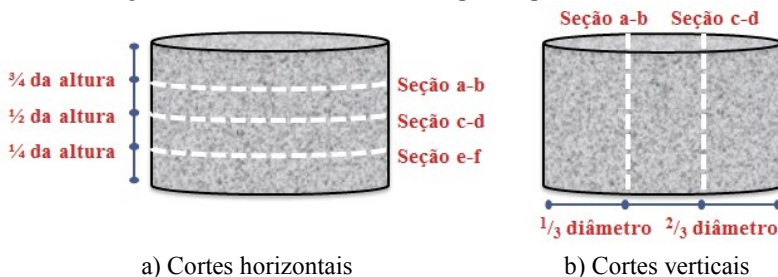
b) Amostra desagregada após o corte

Fonte: Autoria própria.

Seccionamento dos corpos de prova Marshall

Os corpos de prova Marshall (diâmetro 10 cm e altura aproximadamente 6 cm) foram cortados verticalmente e horizontalmente conforme o desenho esquemático da Figura 62. Devido à menor área de análise da imagem e maior fragilidade ao corte, optou-se por analisar um número maior de corpos de prova garantindo, ao menos, a área total de imagem analisada para cada condição do CGS.

Figura 62 - Seccionamento dos corpos de prova Marshall



a) Cortes horizontais

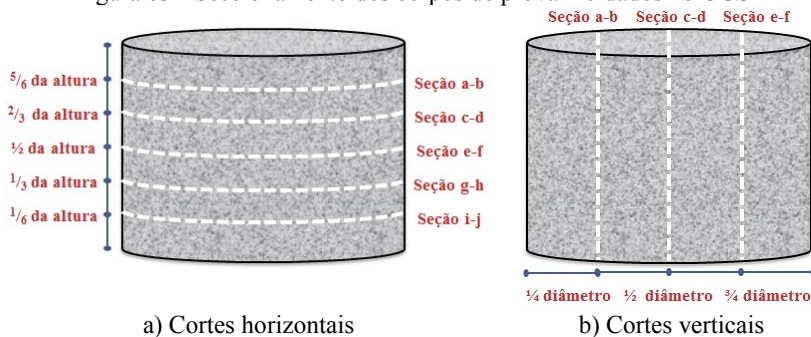
b) Cortes verticais

Fonte: Autoria própria.

Seccionamento dos corpos de prova produzidos no CGS

Os corpos de prova moldados no CGS (diâmetro 15 cm e altura aproximadamente 11 cm) foram serrados verticalmente e horizontalmente conforme o desenho esquemático da Figura 63. Embora o corpo de prova possua 15 cm de diâmetro, não foi possível a realização de 5 cortes verticais devido à instabilidade da seção com menor área (extremidades do corpo de prova) e às fatias verticais seccionadas serem mais facilmente desagregadas quando comparadas a uma seção horizontal seccionada de mesma espessura.

Figura 63 - Seccionamento dos corpos de prova moldados no CGS



a) Cortes horizontais

b) Cortes verticais

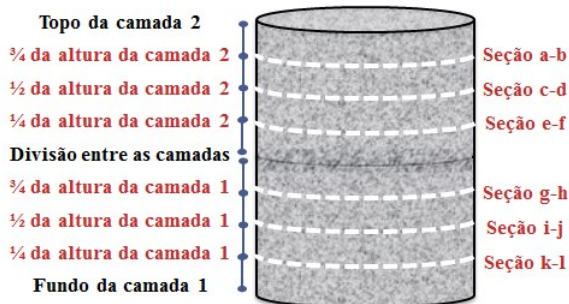
Fonte: Autoria própria.

Seccionamento das amostras do trecho experimental

Devido à quantidade restrita de amostras do trecho experimental, os cortes horizontais foram realizados em amostras cilíndricas extraídas no campo da primeira e da segunda camada. O número de corpos de prova seccionados foi limitado ao número de amostras do trecho experimental disponíveis. As amostras foram serradas conforme o

desenho esquemático da Figura 64. Este seccionamento permitiu que em uma camada fosse realizada a análise em no mínimo três seções. Não foi realizado um corte na divisão entre as camadas por ser uma região muito frágil e desagregável.

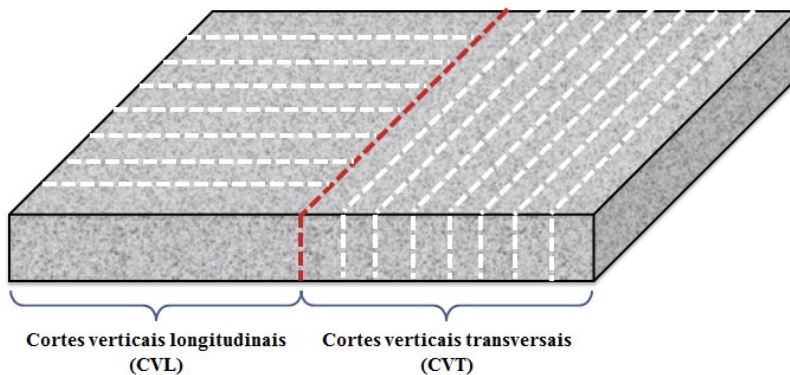
Figura 64 - Seccionamento horizontal das amostras do trecho experimental



Fonte: Autoria própria.

Os cortes verticais, longitudinais e transversais, foram realizados em duas placas (uma de cada camada) extraídas de dimensões (52 x 26 x 6) cm, como mostra a Figura 65. O número de cortes foi o maior possível considerando o limite de espessura das fatias.

Figura 65 - Seccionamento vertical das placas do trecho experimental

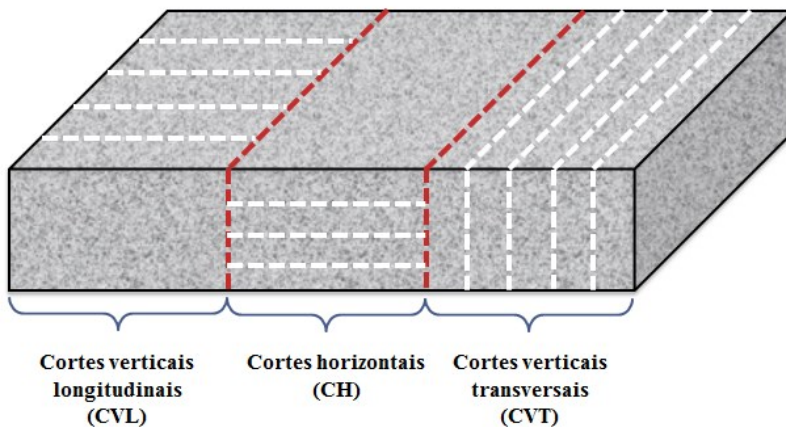


Fonte: Autoria própria.

Seccionamento das placas de concreto asfáltico

Duas placas de concreto asfáltico ($50 \times 18 \times 10$) cm moldadas em laboratório foram, inicialmente, serradas em três partes. Em cada uma das partes foram realizados cortes: verticais longitudinais, horizontais, verticais transversais, ilustrados na Figura 66.

Figura 66 - Seccionamento horizontal e vertical das placas de concreto asfáltico



Fonte: Autoria própria.

Para garantir a precisão do corte e assegurar a segurança do operador durante o processo de serragem, foram, neste trabalho, confeccionados moldes de madeira para o posicionamento/fixação dos corpos de prova cilíndricos. Dois tipos de moldes distintos, apresentados na Figura 67, foram utilizados para cortar as seções horizontais e as seções verticais.

Figura 67 - Moldes de madeira utilizados na serragem dos corpos de prova cilíndricos



a) Berço de madeira para cortes horizontais



b) Corpo de prova no berço de madeira



c) Molde de madeira e bastão de apoio para cortes verticais



d) Corpo de prova no molde de madeira e bastão apoiado

Nota: Fotografias sem escala. Corpo de prova de 15 cm de diâmetro.
Fonte: Autoria própria.

Os corpos de prova foram cortados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da UFSC por uma serra de disco diamantado. A Figura 68 ilustra o processo de corte realizado.

Figura 68 - Corte de corpos de prova cilíndricos na serra de disco diamantado



a) Amostra do campo com marcas para o corte



b) Amostra no molde de madeira posicionada para o corte horizontal



c) Seccionamento horizontal do corpo de prova CGS com molde de madeira



d) Detalhe do corte horizontal do corpo de prova CGS com serra de disco diamantado



e) Seccionamento vertical do corpo de prova CGS com molde de madeira



f) Detalhe do corte vertical do corpo de prova CGS com serra de disco diamantado

Fonte: Autoria própria.

Após a serragem, as amostras foram secas e limpas com pincel para remoção do pó. Então, foram digitalizadas as duas superfícies de

cada corte por um *scanner* convencional¹⁴. As imagens foram obtidas com uma resolução de 600 dpi (pontos por polegada, do inglês *dots per inch*). Posteriormente, foi dado prosseguimento às etapas do PDI utilizando o *software* IPAS-2. Os parâmetros estudados neste trabalho foram: (i) zonas de contato entre as partículas de agregados; (ii) orientação das partículas e (iii) segregação radial ou vertical das partículas.

A metodologia de uso do IPAS-2 seguiu as etapas definidas pelo próprio programa:

- i. Na Etapa 1, a imagem foi importada (aberta) no programa.
- ii. Na Etapa 2, definiu-se a resolução da imagem. Relacionada com a resolução do equipamento de aquisição da imagem, definir a resolução da imagem permite que o programa interprete as dimensões reais do objeto. A resolução de 600 dpi de aquisição da imagem equivale a 0,041667 mm/pixel.
- iii. Na Etapa 3, o programa solicita a delimitação da área da imagem a ser analisada (permitindo que sejam excluídas as imperfeições da borda do corpo de prova e sombras decorrentes da digitalização).
- iv. Na Etapa 4, são inseridas no *software* as seguintes propriedades do corpo de prova: percentual de volume de vazios; teor de ligante; massa específica dos agregados, do ligante: massa específica do ligante asfáltico; e a curva granulométrica de laboratório. Essas propriedades servem para estabelecer a comparação da curva granulométrica de laboratório *versus* curva granulométrica estimada da imagem analisada. Este processo de comparação é fundamental para o ajuste dos filtros da imagem. Uma vez identificadas as intensidades dos filtros adequadas para a coloração do mástique e dos agregados, estas devem ser iguais para todo o conjunto de imagens analisadas de uma mesma mistura asfáltica.

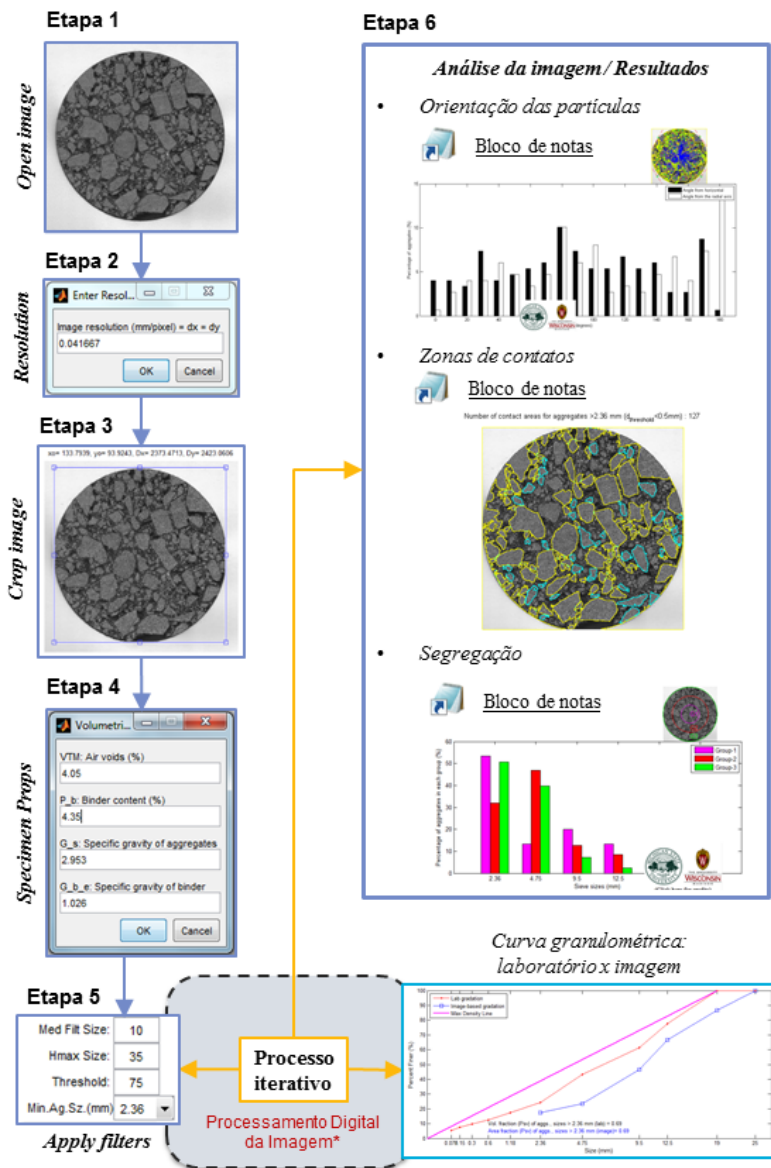
¹⁴ Multifuncional HP Deskjet Ink Advantage 2546, Impressora, Copiadora e Scanner.

- v. A Etapa 5 consiste na aplicação de filtros, usados com o objetivo de remover as falhas na imagem e a variação na intensidade dos pixels (deixando a imagem, principalmente as áreas dos agregados, com uma escala de cinza uniforme). Nesta etapa, o *software* permite que o usuário fixe o menor tamanho de agregado¹⁵. Agregados maiores são interpretados como partículas e agregados menores são parte integrante do mástique após a aplicação dos filtros. Em seguida, a imagem sofreu um processo de detecção de bordas, que permitiu a definição das formas dos agregados na imagem, e o processo de transformação em preto e branco (binarização), que permite a distinção entre os agregados e o mástique na imagem.
- vi. Na Etapa 6, os resultados para os parâmetros requeridos foram fornecidos automaticamente pelo *software*. Quanto às zonas de contato, foi obtida uma contagem com o número de vezes em que foi identificado algum contato agregado-agregado na imagem analisada, o comprimento e a orientação (ângulo em graus) deste contato. O resultado da orientação das partículas foi obtido por meio de um bloco de notas com os agregados e sua respectiva orientação (ângulo em graus) em relação aos eixos radial e horizontal. Com relação à segregação radial, analisada em seções circulares, foram obtidas as frequências de agregados encontrados em cada uma das três regiões radiais definidas pelo *software* utilizado, por tamanho de agregado. Para as seções retangulares, o *software* analisa a segregação vertical das partículas de forma análoga à segregação radial.

Um fluxograma ilustrado do processo de análise da imagem é apresentado na Figura 69. O Processamento Digital da Imagem realizado pelo IPAS-2 é detalhado na Figura 70.

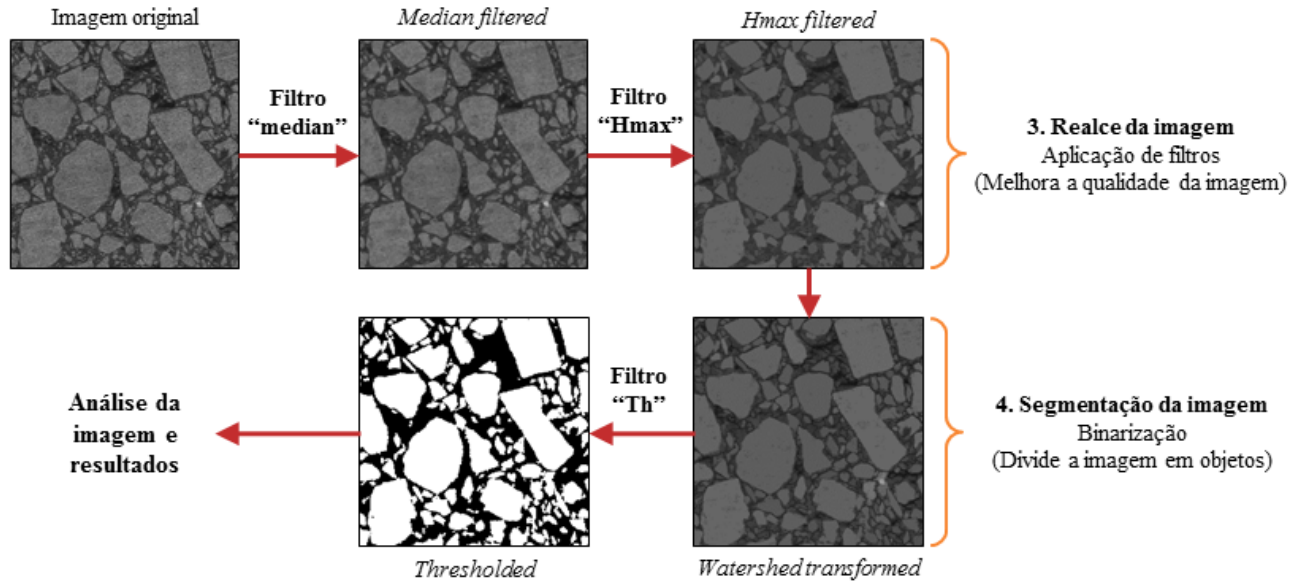
¹⁵ O tamanho mínimo do agregado deve ser pelo menos 10 vezes a resolução da imagem. Para este caso: 0,41667 milímetros.

Figura 69 - Fluxograma do processo de análise da imagem no IPAS-2



Nota: *O Processamento Digital da Imagem é apresentado na Figura 69.
Fonte: Autoria própria.

Figura 70 - Processamento Digital de Imagem ilustrado realizado pelo IPAS-2

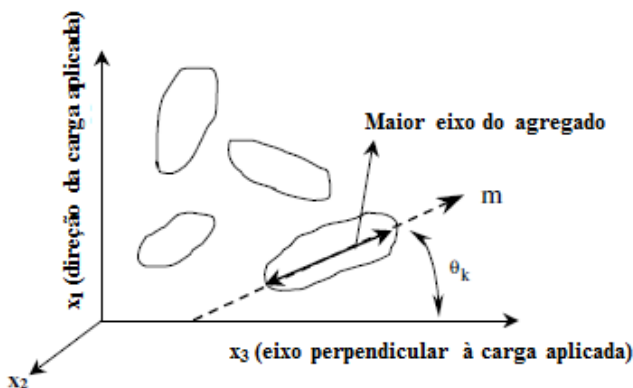


Fonte: Autoria própria.

Os parâmetros/índices¹⁶ utilizados da análise de imagens obtidas de cortes horizontais e verticais para caracterizar e comparar a macroestrutura (esqueleto mineral) foram os relacionados a seguir.

- i. Quanto à orientação dos agregados:
 - Ângulo médio absoluto de orientação horizontal dos agregados - θ_k : medida angular existente entre o maior eixo de uma partícula e o eixo horizontal (Figuras 71 e 72);

Figura 71 - Ângulo de orientação horizontal do agregado



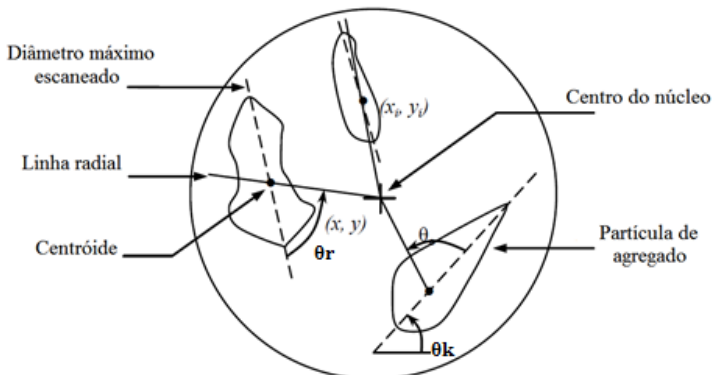
Fonte: Adaptado de Tashman et al. (2005).

- Ângulo médio absoluto de orientação radial dos agregados - θ_r ¹⁷: medida angular existente entre o maior eixo de uma partícula e o eixo radial (Figura 72);

¹⁶ Detalhados e ilustrados no item 2.3 Análise da estrutura interna de misturas asfálticas.

¹⁷ Mesmo que este parâmetro seja utilizado para avaliar o efeito de confinamento do molde em corpos de prova cilíndricos, o ângulo de orientação radial foi calculado para corpos de prova não cilíndricos (amostras extraídas do campo e placas confeccionadas na mesa compactadora tipo LCPC) para comparação dos métodos de compactação.

Figura 72 - Orientação das partículas do agregado em uma seção circular



Fonte: Adaptado de Hassan, Airey e Kahn (2012).

- Vetor magnitude - Δ : quantificação da distribuição da orientação dos agregados (orientação preferencial), definido pela Equação 8.

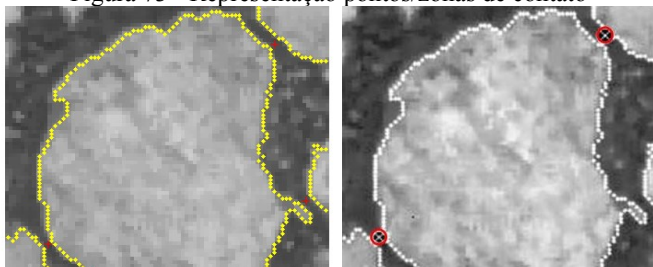
$$\Delta = \left(\frac{100}{N}\right) \times \sqrt{(\sum \text{sen } 2\theta_k)^2 + (\sum \text{cos } 2\theta_k)^2} \quad (8)$$

Onde: Δ é o vetor magnitude, em %; θ_k é o ângulo com a horizontal de um agregado isolado e N é o número de agregados analisados na imagem.

ii. Quanto às zonas de contato:

- Ocorrência (quantidade) de zonas de contato por área investigada, representação na Figura 73;

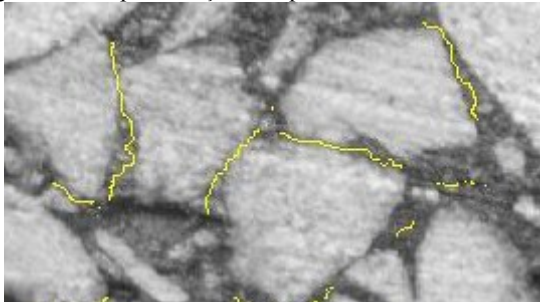
Figura 73 - Representação pontos/zonas de contato



Fonte: Adaptado de Bahia (2013).

- Comprimento, em milímetros, de contatos por área investigada, representado na Figura 74;

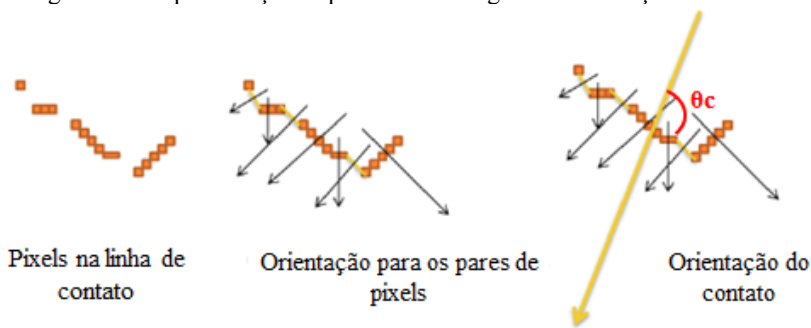
Figura 74 - Representação comprimento da zona de contato



Fonte: Adaptado de Bahia (2013).

- Ângulo médio absoluto de orientação dos contatos - θ_c , em seções verticais, ilustrado na Figura 75;

Figura 75 - Representação esquemática do ângulo de orientação do contato



Fonte: Adaptado de Bahia (2013).

- Vetor magnitude dos contatos - Δc : distribuição da orientação dos contatos, determinado pela Equação 9.

$$\Delta = \left(\frac{100}{N}\right) \times \sqrt{(\sum \sin 2\theta_c)^2 + (\sum \cos 2\theta_c)^2} \quad (9)$$

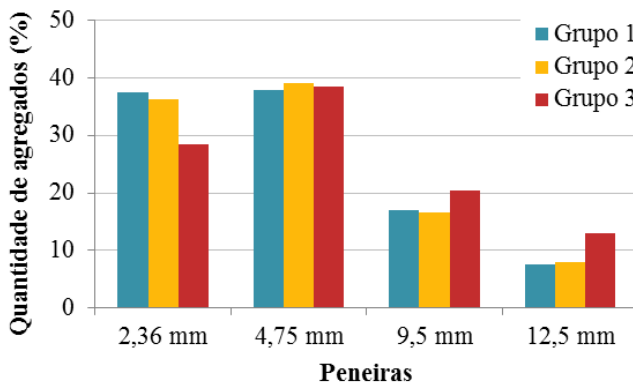
Onde: Δ é o vetor magnitude, em %; θ_c é o ângulo de orientação de uma zona de contato isolada e N é o número de zonas de contatos analisadas na imagem.

iii. Quanto à segregação:

- Segregação vertical, em imagens retangulares, representada pelo histograma de frequência de agregados retidos em peneiras por grupo de segregação;
- Segregação radial, em imagens circulares, representada pelo histograma de frequência de agregados retidos em peneiras por grupo de segregação;

A segregação é apresentada pelo *software* por meio de histogramas de frequência, como exemplificado na Figura 76.

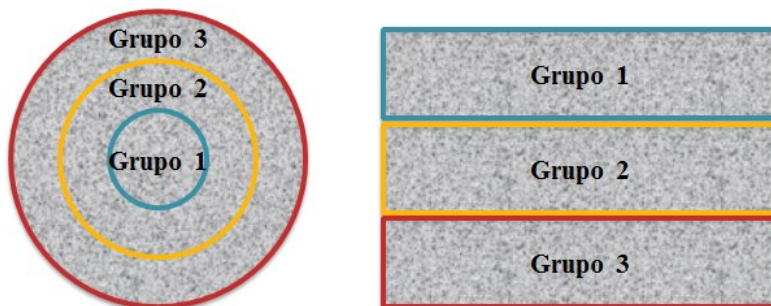
Figura 76 - Histograma de frequências para análise da segregação



Fonte: Autoria própria.

A Figura 77 ilustra os grupos de segregação Grupo 1 (G1), Grupo 2 (G2) e Grupo 3 (G3), padronizados pelo *software* IPAS-2.

Figura 77 - Grupos de segregação radial e vertical



Fonte: Adaptado de Bahia (2013).

Em relação à segregação radial das partículas: (i) grupo 1, relativo ao círculo mais interno, de raio igual a um terço do raio da superfície do corpo de prova; (ii) grupo 2, relativo ao anel intermediário, de raio igual a dois terços do raio do corpo de prova; e (iii) grupo 3, relativo ao anel da borda externa, de raio igual ao raio do corpo de prova.

Quanto à segregação vertical das partículas: (i) grupo 1, relativo à fatia inferior, de altura igual a um terço da altura do corpo de prova; (ii) grupo 2, relativo à fatia intermediária, de altura igual a um terço da altura do corpo de prova; e (iii) grupo 3, relativo à fatia superior, de altura igual a um terço da altura do corpo de prova.

- Índice de segregação (vertical ou radial): parâmetro quantitativo para a segregação avaliada pelo *software* IPAS, determinado pela Equação 10.

$$IS = \sum CV_i \times D_i \quad (10)$$

Onde: D é o tamanho do agregado (peneira retida) em mm; CV é o coeficiente de variação do agregado *i* nas três regiões de segregação; e *i* é o tamanho do agregado (peneira retida).

Para análise e comparação dos parâmetros, foi calculado o valor médio a partir das imagens de uma mesma amostra. Por exemplo, de um corpo de prova que foram feitos cinco cortes, foram obtidas dez imagens. Para cada imagem foi calculado o ângulo médio absoluto de orientação radial e, a média dos valores obtidos para cada imagem é o valor “global” da amostra.

3.4 ETAPA 4 - ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Nesta etapa foi realizado o ensaio de desempenho à deformação permanente de placas extraídas em campo¹⁸ e de placas de concreto asfáltico produzidas em laboratório.

O desempenho das misturas à formação da trilha de roda foi avaliado com o equipamento *Orniéreur*, ilustrado na Figura 78. Este ensaio foi realizado conforme as prescrições da norma francesa AFNOR NF P 98-253-1 - *Essais Relatifs Aux Chaussées, Déformation Permanente des Mélanges Hydrocarbonés*.

Figura 78 - Equipamento *Orniéreur*



Fonte: Melo (2014).

Foram moldadas 2 placas de 50 x 18 x 10 cm de concreto asfáltico, sendo estas, submetidas ao ensaio de deformação permanente após um período de 15 dias da compactação. O equipamento testa duas placas simultaneamente com a passagem de um eixo simples de roda simples. Os ensaios foram conduzidos a 60°C até 30.000 ciclos.

O equipamento possui rodas pneumáticas lisas de eixo simples, que aplicam uma carga de 5,0 kN e pressão de inflagem dos pneus de 0,6 MPa. São ensaiados dois corpos de prova simultaneamente, a uma temperatura de 60°C, expostos a carregamentos longitudinais de até 30.000 ciclos com frequência de 1 Hz.

¹⁸ Ensaio realizado por Trichês (2014).

Antes do ensaio, as placas foram acomodadas no molde com a passagem de 1.000 ciclos do pneu em temperatura ambiente. Em seguida, as placas foram condicionadas a temperatura de 60°C durante 8 a 12 horas. Foram realizadas leituras a 0, 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000 ciclos em 15 pontos distintos da placa (normatizados pela AFNOR NF P 98-253-1) com paquímetro digital. Algumas etapas do ensaio são ilustradas na Figura 79.

Figura 79 - Ensaio de deformação permanente



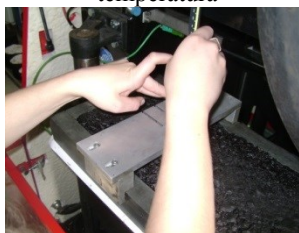
a) Placa posicionada para o ensaio



b) Termopar na placa para controle de temperatura



c) Finalização dos 100 ciclos



d) Posicionamento do aparato de leitura



e) Leitura do afundamento com paquímetro



f) Placa após 100 ciclos

Fonte: Autoria própria.

A profundidade da deformação permanente (ou afundamento da trilha de roda) em cada ciclo é calculada pela média das profundidades

medidas nos 15 pontos em relação ao referencial do ciclo zero, utilizando-se a Equação 11.

$$P_i\% = 100x \frac{\sum j(m_{ij}-m_{0j})}{15xE} \quad (11)$$

Onde: $P_i\%$ é a média de afundamento na superfície da placa, no ciclo i (%); j é o ponto de leitura da deformação permanente da placa (1 a 15); m_{ij} é a medida da profundidade do ponto j , no ciclo i ; m_{0j} é a medida da profundidade do ponto j , no ciclo 0; e ES é a espessura da placa.

A partir desses resultados, é possível descrever graficamente a relação número de ciclos *versus* percentual de afundamento da trilha de roda, designada curva de deformação.

3.5 ETAPA 5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta etapa são apresentados os resultados obtidos nas etapas 1 a 4 e será feita uma discussão para avaliar a compactação das misturas asfálticas moldadas em laboratório e das amostras extraídas em campo. A Etapa 5 é apresentada no Capítulo 4.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos nas cinco etapas descritas no Capítulo 3 - Materiais e métodos.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A caracterização dos materiais, Etapa 1, compilou os resultados obtidos por Melo (2014).

4.1.1 Agregados

As propriedades dos agregados, utilizadas para a aceitação ou rejeição do material na dosagem de misturas asfálticas, são apresentadas na Tabela 12. Os critérios Superpave a serem obedecidos são relativos a um volume de tráfego pesado. O agregado graúdo é a fração passante na peneira 3/4" e retido na peneira N° 4; o agregado miúdo representa a fração passante na peneira N° 4 e retido na peneira N° 200; e o material pulverulento é o material passante na peneira N° 200.

Tabela 12 - Fracionamento dos agregados para a composição granulométrica

<i>Propriedades dos agregados</i>	<i>Resultados</i>	<i>Critérios Superpave</i>
Massa específica real do agregado graúdo	2,953 g/cm ³	-
Massa específica aparente do agregado graúdo	2,880 g/cm ³	-
Absorção do agregado graúdo	0,849%	-
Massa específica real do agregado miúdo	2,974 g/cm ³	-
Massa específica real do material pulverulento	2,804 g/cm ³	-
Angularidade do agregado graúdo	100%/100%	*100%/100% mín.
Angularidade do agregado miúdo	49,18%	45% mín.
Partículas planas e alongadas	9,59%	10% máx.
Teor de argila (Equivalente de areia)	61,2%	50% mín.
Dureza (Abrasão Los Angeles)	11,58%	35-45% máx.
Sanidade	2,14%	10-20% máx.
Materiais deletérios	0%	0,2-10% máx.

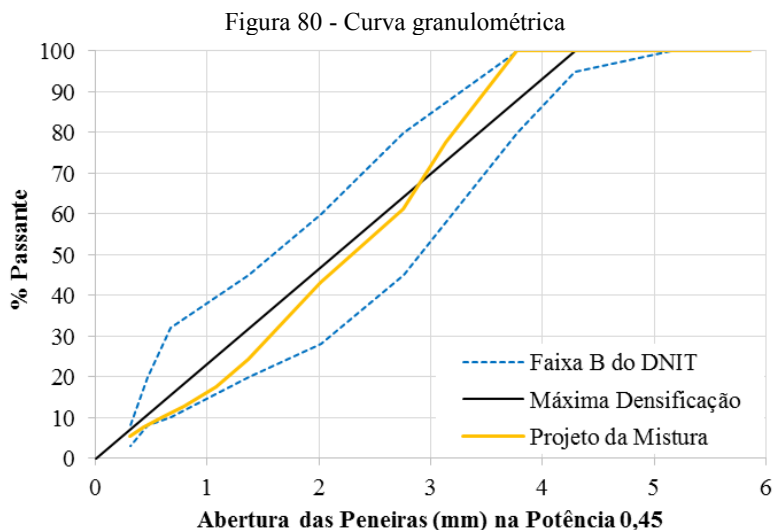
Nota: *Ex.: 85%/80%, significa que 85% do agregado graúdo apresenta uma ou mais faces fraturadas e 80% tem duas ou mais faces fraturadas.

Fonte: Melo (2014).

Concluiu-se que os agregados são adequados para a produção de misturas asfálticas.

4.1.2 Composição granulométrica

A curva granulométrica, definida pelo Centro de Pesquisas e Desenvolvimento (CENPES) da Petrobrás, apresentada na Figura 80 e na Tabela 13, seguiu a especificação Superpave e atende aos limites da Faixa B do DNIT (TRICHÊS, 2014).



Fonte: Adaptado de Trichês (2014).

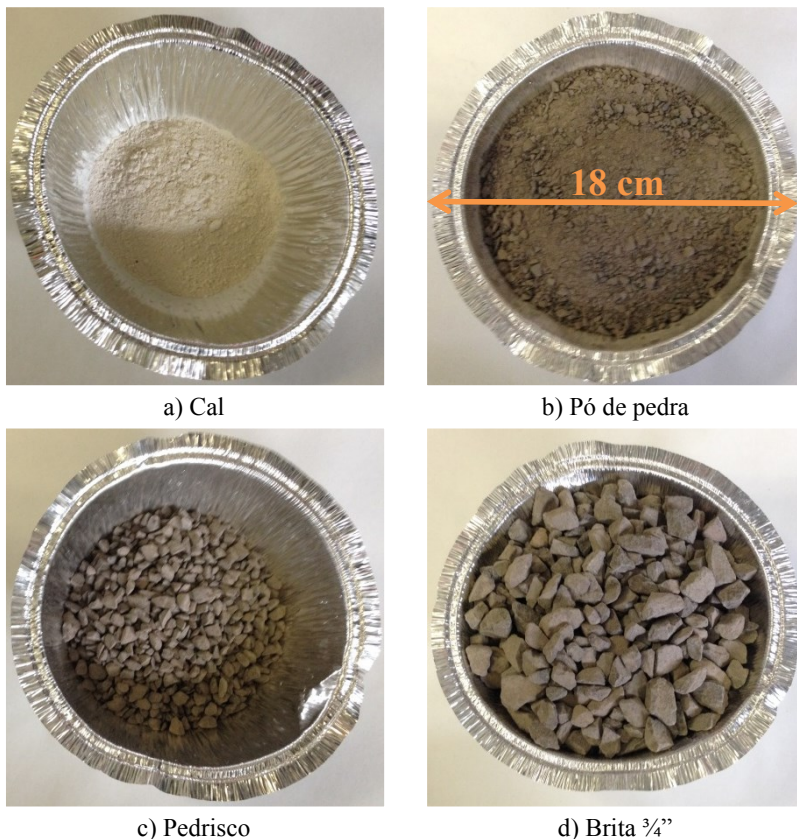
Tabela 13 - Curva granulométrica: porcentagem passante em cada peneira

<i>Peneiras - Série ASTM</i>	<i>% Passante</i>
3/4"	100
1/2"	77,5
3/8"	61,3
Nº 4	43,3
Nº 10	24,3
Nº 16	17,4
Nº 30	12,6
Nº 50	9,8
Nº 100	7,6
Nº 200	5,4

Fonte: Trichês (2014).

A curva adotada é composta de 43% de brita 3/4" (tamanho nominal máximo de 19,1 mm); 15,5% de pedrisco 3/8" (tamanho nominal máximo de 9,1 mm); 40% de pó de pedra (tamanho nominal máximo de 4,75 mm) e 1,5% de cal (filer). Ou, quanto ao tamanho dos agregados: 56,7% de agregado graúdo; 37,9% de agregado miúdo e 5,4% de material pulverulento. Os agregados utilizados na produção da mistura asfáltica, mostrados na Figura 81, não foram peneirados para representar a composição granulométrica do campo.

Figura 81 - Agregados utilizados na produção da mistura asfáltica



Nota: Quantidade dos materiais atende à proporção da composição granulométrica.

Fonte: Autoria própria.

4.1.3 Ligante asfáltico

A Tabela 14 apresenta os resultados da caracterização do ligante: a média de três determinações de penetração (25°C, 100g e 5s) em décimos de milímetros; a média de dois valores de ponto de amolecimento; e o índice de suscetibilidade térmica (IST).

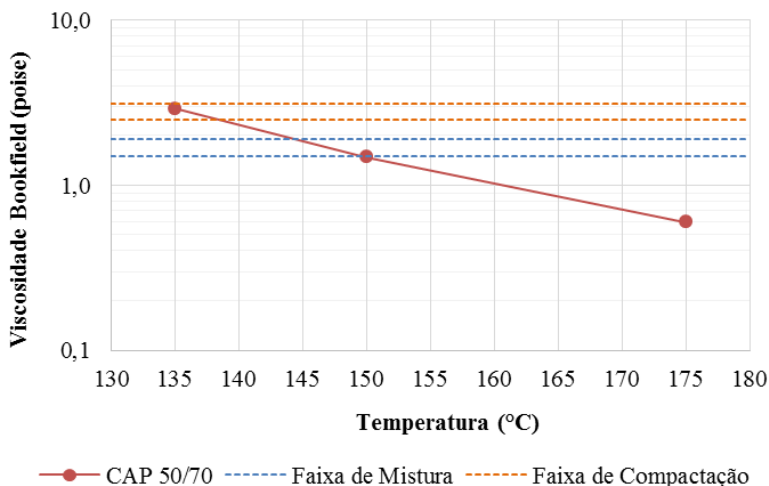
Tabela 14 - Caracterização do ligante asfáltico CAP 50-70

<i>Penetração (1/10 mm)</i>	<i>Ponto de amolecimento (°C)</i>	<i>IST</i>
57	47,9	-1,44

Fonte: Adaptado de Melo (2014).

A viscosidade aparente do ligante asfáltico virgem foi determinada utilizando o viscosímetro rotacional Brookfield, com *spindle* 21, nas temperaturas de 135°C (20 rpm), 150°C e 175°C. A Figura 82 apresenta o gráfico de viscosidade aparente *versus* temperatura, a partir do qual é possível obter as faixas de compactação e de usinagem.

Figura 82 - Viscosidade aparente *versus* temperatura



Fonte: Adaptado de Melo (2014).

As temperaturas, apresentadas na Tabela 15, correspondem à viscosidade aparente média na faixa de usinagem (0,17 Pa.s) e na faixa de compactação (0,25 a 0,31 Pa.s). A temperatura dos agregados foi

obtida pelo acréscimo de 10 a 15°C na temperatura do ligante asfáltico, conforme preconiza a norma DNER 043/1995.

Tabela 15 - Temperaturas de usinagem e compactação da mistura asfáltica

<i>Temperatura (°C)</i>		
<i>Usinagem</i>		<i>Compactação da mistura asfáltica</i>
<i>Ligante asfáltico</i>	<i>Agregados</i>	
148	158 a 163	134 - 138,8

Fonte: Adaptado de Melo (2014).

4.1.4 Dosagem da mistura asfáltica

A dosagem da mistura asfáltica (ângulo de inclinação do eixo do CGS igual a 1,25°) foi realizada por Melo (2014). A Tabela 16 mostra os critérios volumétricos obtidos na referida dosagem.

Tabela 16 - Temperaturas de usinagem e compactação da mistura asfáltica

<i>Mistura asfáltica</i>	<i>% Ligante</i>	<i>Gmm (g/cm³)</i>	<i>Vv (%)</i>	<i>VAM (%)</i>	<i>RBV (%)</i>	<i>RPB</i>
<i>Crítérios Superpave</i>	-	-	4,00	13,00 <i>min</i>	65 - 75	0,8 - 1,6
CAP 50-70 ($\alpha=1,25^\circ$)	3,50	2,725	6,50	14,35	54,66	1,74
	4,00	2,701	5,22	14,38	63,68	1,50
	Ótimo: 4,35	2,685	4,01	14,12	71,57	1,37
	4,50	2,678	3,78	14,27	73,52	1,32
	5,00	2,655	1,89	13,79	86,29	1,17

Fonte: Adaptado de Melo (2014).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA E PARÂMETROS DA COMPACTAÇÃO

Nos itens seguintes são apresentadas a caracterização (massa específica aparente, porcentagem da Gmm (massa específica aparente máxima teórica) obtida, Grau de Compactação, volume de vazios) dos corpos de prova moldados e analisados neste trabalho. Para os corpos de prova compactados no CGS são ainda apresentados: o ponto de inflexão da compactação, a inclinação da curva de densificação e o *Locking point*.

4.2.1 Corpos de prova Marshall

A Tabela 17 apresenta a caracterização dos corpos de prova Marshall moldados em laboratório e seccionados para a análise da estrutura interna. Os corpos de prova de 1 a 16 foram destinados à análise da estrutura interna seccionamento vertical e, de 17 a 27, seccionamento horizontal.

Tabela 17 - Caracterização dos corpos de prova Marshall

<i>CP</i>	<i>Gmb (g/cm³)</i>	<i>Vv %</i>	<i>GC %</i>	<i>CP</i>	<i>Gmb (g/cm³)</i>	<i>Vv %</i>	<i>GC %</i>
1	2,562	4,59	99,38	15	2,558	4,48	99,22
2	2,557	4,77	99,19	16	2,547	5,62	98,80
3	2,553	4,89	99,03	17	2,553	4,92	99,03
4	2,584	3,78	100,2	18	2,553	4,92	99,03
5	2,583	3,79	100,2	19	2,581	3,88	100,1
6	2,565	4,48	99,50	20	2,581	3,88	100,1
7	2,534	5,62	98,29	21	2,592	3,48	100,5
8	2,538	5,47	98,45	22	2,565	4,47	99,50
9	2,554	4,89	99,07	23	2,565	4,47	99,50
10	2,566	4,43	99,53	24	2,565	4,47	99,50
11	2,532	5,70	98,22	25	2,554	4,87	99,07
12	2,583	3,78	100,2	26	2,565	4,47	99,50
13	2,577	3,79	99,96	27	2,565	4,47	99,50
14	2,567	4,04	99,57				
<i>Méd.</i>	2,563	4,53	99,42				
<i>DP</i>	0,015	0,61	0,60				

Fonte: Autoria própria.

Como mostra a Tabela 17, os corpos de prova Marshall moldados atenderam ao intervalo de 97 a 101% do Grau de Compactação especificado, sendo o valor médio igual a 99,42%. Igualmente os valores de massa específica aparente (*Gmb*) e percentual de volume de vazios apresentaram pouca variabilidade. Os valores médios de *Gmb* e *Vv%* foram 2,563 g/cm³ e 4,53%, respectivamente.

4.1.2 Corpos de prova do Compactador Giratório Superpave

Os resultados obtidos da compactação dos corpos de prova no CGS estão apresentados separadamente, de acordo com o ângulo de inclinação do eixo de rotação (0,75°; 1°; 1,25°; 1,5° e 1,75°).

Ângulo de inclinação do eixo de rotação 0,75°

A Tabela 18 e a Figura 83 mostram os parâmetros de compactação e as curvas de compactação, respectivamente, de 10 corpos de prova moldados com o ângulo de inclinação do eixo igual a 0,75°.

A massa específica aparente, o volume de vazios e o grau de compactação obtidos para cada um dos corpos de prova moldados atenderam ao intervalo de 97 a 101% do Grau de Compactação. O número de giros médio foi 285, e a amplitude entre 216 e 310, representando uma significativa variabilidade. A mudança da taxa de compactação ocorreu, em média, aos 98 giros e volume de vazios médio corresponde a 7,39%. A inclinação da curva de compactação oscilou entre 0,013 e 0,025. O intertravamento da mistura foi atingido entre 77 e 89 giros, apresentando uma menor variabilidade se comparado ao número de giros total dos corpos de prova. Nos pontos *locking point*, os valores médios de volume de vazios e de %Gmm foram 7,79% e 92,21%. Ao analisar o número de giros para diferentes percentuais de GC, observou-se uma variabilidade superior à análise dos giros total e dos giros no ponto de inflexão. Os valores médios de giros foram 121, 171 e 213 para 97%, 98% e 99% do Grau de Compactação. O coeficiente de variação oscilou entre 22 e 27%. Apenas um corpo de prova atingiu 100% de GC.

A partir da Figura 83, visualiza-se que os pontos de inflexão e *locking point* ocorrem de maneira dispersa nos corpos de prova moldados. Não houve uma tendência definida destes pontos na curva de compactação. Observou-se que a compactação finalizou, pelo critério da massa específica, muito além da mudança da taxa de compactação (inflexão) e do intertravamento da mistura (*locking point*).

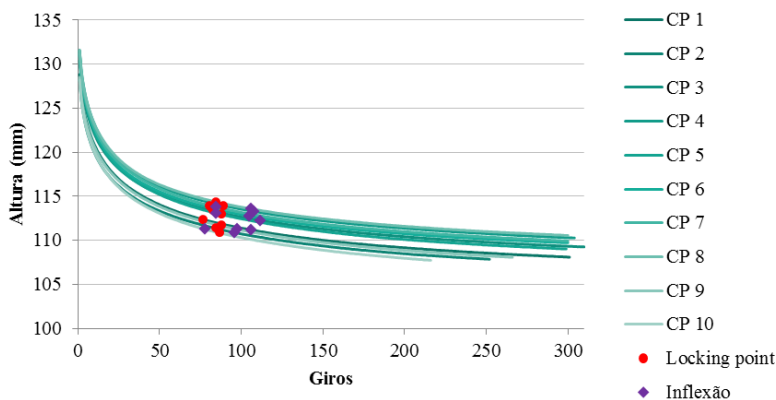
Tabela 18 - Parâmetros de compactação obtidos para os corpos de prova moldados no CGS ($\alpha=0,75^\circ$)

CP	Gmb (g/cm ³)	Vv %	GC %	Giros	Inflexão		Icurva	Locking point			Giros			
					Giros	Vv %		Giros	Vv %	%Gmm	97% GC	98% GC	99% GC	100% GC
1*	2,565	4,47	99,5	301	106	7,13	0,0158	77	8,08	91,92	116	162	240	-
2	2,577	4,02	100,0	252	96	6,64	0,0209	85	7,01	92,99	90	122	172	-
3*	2,558	4,73	99,2	310	112	7,28	0,0147	83	8,15	91,85	130	184	277	-
4	2,542	5,33	98,6	304	108	7,83	0,0132	89	8,37	91,63	156	229	-	-
5*	2,573	4,17	99,8	299	85	7,59	0,0170	88	7,48	92,52	108	148	213	-
6*	2,544	5,25	98,7	300	105	7,79	0,0136	82	8,51	91,49	149	217	-	-
7	2,561	4,62	99,3	300	85	7,84	0,0153	81	7,97	92,03	119	169	255	-
8	2,538	5,47	98,4	300	106	7,99	0,0130	85	8,60	91,40	162	241	-	-
9	2,578	3,99	100	266	98	6,70	0,0199	88	7,05	92,95	94	128	180	264
10	2,577	4,02	100	216	78	7,07	0,0252	87	6,71	93,29	83	112	154	-
Méd.	2,561	4,61	99,4	285	98	7,39	0,0169	85	7,79	92,21	121	171	213	-
DP	0,015	0,58	0,6	30	12	0,49	0,0040	4	0,68	0,68	28	46	46	-
CV %	0,60	12,49	0,6	11	12	6,65	0,23	4	8,75	0,74	23	27	22	-

Nota: *Corpos de prova destinados à análise da estrutura interna.

Fonte: Autoria própria.

Figura 83 - Curvas de compactação: Altura do corpo de prova *versus* número de giros ($\alpha=0,75^\circ$)



Fonte: Autoria própria.

Ângulo de inclinação do eixo de rotação 1°

Na Tabela 19 e na Figura 84 são apresentados os parâmetros de compactação e as curvas de compactação obtidos para 8 corpos de prova compactados com o ângulo de inclinação do eixo igual a 1° .

A massa específica aparente, o volume de vazios e o grau de compactação enquadraram-se no intervalo de 97 a 101% do Grau de Compactação. O número de giros médio foi 249, e a amplitude entre 178 e 298, representando uma elevada variabilidade com coeficiente de variação igual a 18%. O ponto de inflexão ocorreu, em média, aos 89 giros e volume de vazios médio corresponde a 6,99%. A inclinação da curva de compactação variou entre 0,0133 e 0,0305. O intertravamento da mistura foi atingido entre 76 e 90 giros, apresentando uma menor variabilidade se comparado aos números de giros total e de inflexão dos corpos de prova. Nos pontos *locking point*, os valores médios de volume de vazios e de %Gmm atingida foram 7,16% e 92,84%, respectivamente. A análise do número de giros para diferentes percentuais de GC mostrou uma variabilidade superior à análise dos giros total e dos giros no ponto de inflexão. Os valores médios de giros foram 95, 135, 164 e 190 para 97%, 98%, 99% e 100% do GC. O coeficiente de variação oscilou entre 19 e 34%. Três de oito corpos de prova atingiram 100% de GC.

Tabela 19 - Parâmetros de compactação obtidos para os corpos de prova moldados no CGS ($\alpha=1^\circ$)

CP	Gmb (g/cm ³)	Vv %	GC %	Giros	Inflexão		Icurva	Locking point			Giros			
					Giros	Vv %		Giros	Vv %	%Gmm	97% GC	98% GC	99% GC	100% GC
11*	2,567	4,39	99,57	277	100	6,94	0,0173	80	7,59	92,41	103	146	216	-
12*	2,566	4,43	99,53	295	108	7,08	0,0166	87	7,78	92,22	116	160	234	-
13	2,571	4,25	99,73	178	66	7,35	0,0305	90	6,28	93,72	76	101	137	-
14*	2,55	5,03	98,91	281	98	7,51	0,0149	76	8,22	91,78	124	182	-	-
15*	2,545	5,21	98,72	298	103	7,64	0,0133	78	8,39	91,61	139	209	-	-
16	2,582	3,84	100,2	244	89	6,58	0,0224	86	6,69	93,31	82	111	157	228
17	2,589	3,58	100,4	223	80	6,36	0,0252	80	6,36	93,64	68	93	129	186
18	2,594	3,39	100,6	199	68	6,48	0,0293	79	5,99	94,01	61	81	111	156
Méd.	2,571	4,26	99,71	249	89	6,99	0,0212	82	7,16	92,84	96	135	164	190
DP	0,017	0,65	0,68	46	16	0,49	0,0066	5	0,94	0,94	29	46	50	36
CV %	0,68	15,23	0,68	18	18	6,96	31,29	6	13,16	1,01	30	34	30	19

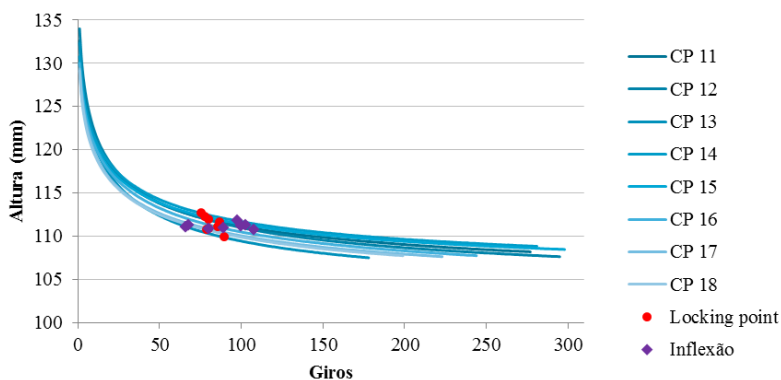
Nota: *Corpos de prova destinados à análise da estrutura interna.

Fonte: Autoria própria.

A massa específica aparente, o volume de vazios e o grau de compactação enquadraram-se no intervalo de 97 a 101% do Grau de Compactação. O número de giros médio foi 249, e a amplitude entre 178 e 298, representando uma elevada variabilidade com coeficiente de variação igual a 18%. O ponto de inflexão ocorreu, em média, aos 89 giros e volume de vazios médio corresponde a 6,99%. A inclinação da curva de compactação variou entre 0,0133 e 0,0305. O intertravamento da mistura foi atingido entre 76 e 90 giros, apresentando uma menor variabilidade se comparado aos números de giros total e de inflexão dos corpos de prova. Nos pontos *locking point*, os valores médios de volume de vazios e de %Gmm atingida foram 7,16% e 92,84%, respectivamente. A análise do número de giros para diferentes percentuais de GC mostrou uma variabilidade superior à análise dos giros total e dos giros no ponto de inflexão. Os valores médios de giros foram 95, 135, 164 e 190 para 97%, 98%, 99% e 100% do GC. O coeficiente de variação oscilou entre 19 e 34%. Três de oito corpos de prova atingiram 100% de GC.

A Figura 84 mostra as curvas de compactação com os pontos de inflexão e *locking point*. Visualiza-se que estes estão dispersos e não existe tendência definida de posicionamento destes pontos nas curvas. A finalização da compactação dos corpos de prova terminou além da mudança da taxa de compactação (inflexão) e do intertravamento da mistura (*locking point*).

Figura 84 - Curvas de compactação: Altura do corpo de prova *versus* número de giros ($\alpha=1^\circ$)



Fonte: Autoria própria.

Ângulo de inclinação do eixo de rotação 1,25°

Na Tabela 20 e na Figura 85 são expostos os parâmetros de compactação e as curvas de compactação, respectivamente, de 11 corpos de prova moldados com o ângulo de inclinação do eixo igual a 1,25°, valor este padronizado pela AASHTO.

A caracterização física dos corpos de prova atendeu ao critério adotado. A massa específica aparente, o volume de vazios e o grau de compactação enquadraram-se no intervalo de 97 a 101% do Grau de Compactação. O número de giros total oscilou entre 99 e 154 giros, sendo o valor médio igual a 119 (próximo ao número de giros de projeto, igual a 125). É verificada uma variabilidade maior dos números de giro total e de inflexão em relação ao *locking point*, quantificadas pelos coeficientes de variação igual a 15% e 13%. O ponto de inflexão ocorreu, em média, aos 82 giros e volume de vazios médio corresponde a 5,17%. A inclinação da curva de compactação variou entre 0,0368 e 0,06. O intertravamento da mistura foi atingido entre 74 e 88 giros, apresentando uma menor variabilidade (CV igual a 6%) se comparado aos números de giros total e de inflexão dos corpos de prova. Nos pontos *locking point*, os valores médios de volume de vazios e de %Gmm atingida foram 5,17% e 94,83%, respectivamente. Ao analisar o número de giros para diferentes percentuais de GC, observou-se uma variabilidade semelhante à análise dos giros total e dos giros no ponto de inflexão. Os valores médios de giros foram 51, 66, 89 e 122 para 97%, 98%, 99% e 100% do Grau de Compactação. O coeficiente de variação oscilou entre 11 e 16%. Cinco corpos de prova atingiram 100% de GC.

A Figura 85 exibe as curvas de compactação com os pontos de inflexão e *locking point* para os corpos de prova moldados com o ângulo de inclinação do eixo igual a 1,25°. Observa-se que os pontos de inflexão e *locking point* estão aglomerados em intervalos distintos das curvas, indicando que existe uma tendência definida de posicionamento destes pontos nas curvas. A finalização da compactação dos corpos de prova terminou em média 37 giros após o *locking point*.

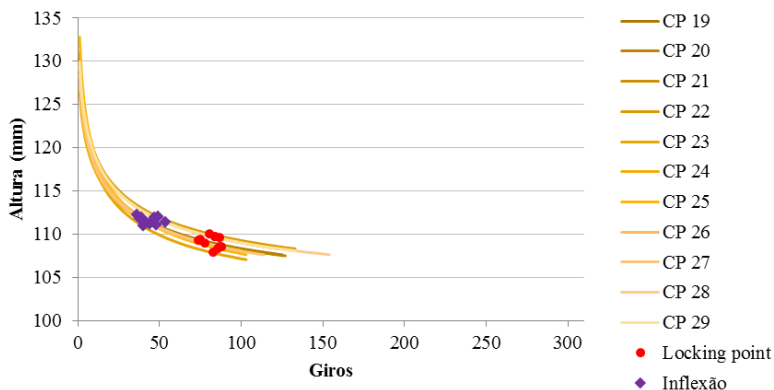
Tabela 20 - Parâmetros de compactação obtidos para os corpos de prova moldados no CGS ($\alpha=1,25^\circ$)

CP	Gmb (g/cm ³)	Vv %	GC %	Giros	Inflexão		Icurva	Locking point			Giros			
					Giros	Vv %		Giros	Vv %	%Gmm	97% GC	98% GC	99% GC	100% GC
19	2,572	4,21	99,77	125	48	7,19	0,0433	75	5,72	94,28	53	70	96	-
20	2,569	4,32	99,65	127	44	7,49	0,0414	74	5,82	94,18	54	72	99	-
21	2,563	4,54	99,42	123	47	7,65	0,0427	84	5,69	94,31	59	78	107	-
22	2,581	3,87	100,12	133	49	7,06	0,0430	81	5,38	94,62	52	68	92	127
23*	2,576	4,06	99,92	103	40	7,38	0,0565	83	4,74	95,26	46	59	78	-
24*	2,572	4,21	99,77	99	38	7,37	0,0560	78	4,95	95,05	44	58	78	-
25*	2,58	3,91	100,1	103	36	7,70	0,0600	86	4,39	95,61	44	57	73	97
26*	2,57	4,28	99,69	100	39	7,58	0,0570	88	4,69	95,31	48	62	82	-
27	2,582	3,84	100,2	114	42	7,12	0,0512	87	4,66	95,34	46	60	80	108
28	2,581	3,87	100,1	154	54	7,12	0,0368	87	5,53	94,47	59	77	105	147
29	2,58	3,91	100,1	133	48	7,16	0,0428	84	5,28	94,72	53	69	93	129
Méd.	2,575	4,09	99,89	119	44	7,35	0,0483	82	5,17	94,83	51	66	89	122
DP	0,006	0,002	0,002	17	6	0,002	0,0080	5	0,005	0,005	5	8	12	19
CV%	0,24	5,72	0,24	15	13	3,14	16,63	6	9,69	0,53	11	11	13	16

Nota: *Corpos de prova destinados à análise da estrutura interna.

Fonte: Autoria própria.

Figura 85 - Curvas de compactação: Altura do corpo de prova *versus* número de giros ($\alpha=1,25^\circ$)



Fonte: Autoria própria.

Ângulo de inclinação do eixo de rotação $1,5^\circ$

A Tabela 21 e a Figura 86 mostram os parâmetros de compactação e as curvas de compactação, respectivamente, obtidos de 11 corpos de prova moldados com o ângulo de inclinação do eixo igual a $1,5^\circ$.

A caracterização física dos corpos de prova (massa específica aparente, volume de vazios e grau de compactação) atendeu ao critério 97 a 101% do Grau de Compactação. O número de giros médio foi 96, variando entre 55 e 136. É verificada uma variabilidade maior dos números de giro total e de inflexão em relação ao *locking point*, quantificadas pelos coeficientes de variação igual a 29% e 30%. O ponto de inflexão ocorreu entre 21 e 53 giros e volume de vazios médio correspondeu a 7,75%. O intertravamento da mistura foi atingido entre 77 e 92 giros, apresentando uma menor variabilidade (CV igual a 7%). Alguns corpos de prova não atingiram o *locking point* durante a compactação devido ao aumento do esforço de cisalhamento (aumento do ângulo de inclinação do eixo de rotação) e o, conseqüente, aumento da taxa de compactação. Este aumento é quantificado pela inclinação da curva média igual a 0,0673. Nos pontos *locking point*, os valores médios de volume de vazios e de %Gmm atingida foram 4,96% e 95,87%, respectivamente.

Tabela 21 - Parâmetros de compactação obtidos para os corpos de prova moldados no CGS ($\alpha=1,5^\circ$)

CP	Gmb (g/cm ³)	Vv %	GC %	Giros	Inflexão		Icurva	Locking point			Giros			
					Giros	Vv %		Giros	Vv %	%Gmm	97% GC	98% GC	99% GC	100% GC
30	2,552	4,95	98,99	62	23	8,79	0,0888	-	-	-	37	48	62	-
31	2,566	4,43	99,53	134	53	7,61	0,0413	92	5,61	94,94	65	84	112	-
32*	2,577	4,02	99,96	110	42	7,23	0,0517	77	5,15	95,94	47	61	82	-
33	2,586	3,69	100,3	116	43	7,08	0,0523	80	4,89	96,13	46	59	78	105
34*	2,576	4,06	99,92	73	27	7,62	0,0808	-	-	-	33	42	56	-
35*	2,583	3,80	100,2	73	28	7,26	0,0828	-	-	-	31	40	52	69
36*	2,582	3,84	100,2	98	37	7,03	0,0593	77	4,54	96,16	39	51	67	93
37	2,581	3,87	100,1	55	21	7,58	0,1133	-	-	-	25	32	41	54
38	2,588	3,61	100,4	136	50	6,85	0,0434	87	4,98	95,71	50	66	88	121
39	2,587	3,65	100,4	85	32	7,19	0,0728	-	-	-	35	45	58	77
40	2,589	3,58	100,4	112	44	6,65	0,0541	80	4,59	96,34	42	54	72	97
Méd.	2,579	3,95	100,0	96	36	7,35	0,0673	82	4,96	95,87	41	53	70	88
DP	0,011	0,004	0,004	28	11	0,006	0,0223	6	0,39	0,51	11	14	20	23
CV %	0,43	10,46	0,43	29	30	7,75	33,17	7	7,96	0,53	27	27	28	26%

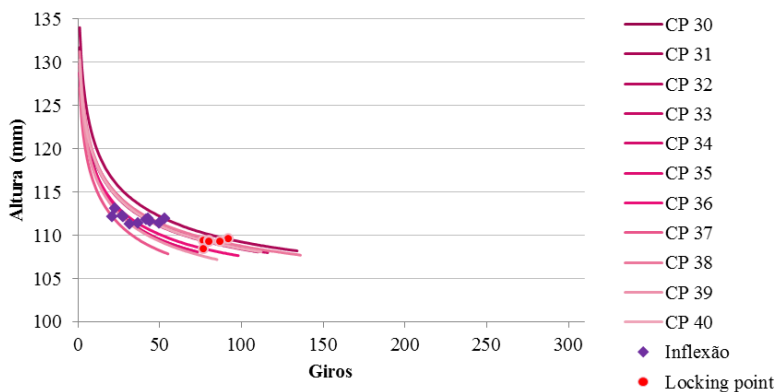
Nota: *Corpos de prova destinados à análise da estrutura interna.

Fonte: Autoria própria.

A análise do número de giros para diferentes percentuais de GC mostrou uma variabilidade semelhante à análise dos giros total e dos giros no ponto de inflexão. Os número de giros médio para atingir 97%, 98%, 99% e 100% do GC foram: 41, 53, 70 e 88 ,respectivamente. O coeficiente de variação foi aproximadamente 27%. Sete de onze corpos de prova atingiram 100% de GC.

A Figura 86 mostra as curvas de compactação com os pontos de inflexão e *locking point* para os corpos de prova moldados com o ângulo de inclinação do eixo igual a $1,5^\circ$. Observa-se que os pontos de inflexão e *locking point* ocorreram em intervalos distintos das curvas de compactação. Verifica-se que existe uma tendência definida de posicionamento destes pontos nas curvas e uma maior dispersão dos pontos de inflexão quando comparado com os *locking points*. A finalização da compactação dos corpos de prova terminou em média 59 giros após o ponto de inflexão e 14 giros após o *locking point*, quando este ocorreu.

Figura 86 - Curvas de compactação: Altura do corpo de prova *versus* número de giros ($\alpha=1,5^\circ$)



Fonte: Autoria própria.

Ângulo de inclinação do eixo de rotação $1,75^\circ$

Na Tabela 22 e na Figura 87 são apresentados os parâmetros de compactação e as curvas de compactação obtidos para 9 corpos de prova compactados com o ângulo de inclinação do eixo igual a $1,75^\circ$.

Tabela 22 - Parâmetros de compactação obtidos para os corpos de prova moldados no CGS ($\alpha=1,75^\circ$)

CP	Gmb (g/cm ³)	Vv %	GC %	Giros	Inflexão		Icurva	Locking point			Giros			
					Giros	Vv %		Giros	Vv %	%Gmm	97% GC	98% GC	99% GC	100% GC
41	2,559	4,69	99,26	111	40	8,11	0,0469	83	5,56	94,44	57	75	101	-
42*	2,566	4,43	99,53	73	27	8,01	0,0762	-	-	-	37	47	62	-
43*	2,588	3,61	100,39	78	29	7,04	0,0784	-	-	-	31	40	52	70
44	2,571	4,25	99,73	89	33	7,58	0,0623	80	4,56	95,44	40	53	70	-
45*	2,563	4,54	99,42	100	38	7,74	0,0528	74	5,46	94,54	49	64	87	-
46*	2,563	4,54	99,42	80	30	7,93	0,0678	-	-	-	41	53	71	-
47	2,583	3,80	100,19	63	24	7,28	0,0974	-	-	-	27	35	45	60
48	2,583	3,80	100,19	74	28	7,37	0,0837	-	-	-	32	41	53	70
49	2,597	3,28	100,74	105	38	6,63	0,0595	82	4,04	95,96	36	46	61	84
Méd.	2,575	4,11	99,88	86	32	7,52	0,0694	80	4,90	95,10	39	50	67	71
DP	0,013	0,005	0,005	16	6	0,005	0,0160	4	0,73	0,73	9	13	18	10
CV %	0,52	12,09	0,52	19	18	6,48	23,05	5	14,97	0,77	24	25	27	14

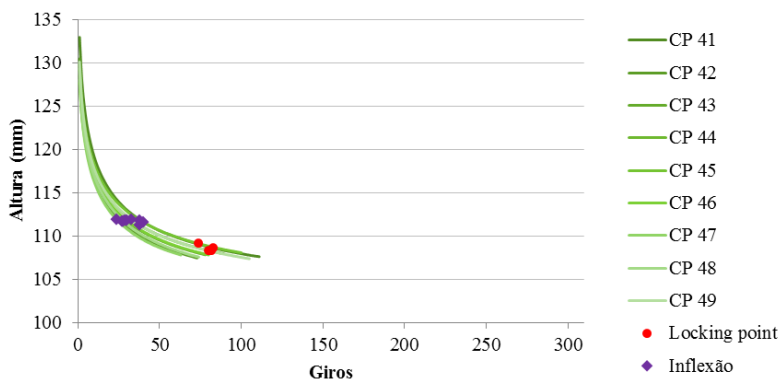
Nota: *Corpos de prova destinados à análise da estrutura interna.

Fonte: Autoria própria.

A caracterização física dos corpos de prova atendeu ao critério estabelecido. A massa específica aparente, o volume de vazios e o grau de compactação enquadraram-se no intervalo de 97 a 101% do Grau de Compactação. O número de giros total oscilou entre 63 e 111 giros, sendo o valor médio igual a 86. É verificada uma variabilidade maior dos números de giro total e de inflexão em relação ao *locking point*, quantificadas pelos coeficientes de variação igual a 19% e 18%. O ponto de inflexão ocorreu, em média, aos 32 giros e volume de vazios médio corresponde a 7,52%. A inclinação da curva de compactação variou entre 0,0469 e 0,0974. O intertravamento da mistura foi atingido entre 74 e 83 giros, apresentando uma menor variabilidade (CV igual a 5%) se comparado aos números de giros total e de inflexão dos corpos de prova. Alguns corpos de prova não atingiram o *locking point* durante a compactação devido ao aumento da taxa de compactação (inclinação média da curva igual a 0,0694). Nos pontos *locking point*, os valores médios de volume de vazios e de %Gmm atingida foram 4,9% e 95,1%, respectivamente. Ao analisar o número de giros para diferentes percentuais de GC, observou-se uma maior variabilidade, porém da mesma ordem de grandeza, em relação à análise dos giros total e dos giros no ponto de inflexão. Os valores médios de giros foram 39, 50, 67 e 71 para 97%, 98%, 99% e 100% do Grau de Compactação, respectivamente. O coeficiente de variação oscilou entre 14 e 27%. Quatro corpos de prova atingiram 100% de GC.

A Figura 87 mostra as curvas de compactação com os pontos de inflexão e *locking point* para os corpos de prova moldados com o ângulo de inclinação do eixo igual a 1,75°. Observa-se que os pontos de inflexão e *locking point* aconteceram em intervalos distintos das curvas de compactação. Verifica-se que existe uma tendência definida de posicionamento destes pontos nas curvas e uma maior dispersão dos pontos de inflexão quando comparado com os *locking points*. A finalização da compactação dos corpos de prova terminou em média 54 giros após o ponto de inflexão e 6 giros após o *locking point*, quando este ocorreu (5 de 9 corpos de prova não atingiram o *locking point*).

Figura 87 - Curvas de compactação: Altura do corpo de prova *versus* número de giros ($\alpha=1,75^\circ$)

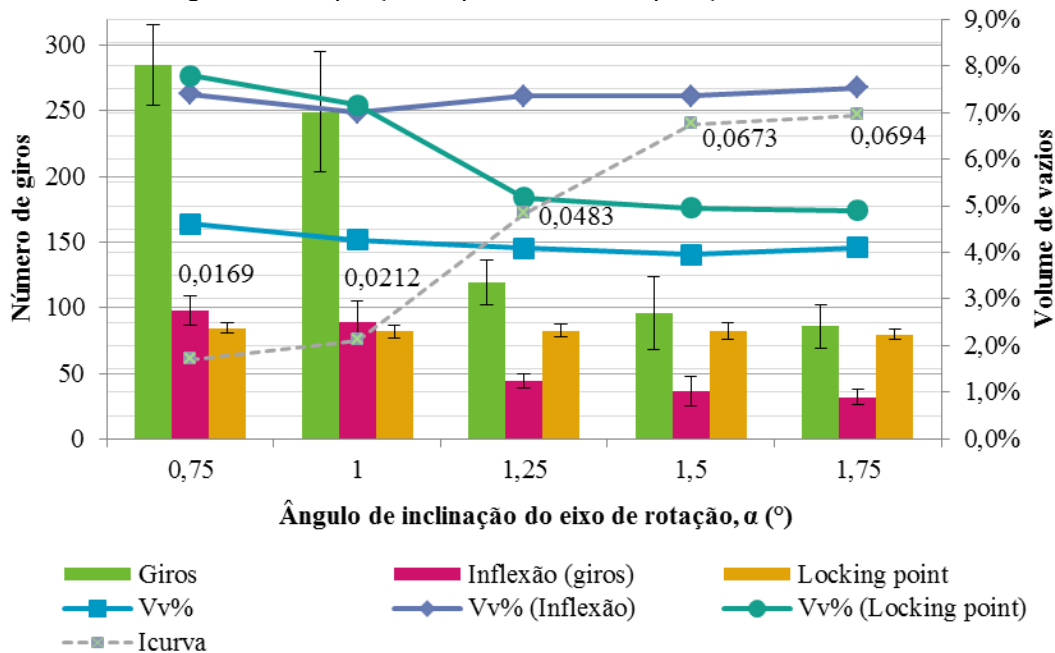


Fonte: Autoria própria.

Comparação da compactação com diferentes ângulos de inclinação do eixo

O gráfico da Figura 88 resume e compara os parâmetros de compactação (valores médios) obtidos para cada um dos ângulos de inclinação do eixo do CGS testados ($0,75^\circ$; 1° ; $1,25^\circ$; $1,5^\circ$ e $1,75^\circ$).

Figura 88 - Comparação dos parâmetros de compactação obtidos no CGS



Fonte: Autoria própria.

A partir da análise da Figura 88, pode-se concluir que:

- Para o critério de finalização da compactação adotado neste trabalho, o número de giros (total) diminui com o aumento do ângulo de inclinação do eixo de rotação para um intervalo de volume de vazios que compreende 97% a 101% do grau de compactação. Quanto à variação do número de giros para cada condição, verificou-se que a variação é de 18% em relação ao valor médio, independente do ângulo de inclinação. Observa-se uma tendência linear quanto ao volume de vazios obtidos, uma vez que este foi, indiretamente, o critério especificado para a finalização da compactação;
- O ponto de inflexão, mudança na taxa de compactação, possui uma relação direta com o número total de giros: a inflexão da curva (número de giros *versus* altura) ocorre a aproximadamente um terço (36%) do início da compactação. Quanto à variação do número de giros do ponto de inflexão para cada condição, o comportamento é análogo ao número de giros total: observa-se uma variação de 18% em relação ao valor médio, independente do ângulo de inclinação. O ponto de inflexão está diretamente relacionado com o volume de vazios percentual: ocorre uma alteração (redução) na taxa de compactação após a mistura asfáltica atingir um volume de vazios menor ou igual a 7,3% aproximadamente;
- O *Locking point* apresentou pouca variação (desvio padrão igual a 1,7 giros ou coeficiente de variação igual a 2,1%) com o aumento da inclinação do eixo de rotação do CGS. O ponto ocorreu aos 82 giros, em média, e apresentou pequena variabilidade (6% em torno do valor médio) para um mesmo ângulo de inclinação do eixo. A pouca variação encontrada neste índice indicou que o *locking point* é uma característica da mistura asfáltica e seu valor (número de giros em que ocorre) é governado pelos parâmetros de operação do equipamento que foram fixados nos ensaios (pressão 600 kPa e velocidade de rotação 30 rpm).

Como está relacionado com o intertravamento da mistura, ou seja, um determinado “grau” de compactação, pode-se inferir que a pressão de compactação exerce maior influência. Contudo, ensaios complementares neste sentido precisam ser realizados. Quanto ao percentual da massa específica máxima atingida (%Gmm), os ângulos de inclinação 1,25°, 1,5° e 1,75° são os que mais se aproximam da massa específica aparente última de campo (avaliada por Prowell e Brown, 2007) igual a 96% Gmm. Todavia, o ângulo de inclinação 1,25° torna-se mais adequado para realização dos ensaios, pois é o menor ângulo de inclinação do eixo de rotação do equipamento em que todos os corpos de prova moldados atingiram o *locking point*;

- A partir dos resultados dos ensaios de compactação observou-se que as inclinações das curvas de compactação acentuaram-se com o aumento do ângulo de inclinação do eixo de rotação do CGS. Ocorreu uma diminuição da resistência à compactação e uma maior taxa de compactação com o aumento do esforço cisalhante (aumento do ângulo) na mistura asfáltica. No intervalo entre 1° e 1,5° visualiza-se um aumento acentuado e constante, enquanto que pequenas variações ocorrem entre 0,75° e 1° e, entre 1,5° e 1,75°. Este comportamento pode estar relacionado com a faixa de temperatura de compactação da mistura asfáltica. O CGS não possui sistema de aquecimento para o molde. Observou-se que o molde e a mistura asfáltica perdem temperatura e isso pode ter influenciado na inclinação da curva. Ademais, devido à variação do ângulo de inclinação do eixo de rotação, e consequentemente do número de giros, houve uma variação na duração da compactação do CGS entre 4 e 10 minutos, aproximadamente. Esta variação também contribui para que a perda de temperatura do conjunto molde-mistura seja diferente variando, assim, a inclinação da curva de compactação.

4.2.3 Placas de concreto asfáltico

A Tabela 23 apresenta a caracterização de duas placas moldadas em laboratório na mesa compactadora tipo LCPC, para corte e posterior análise da estrutura interna. Como as placas eram de dimensões e massas elevadas e seriam cortadas posteriormente, optou-se por caracterizá-las em três partes. (Conforme exposto na Figura 66, as partes B e K foram seccionadas horizontalmente; C e L foram feitos cortes verticais longitudinais; e A e J, cortes verticais transversais).

Tabela 23 - Caracterização das placas moldadas em laboratório

Placa		Tipo de corte	Gmb (g/cm ³)	Vv %	GC %
1	A	Vertical transversal (CVT)	2,527	5,89	98,02%
	B	Horizontal (CH)	2,535	5,60	98,31%
	C	Vertical longitudinal (CVL)	2,523	6,04	97,86%
Média			2,528	5,84	98,06
DP			0,006	0,22	0,23
2	J	Vertical transversal (CVT)	2,511	6,49	97,39%
	K	Horizontal (CH)	2,534	5,64	98,27%
	L	Vertical longitudinal (CVL)	2,504	6,76	97,11%
Média			2,516	6,30	97,59
DP			0,016	0,58	0,61

Fonte: Autoria própria.

Como mostra a Tabela 23, as placas atenderam ao intervalo de 97 a 101% do Grau de Compactação especificado, sendo o valor médio igual a 97,8%, próximo ao limite inferior do intervalo. Os valores de massa específica aparente (Gmb) e percentual de volume de vazios apresentaram pouca variabilidade. Os valores médios de Gmb e Vv% oscilaram entre 2,528 e 2,516 g/cm³ e 5,84 e 6,30%, respectivamente.

Os resultados obtidos são representativos e apresentam-se adequados uma vez que, em campo, esta variação volumétrica é observada e permitida pelas especificações de serviço, porquanto, não apresentem grau de compactação inferior a 97% em relação à massa específica aparente de projeto da mistura.

Melo (2014) ressalta que houve no seu trabalho dificuldade em compactar placas com volume de vazios em torno de 4%. Isso ocorre

porque pequenas variações na espessura final da placa (milímetros) resultam em grandes alterações no volume de vazios da mistura compactada. Este fato foi confirmado neste trabalho.

4.2.4 Amostras do trecho experimental

A Tabela 24 apresenta a caracterização das amostras cilíndricas e das placas extraídas do trecho experimental após a execução do revestimento asfáltico. As amostras cilíndricas são compostas por primeira e segunda camadas e foram seccionadas horizontalmente. As placas foram seccionadas verticalmente.

Tabela 24 - Caracterização das amostras e placas extraídas do trecho experimental

<i>Amostra</i>	<i>Gmb (g/cm³)</i>	<i>Vv %</i>	<i>GC %</i>
2	2,598	4,09	99,91
3	2,578	4,80	99,17
4	2,573	4,99	98,97
5	2,615	3,45	100,57
6	2,588	4,44	99,55
7	2,604	3,86	100,14
8	2,597	4,11	99,88
11	2,587	4,48	99,50
15	2,571	5,08	98,87
Placa 1ª camada	2,596	4,15	99,85
Placa 2ª camada	2,625	3,08	100,96
Média	2,594	4,23	99,76
DP	0,017	0,62	0,64

Fonte: Autoria própria.

As amostras de mistura asfáltica extraídas do trecho experimental atenderam ao intervalo de 97 a 101% do Grau de Compactação especificado, sendo o valor médio igual a 99,76%. Igualmente os valores de massa específica aparente (Gmb) e percentual de volume de vazios apresentaram pouca variabilidade. Os valores médios de Gmb e Vv% foram 2,594 g/cm³ e 4,23%, respectivamente.

4.3 ANÁLISE DA ESTRUTURA INTERNA DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Nos subitens seguintes são expostos os resultados obtidos da análise da estrutura interna, notadamente a macroestrutura, de misturas asfálticas compactadas em laboratório e extraídas do trecho experimental.

4.3.1 Análise dos métodos de compactação

Na análise dos métodos de compactação, são apresentados os resultados obtidos da análise de imagens de misturas compactadas, em laboratório, no compactador Marshall, no Compactador Giratório Superpave e na mesa compactadora tipo LCPC; e, amostras extraídas do trecho experimental (campo).

A exposição dos resultados da macroestrutura baseou-se em Tashman et al. (2001); Vasconcelos, Evangelista Jr. e Soares (2005); Sefidmazgi (2011); Bessa, Castelo Branco e Soares (2012); Hamzah, Von e Abdullah (2013); e Sefidmazgi e Bahia (2014).

4.3.1.1 Compactador Marshall

Seções verticais

Foram analisados 16 corpos de prova (CP) Marshall seccionados verticalmente em três partes, ou seja, dois cortes. Os resultados obtidos, apresentados na Tabela 25 para cada corpo de prova, são provenientes de quatro imagens (em média 222 cm² por corpo de prova).

Como mostra a Tabela 25, os parâmetros comprimento de contato, número de contatos e vetor magnitude dos agregados (Δ) foram os que apresentaram maior variação, nesta ordem. Quanto às zonas de contatos, obteve-se uma média de 216 contatos e de 456 mm, por 100 cm² de imagens analisados. Os ângulos de orientação horizontais, dos contatos e dos agregados, e o vetor magnitude dos contatos (Δ_c) apresentaram menor variabilidade (2, 3 e 6%). A média da distribuição dos contatos foi 57,6 e, dos agregados, 14. Os ângulos médios de orientação dos contatos e dos agregados foram 64,2° e 48,9°, respectivamente.

Tabela 25 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova Marshall (seções verticais)

CP	Zonas de contato				Orientação agregados	
	Contatos ¹	Comprimento (mm) ¹	θ_c (°)	Δc (%)	θ_k (°)	Δ (%)
1	208,6	413,9	63,2	55,2	46,2	10,2
2	188,0	339,6	64,9	58,1	48,7	16,5
3	171,6	339,8	63,9	54,2	50,1	15,2
4	150,0	271,9	62,6	52,0	48,0	13,3
5	170,3	295,5	63,6	54,4	48,0	10,6
6	176,7	311,1	62,4	51,6	48,6	14,6
7	153,3	280,4	63,5	55,3	45,7	10,3
8	175,3	342,1	64,1	55,7	50,3	14,6
9	259,4	585,8	64,3	58,2	50,0	13,8
10	284,3	652,0	65,3	61,9	50,9	16,9
11	234,9	522,6	64,4	58,8	48,7	11,4
12	233,6	516,8	63,5	59,9	46,9	11,8
13	255,9	544,9	64,9	61,1	50,7	17,2
14	274,5	686,2	65,5	61,6	50,7	16,6
15	226,7	492,8	66,1	61,7	49,7	14,4
16	287,3	706,0	65,2	61,3	49,9	16,3
<i>Média</i>	215,6	456,3	64,2	57,6	48,9	14,0
<i>DP</i>	47,5	150,9	1,1	3,5	1,6	2,5
<i>CV</i>	22%	33%	2%	6%	3%	18%

Nota: ¹ Número de contatos e comprimento (mm) por 100 cm².

Fonte: Autoria própria.

Seções horizontais

Foram analisados 11 corpos de prova (CP) Marshall que sofreram três cortes horizontais. Os resultados obtidos da análise da macroestrutura são apresentados na Tabela 26. Para cada corpo de prova, os parâmetros são provenientes de seis imagens (em média 460 cm² por corpo de prova).

Tabela 26 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova Marshall (seções horizontais)

CP	Zonas de contato			Orientação agregados		
	Contatos ¹	Comprimento (mm) ¹	Δc (%)	θr (°)	θk (°)	Δ (%)
17	247,2	445,9	52,6	49,0	44,5	7,8
18	255,8	470,1	54,3	46,9	47,0	9,6
19	224,6	412,8	53,0	48,3	45,5	7,2
20	209,1	382,9	55,7	46,7	46,6	10,0
21	194,5	343,2	50,4	49,5	44,4	5,7
22	196,2	363,0	53,0	48,3	45,0	5,3
23	298,9	774,4	59,9	46,8	44,3	7,9
24	256,1	618,9	57,8	48,7	46,9	10,8
25	289,0	699,7	58,5	47,5	45,9	10,7
26	229,2	501,1	52,4	47,8	43,2	9,4
27	218,1	430,3	53,7	49,1	45,7	8,4
<i>Média</i>	238,1	494,7	54,7	48,0	45,3	8,4
<i>DP</i>	34,9	142,3	3,0	1,0	1,2	1,9
<i>CV</i>	15%	29%	5%	2%	3%	22%

Nota: ¹ Número de contatos e comprimento (mm) por 100 cm².

Fonte: Autoria própria.

Para os corpos de prova Marshall seccionados horizontalmente, os parâmetros comprimento de contato, vetor magnitude dos agregados (Δ) e número de contatos foram os que apresentaram maior variação, nesta ordem. Quanto às zonas de contatos, obteve-se uma média de 238 contatos e de 495 mm, por 100 cm² de imagens analisados. Os ângulos de orientação dos agregados, radiais e horizontais, e o vetor magnitude dos contatos (Δc) apresentaram menor variabilidade (2, 3 e 5%). A média da distribuição dos contatos foi 54,7 e, dos agregados, 8,4. Os ângulos médios de orientação dos agregados, radial e horizontal, foram 48° e 45,3°, respectivamente.

4.3.1.2 Compactador Giratório Superpave

Seções verticais

Foram analisados dois corpos de prova (CP) por ângulo de inclinação do eixo de rotação ensaiados: 0,75°; 1°; 1,25°; 1,5° e 1,75°. Os resultados obtidos, para cada corpo de prova, são provenientes de três cortes ou seis imagens (em média 915 cm² por corpo de prova). As Tabelas 27 a 31 expõem os parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova moldados no CGS para cada um dos ângulos de inclinação do eixo.

Tabela 27 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova CGS (seções verticais; $\alpha=0,75^\circ$)

Amostra		Zonas de contato				Orientação agregados	
CP	α (°)	Contatos ¹	Comprimento (mm) ¹	θ_c (°)	Δ_c (%)	θ_k (°)	Δ (%)
1	0,75	220,6	424,9	64,5	56,6	51,1	17,5
5	0,75	198,8	367,1	64,4	56,6	52,7	20,9
CV		7%	10%	0%	0%	2%	12%

Nota: ¹ Número de contatos e comprimento (mm) por 100 cm².

Fonte: Autoria própria.

Para os corpos de prova moldados no CGS com ângulo de inclinação do eixo de rotação igual a 0,75°, os parâmetros vetor magnitude dos agregados (Δ), comprimento de contato e número de contatos e foram os que exibiram maior coeficiente de variação em relação ao valor médio, nesta ordem. Quanto às zonas de contatos, obteve-se uma média de 210 contatos e de 396 mm, por 100 cm² de imagens analisados. O valor obtido para a distribuição direcional dos agregados (Δ) foi 19,2. O ângulo médio de orientação dos agregados (θ_k) apresentou menor variabilidade (2%) e um valor médio igual a 51,9°. A orientação e distribuição dos contatos não apresentaram variabilidade nos dois corpos de prova e, apresentaram valores iguais a 64,4° e 56,6, respectivamente.

Tabela 28 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova CGS (seções verticais; $\alpha=1^\circ$)

Amostra		Zonas de contato				Orientação agregados	
CP	α (°)	Contatos ¹	Comprimento (mm) ¹	θ_c (°)	Δc (%)	θ_k (°)	Δ (%)
11	1	252,9	491,9	64,6	57,1	51,3	18,0
14	1	299,1	796,3	66,0	61,5	50,6	16,4
CV		12%	33%	2%	5%	1%	6%

Nota: ¹ Número de contatos e comprimento (mm) por 100 cm².

Fonte: Autoria própria.

Como mostra a Tabela 28, referente aos corpos de prova moldados no CGS com ângulo de inclinação do eixo de rotação 1° , os parâmetros comprimento de contato e número de contatos foram os que apresentaram maior variação, respectivamente 33% e 12%. Obteve-se uma média de 276 contatos e de 644 mm, por 100 cm² de imagens analisados. Os demais parâmetros, vetor magnitude dos agregados (Δ), vetor magnitude dos contatos (Δc), ângulos de orientação horizontais, dos contatos e dos agregados, apresentaram menor variabilidade: 6%, 5%, 2% e 1%, nesta ordem. A média da distribuição dos contatos foi 59,3 e, dos agregados, 17,2. Os ângulos médios de orientação dos contatos e dos agregados foram $65,3^\circ$ e $50,9^\circ$, respectivamente.

Tabela 29 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova CGS (seções verticais; $\alpha=1,25^\circ$)

Amostra		Zonas de contato				Orientação agregados	
CP	α (°)	Contatos ¹	Comprimento (mm) ¹	θ_c (°)	Δc (%)	θ_k (°)	Δ (%)
24	1,25	228,8	401,5	63,6	54,0	49,7	14,7
26	1,25	210,8	361,4	63,6	53,8	52,8	22,0
CV		6%	7%	0%	0%	4%	28%

Nota: ¹ Número de contatos e comprimento (mm) por 100 cm².

Fonte: Autoria própria.

Para os corpos de prova moldados no CGS com ângulo de inclinação do eixo de rotação igual a $1,25^\circ$, o parâmetro vetor magnitude dos agregados (Δ) foi o que exibiu maior variabilidade, igual a 28%,

com um valor médio igual a 18,4. Quanto às zonas de contatos, obteve-se uma média de 220 contatos e de 381 mm, por 100 cm² de imagens analisados. O ângulo médio de orientação dos agregados (θ_k) foi igual a 51,2°. A orientação e distribuição dos contatos não apresentaram variabilidade nos dois corpos de prova e, apresentaram valores iguais a 63,3° e 53,9, respectivamente.

Tabela 30 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova CGS (seções verticais; $\alpha=1,5^\circ$)

Amostra		Zonas de contato				Orientação agregados	
CP	α (°)	Contatos ¹	Comprimento (mm) ¹	θ_c (°)	Δ_c (%)	θ_k (°)	Δ (%)
32	1,5	252,7	449,3	63,4	53,2	49,9	14,5
35	1,5	308,2	712,7	65,0	59,4	51,1	18,1
CV		14%	32%	2%	8%	2%	16%

Nota: ¹ Número de contatos e comprimento (mm) por 100 cm².

Fonte: Autoria própria.

Os corpos de prova moldados no CGS com ângulo de inclinação do eixo de rotação 1,5° obtiveram grande variabilidade para os parâmetros comprimento de contato, vetor magnitude dos agregados (Δ) e número de contatos: 32%, 16% e 14%, nesta ordem. Quanto às zonas de contatos, obteve-se uma média de 280 contatos e de 581 mm, por 100 cm² de imagens analisados. O valor obtido para a distribuição direcional dos agregados (Δ) foi 16,3. Os parâmetros vetor magnitude dos contatos (Δ_c), ângulos de orientação horizontais, dos contatos e dos agregados, apresentaram menor variação, entre 2% e 8%. O valor médio da distribuição direcional dos contatos (Δ_c) obtido foi 59,3. Os ângulos médios de orientação dos contatos e dos agregados foram 64,2° e 50,5°, respectivamente.

Como mostra a Tabela 31, com os resultados obtidos para os corpos de prova moldados no CGS com ângulo de inclinação do eixo de rotação 1,75°, os parâmetros comprimento de contato e número de contatos foram os que apresentaram maior variação, respectivamente 39% e 24%. Obteve-se uma média de 270 contatos e de 546 mm, por 100 cm² de imagens analisados. Os demais parâmetros, vetor magnitude dos agregados (Δ), vetor magnitude dos contatos (Δ_c) e ângulos de orientação dos contatos apresentaram menor variabilidade: 1% a 6%. O vetor magnitude e o ângulo de orientação dos contatos assumiram

valores iguais a 56,3 e 64,1°, respectivamente. O valor médio do vetor magnitude dos agregados obtido foi 13,9. O ângulo médio de orientação dos agregados (θ_k) praticamente não apresentou variabilidade nos dois corpos de prova, sendo igual a 49,8°.

Tabela 31 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova CGS (seções verticais; $\alpha=1,75^\circ$)

Amostra		Zonas de contato				Orientação agregados	
CP	α (°)	Contatos ¹	Comprimento (mm) ¹	θ_c (°)	Δc (%)	θ_k (°)	Δ (%)
45	1,75	224,2	395,6	63,2	53,8	49,9	13,8
46	1,75	314,7	695,7	65,1	58,7	49,7	14,0
CV		24%	39%	2%	6%	0%	1%

Nota: ¹ Número de contatos e comprimento (mm) por 100 cm².

Fonte: Autoria própria.

Seções horizontais

Foram analisados dois corpos de prova (CP) por ângulo de inclinação do eixo de rotação testados: 0,75°, 1°, 1,25°, 1,5° e 1,75°. Os resultados obtidos, para cada corpo de prova, são provenientes de cinco cortes ou dez imagens (em média 1753 cm² por corpo de prova). As Tabelas 32 a 36 expõem os parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova moldados no CGS para cada um dos ângulos de inclinação do eixo.

Tabela 32 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova CGS (seções horizontais; $\alpha=0,75^\circ$)

Amostra		Zonas de contato			Orientação agregados		
CP	α (°)	Contatos ¹	Comprimento (mm) ¹	Δc (%)	θ_r (°)	θ_k (°)	Δ (%)
3	0,75	174,3	294,6	49,0	47,3	46,5	7,5
6	0,75	251,4	478,4	51,6	46,4	44,5	5,3
CV		26%	34%	4%	1%	3%	25%

Nota: ¹ Número de contatos e comprimento (mm) por 100 cm².

Fonte: Autoria própria.

Para os corpos de prova moldados no CGS com ângulo de inclinação do eixo de rotação igual a $0,75^\circ$, os parâmetros comprimento de contato, número de contatos e vetor magnitude dos agregados (Δ) foram os que exibiram maior coeficiente de variação em relação ao valor médio, nesta ordem. Quanto às zonas de contatos, obteve-se uma média de 213 contatos e de 387 mm, por 100 cm² de imagens analisados. O valor obtido para a distribuição direcional dos agregados (Δ) foi 6,4. O vetor magnitude dos contatos apresentou um valor médio igual a 50,3 e um coeficiente de variação de 4%. Os ângulos médios de orientação dos agregados, radial e horizontal, foram $50,3^\circ$ e $46,9^\circ$, respectivamente.

Tabela 33 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova CGS (seções horizontais; $\alpha=1^\circ$)

Amostra		Zonas de contato			Orientação agregados		
CP	α (°)	Contatos ¹	Comprimento (mm) ¹	Δc (%)	θr (°)	θk (°)	Δ (%)
12	1	232,2	452,9	50,9	47,8	45,2	7,2
15	1	165,1	284,1	46,5	48,4	44,9	6,4
CV		24%	32%	6%	1%	0%	8%

Nota: ¹ Número de contatos e comprimento (mm) por 100 cm².

Fonte: Autoria própria.

Como mostra a Tabela 33, referente aos corpos de prova moldados no CGS com ângulo de inclinação do eixo de rotação 1° , os parâmetros comprimento de contato e número de contatos foram os que apresentaram maior variação, respectivamente 32% e 24%. Obteve-se uma média de 199 contatos e de 369 mm, por 100 cm² de imagens analisados. Os demais parâmetros, vetor magnitude dos agregados (Δ), vetor magnitude dos contatos (Δc), ângulo de orientação horizontal dos agregados, apresentaram menor variabilidade: 8%, 6% e 1%, nesta ordem. A média da distribuição dos contatos (Δc) foi 48,7 e, dos agregados (Δ), 6,8. Os ângulos médios de orientação dos agregados, radial e horizontal, apresentaram pequena variabilidade e foram $48,1^\circ$ e $45,1^\circ$, respectivamente.

Tabela 34 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova CGS (seções horizontais; $\alpha=1,25^\circ$)

Amostra		Zonas de contato			Orientação agregados		
CP	α (°)	Contatos ¹	Comprimento (mm) ¹	Δc (%)	θ_r (°)	θ_k (°)	Δ (%)
23	1,25	246,6	498,5	53,1	47,3	46,0	7,1
25	1,25	193,2	339,6	48,8	46,9	45,6	5,7
CV		17%	27%	6%	0%	1%	16%

Nota: ¹ Número de contatos e comprimento (mm) por 100 cm².

Fonte: Autoria própria.

Para os corpos de prova moldados no CGS com ângulo de inclinação do eixo de rotação igual a $1,25^\circ$, os parâmetros comprimento de contato, número de contatos e vetor magnitude dos agregados (Δ) foram os que apresentaram maior variação, nesta ordem. Quanto às zonas de contatos, obteve-se uma média de 220 contatos e de 419 mm, por 100 cm² de imagens analisados. Os ângulos de orientação dos agregados, radiais e horizontais, e o vetor magnitude dos contatos (Δc) apresentaram menor variabilidade (até 6%). A média da distribuição dos contatos foi 50,9 e, dos agregados, 6,4. Os ângulos médios de orientação dos agregados, radial e horizontal, foram $47,1^\circ$ e $45,8^\circ$, respectivamente.

Tabela 35 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova CGS (seções horizontais; $\alpha=1,5^\circ$)

Amostra		Zonas de contato			Orientação agregados		
CP	α (°)	Contatos ¹	Comprimento (mm) ¹	Δc (%)	θ_r (°)	θ_k (°)	Δ (%)
34	1,5	241,1	449,2	50,6	47,3	44,9	5,5
36	1,5	203,3	345,4	48,9	47,1	45,3	6,1
CV		12%	18%	3%	0%	1%	7%

Nota: ¹ Número de contatos e comprimento (mm) por 100 cm².

Fonte: Autoria própria.

Para os corpos de prova moldados no CGS com ângulo de inclinação do eixo de rotação $1,5^\circ$, os parâmetros comprimento de contato e número de contatos foram os que apresentaram maior variação, respectivamente 18% e 12%. Obteve-se uma média de 222 contatos e de 397 mm, por 100 cm² de imagens analisados. Os de mais parâmetros, vetor magnitude dos agregados (Δ), vetor magnitude dos

contatos (Δc), ângulos de orientação horizontal e radial dos agregados, apresentaram menor variabilidade, até 7%. A média da distribuição dos contatos (Δc) foi 49,7 e, dos agregados (Δ), 5,8. Os ângulos médios de orientação dos agregados, radial e horizontal, apresentaram pequena variabilidade e foram 47,2° e 45,1°, respectivamente.

Tabela 36 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova CGS (seções horizontais; $\alpha=1,75^\circ$)

Amostra		Zonas de contato			Orientação agregados		
CP	α (°)	Contatos ¹	Comprimento (mm) ¹	Δc (%)	θ_r (°)	θ_k (°)	Δ (%)
42	1,75	206,7	396,6	49,6	47,1	45,8	5,9
43	1,75	181,5	298,3	48,5	47,1	45,1	5,7
CV		9%	20%	2%	0%	1%	2%

Nota: ¹ Número de contatos e comprimento (mm) por 100 cm².

Fonte: Autoria própria.

Como mostra a Tabela 36, com os resultados obtidos para os corpos de prova moldados no CGS com ângulo de inclinação do eixo de rotação 1,75°, os parâmetros comprimento de contato e número de contatos foram os que apresentaram maior variação, respectivamente 20% e 9%. Obteve-se uma média de 195 contatos e de 348 mm, por 100 cm² de imagens analisados. Os demais parâmetros, vetor magnitude dos agregados (Δ), vetor magnitude dos contatos (Δc) e ângulos de orientação dos agregados (θ_r e θ_k) apresentaram coeficiente de variação até 2%. A média da distribuição dos contatos foi 49 e, dos agregados, 5,8. Os ângulos médios de orientação dos agregados, radial e horizontal, foram 47,1° e 45,5°, respectivamente.

Dos corpos de prova compactados no CGS, verificou-se que os parâmetros da macroestrutura número de contatos, comprimento de contatos e vetor magnitude dos agregados foram, em geral, os que apresentaram maior variabilidade dos resultados.

4.3.1.3 Mesa compactadora tipo LCPC

Foram analisadas 2 placas moldadas na mesa compactadora tipo LCPC, divididas em três partes cada uma, conforme especificado na Figura 66. De cada placa, duas partes foram cortadas verticalmente: uma parte cortes verticais transversais (sentido paralelo à largura da placa) e,

outra, cortes verticais longitudinais (sentido paralelo ao comprimento da placa).

Seções verticais

Os resultados obtidos dos cortes verticais das placas são expostos na Tabela 37. Os parâmetros da macroestrutura, para cada amostra (parte da placa), são provenientes de oito imagens (em média 1476 cm² por amostra).

Tabela 37 - Parâmetros da macroestrutura das placas da mesa compactadora (seções verticais)

Identificação		Zonas de contato				Orientação agregados	
CP	Corte	Contatos ¹	Comprimento (mm) ¹	θ_c (°)	Δ_c (%)	θ_k (°)	Δ (%)
I A	CVT	368,6	935,9	66,1	63,2	52,7	21,8
1 C	CVL	412,4	1031,8	66,6	64,7	52,1	20,2
2 J	CVT	404,7	1082,7	66,7	65,7	52,3	20,6
2 L	CVL	399,9	1070,5	66,4	65,6	51,4	18,5
CV		5%	6%	0%	2%	1%	7%

Nota: ¹ Número de contatos e comprimento (mm) por 100 cm².

Fonte: Autoria própria.

Como mostra a Tabela 37, referente às placas compactadas na mesa compactadora tipo LCPC, os parâmetros da estrutura interna apresentaram pequena variação com coeficientes de variação até 7%. Obteve-se uma média de 397 contatos e de 10309 mm, por 100 cm² de imagens analisados. A média da distribuição dos contatos (Δ_c) foi 64,8 e, dos agregados (Δ), 20,3. Os ângulos médios de orientação dos contatos e dos agregados foram 66,4° e 64,8°, respectivamente.

Seções horizontais

Os resultados obtidos dos cortes horizontais das placas são expostos na Tabela 38. Os parâmetros da macroestrutura, para cada amostra (parte da placa), são resultantes de seis imagens (em média 1597 cm² por amostra).

Tabela 38 - Parâmetros da macroestrutura das placas da mesa compactadora (seções horizontais)

CP	Zonas de contato			Orientação agregados		
	Contatos ¹	Comprimento (mm) ¹	Δc (%)	θ_r (°)	θ_k (°)	Δ (%)
1 B	416,6	1040,6	61,7	45,7	46,4	6,2
2 K	364,3	853,4	58,6	47,3	44,9	4,3
CV	9%	14%	4%	3%	2%	26%

Nota: ¹ Número de contatos e comprimento (mm) por 100 cm².

Fonte: Autoria própria.

Para as placas moldadas na mesa compactadora, os parâmetros vetor magnitude dos agregados (Δ), comprimento de contato e número de contatos foram os que apresentaram maior variação, nesta ordem. Os valores médios dos contatos e respectivos comprimentos foram 391 e 947 mm. A média da distribuição dos contatos (Δc) foi 60,2 e, dos agregados (Δ), 5,2. Os ângulos médios de orientação dos agregados, radial e horizontal, apresentaram pequena variabilidade e foram 46,5° e 45,6°, respectivamente.

4.3.1.4 Amostras do trecho experimental

Em amostras cilíndricas e placas retangulares extraídas do trecho experimental foram realizados cortes horizontais e verticais, respectivamente.

Seções verticais

Foram analisadas duas placas, uma de cada camada, seccionados verticalmente. Os resultados obtidos, apresentados na Tabela 39 para cada metade de placa, são provenientes de quinze imagens (em média 2293 cm² por parte).

Para as placas extraídas do trecho experimental, como mostra a Tabela 39, os parâmetros comprimento de contato, vetor magnitude dos agregados (Δ) e número de contatos foram os que apresentaram maior variação, nesta ordem. Quanto às zonas de contatos, obteve-se uma média de 180 contatos e de 363 mm, por 100 cm² de imagens analisados. Os ângulos de orientação horizontais, dos agregados e dos contatos, e o vetor magnitude dos contatos (Δc) apresentaram menor variabilidade (1%, 2% e 4%). A média da distribuição dos contatos foi

57,7 e, dos agregados, 19,9. Os ângulos médios de orientação dos contatos e dos agregados foram 63,9° e 51,7°, respectivamente.

Tabela 39 - Parâmetros da macroestrutura das amostras do trecho experimental (seções verticais)

Identificação		Zonas de contato				Orientação agregados	
Placa	Corte	Contatos ¹	Comprimento (mm) ¹	θ_c (°)	Δc (%)	θ_k (°)	Δ (%)
1 ^a camada	CVL	171,4	366,3	63,8	56,5	51,7	19,7
	CVT	206,4	427,5	64,7	58,1	52,1	19,8
2 ^a camada	CVL	188,9	402,6	64,1	56,0	50,5	16,8
	CVT	153,6	256,4	63,0	52,5	52,5	23,5
CV		13%	21%	1%	4%	2%	14%

Nota: ¹ Número de contatos e comprimento (mm) por 100 cm².

Fonte: Autoria própria.

Seções horizontais

Foram analisadas nove amostras cilíndricas, seccionados horizontalmente em seis cortes. Os resultados obtidos, apresentados na Tabela 40 para cada amostra, são provenientes de doze imagens (em média 925 cm² por amostra).

Como mostra a Tabela 40, referente às amostras cilíndricas extraídas do trecho experimental, os parâmetros comprimento de contato, número de contatos e vetor magnitude dos agregados (Δ) foram os que apresentaram maior variação, nesta ordem. Quanto às zonas de contatos, obteve-se uma média de 217 contatos e de 415 mm, por 100 cm² de imagens analisados. Os ângulos de orientação dos agregados, radiais e horizontais, e o vetor magnitude dos contatos (Δc) apresentaram menor variabilidade (1 a 4%). A média da distribuição dos contatos foi 50,9 e, dos agregados, 9,3. Os ângulos médios de orientação dos agregados, radial e horizontal, foram 48,3° e 44,9°, respectivamente.

Tabela 40 - Parâmetros da macroestrutura das amostras do trecho experimental (seções horizontais)

Amostra	Zonas de contato			Orientação agregados		
	Contatos ¹	Comprimento (mm) ¹	Δc (%)	θ_r (°)	θ_k (°)	Δ (%)
2	187,2	310,1	48,8	47,4	45,1	9,9
3	277,3	574,0	54,0	48,5	46,1	7,4
4	198,1	383,8	48,8	47,9	45,0	10,2
5	224,8	459,5	53,3	48,6	45,0	8,9
6	247,0	469,7	50,8	47,5	45,6	8,9
7	186,8	362,1	50,7	48,6	44,6	11,2
8	180,4	332,8	49,3	49,3	44,4	7,9
11	198,5	357,1	48,5	48,8	43,9	9,2
15	252,4	482,5	53,5	47,7	44,5	10,3
Média	217,0	414,6	50,9	48,3	44,9	9,3
DP	34,8	86,4	2,2	0,7	0,7	1,2
CV	16%	21%	4%	1%	1%	13%

Nota: ¹ Número de contatos e comprimento (mm) por 100 cm².

Fonte: Autoria própria.

4.3.2 Comparação dos métodos de compactação

A fim de visualizar o que ocorre em nível de macroescala da mistura asfáltica, para cada um dos métodos de compactação, foram elaborados gráficos de alguns parâmetros com os respectivos resultados obtidos para os métodos de compactação analisados: Marshall, CGS, Mesa compactadora tipo LCPC e compactação *in situ*.

Optou-se por apresentar os resultados da macroestrutura graficamente por meio de nuvem de pontos, pois, devido ao número de formas de compactação investigadas (Marshall, CGS, mesa compactadora e rolo compactador em campo), teve-se um pequeno número de amostras por condição restringindo as análises quantitativas/estatísticas. Ainda, isto ocorreu devido à quantidade restrita de material do campo como amostras extraídas e agregados para produção de misturas asfálticas em laboratório.

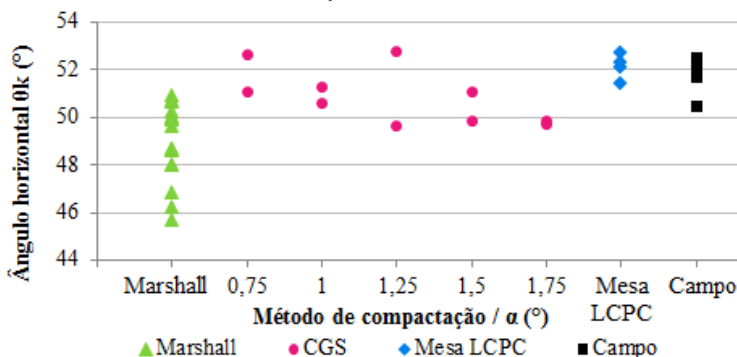
4.3.2.1 Orientação dos agregados

A orientação dos agregados produzida pelos diferentes métodos de compactação foi comparada, em seções verticais (SV) e horizontais (SH), por meio dos parâmetros: ângulos de orientação horizontal (θ_k) e radial (θ_r), e vetor magnitude (Δ).

Seções verticais

A Figura 89 apresenta os ângulos médios de orientação horizontal dos agregados obtidos para os diferentes métodos de compactação analisados (Marshall, CGS, mesa compactadora tipo LCPC e amostras do trecho experimental).

Figura 89 - Comparação ângulo de orientação horizontal dos agregados nas seções verticais

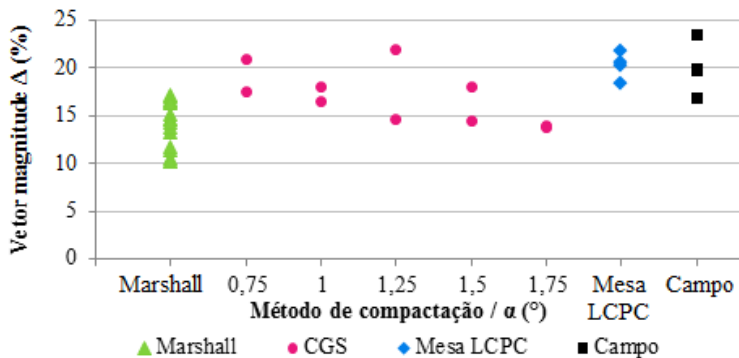


Fonte: Autoria própria.

Os ângulos de orientação horizontal dos agregados foram superiores a 45° , indicando que não há uma tendência de organização dos agregados no plano horizontal. O Marshall foi o método de compactação que apresentou maior dispersão dos resultados. Enquanto que, a mesa compactadora e as amostras extraídas do campo apresentaram resultados menos dispersos. Os corpos de prova moldados no CGS não exibiram uma tendência de dispersão, sendo esta variável dependendo do ângulo de inclinação do eixo de rotação (α). Para este parâmetro, a mesa compactadora foi aquela que apresentou os resultados mais similares ao campo. Embora, o CGS, ângulos de inclinação igual a $0,75^\circ$ e 1° , também apresentaram valores dentro do intervalo obtido para o campo.

Na Figura 90, podem-se visualizar os vetores magnitude dos agregados obtidos para corpos de prova moldados no compactador Marshall, no CGS, na mesa compactadora tipo LCPC e para amostras extraídas do trecho experimental.

Figura 90 - Comparação vetor magnitude dos agregados nas seções verticais



Fonte: Autoria própria.

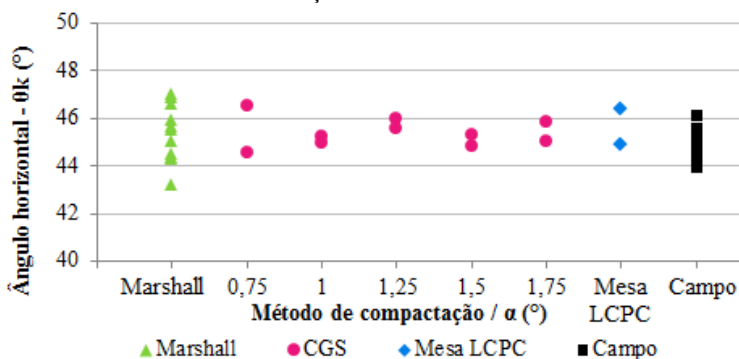
Os vetores magnitude dos agregados oscilaram num intervalo entre 10% e 25%, valores baixos considerando que este parâmetro varia entre 0 e 100%. Um valor mais próximo de zero, indica que há uma tendência dos agregados estarem distribuídos aleatoriamente, que é análogo aos materiais isotrópicos. Em geral, o parâmetro vetor magnitude apresentou variabilidade entre as amostras analisadas. A mesa compactadora foi o método de compactação que produziu placas mais similares ao campo, considerando o vetor magnitude.

Seções horizontais

A Figura 91 apresenta os ângulos médios de orientação horizontal dos agregados obtidos para os métodos de compactação Marshall, CGS, mesa compactadora tipo LCPC e para as amostras cilíndricas extraídas do trecho experimental.

Os ângulos de orientação horizontal dos agregados oscilaram entre 43° e 47°. O Marshall foi o método de compactação que apresentou maior dispersão dos resultados. Em geral, os métodos de compactação testados apresentaram resultados dentro do intervalo obtido para o campo. Os corpos de prova moldados no CGS, ângulos de inclinação igual a 1°, 1,25° e 1,5°, apresentaram resultados menos dispersos.

Figura 91 - Comparação ângulo de orientação horizontal dos agregados nas seções horizontais

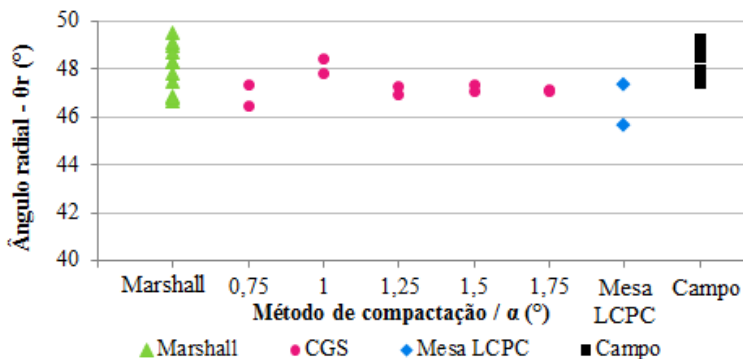


Fonte: Autoria própria.

A Figura 92 apresenta os ângulos médios de orientação radial dos agregados obtidos para os diferentes métodos de compactação analisados (Marshall, CGS, mesa compactadora tipo LCPC e amostras do trecho experimental). O ângulo de orientação radial (θ_r) é utilizado para avaliar o efeito de borda ou efeito de confinamento dos moldes cilíndricos. Mesmo que as amostras do campo e as placas da mesa compactadora não estejam submetidas a este efeito de confinamento, o ângulo médio radial dos agregados foi calculado a fim de comparar com os outros métodos de compactação, Marshall e CGS, que possuem este confinamento circular.

Como mostra a Figura 92, os ângulos de orientação radial dos agregados variaram entre 46° e 50° . O intervalo dos ângulos próximo a 45° não se pode afirmar que há uma tendência de alinhamento das partículas na direção circunferencial (θ_r igual a 90°) nem, de alinhamento na direção radial (θ_r igual a 0°). Portanto, não foi verificado neste trabalho efeito de confinamento do molde na orientação dos agregados, ao contrário dos resultados obtidos por Hunter, Airey e Collop (2004) e Hassan, Airey e Kahn (2012). Dentre os métodos de compactação, o Marshall apresentou maior variabilidade dos resultados e, o CGS, a menor variabilidade. A mesa compactadora foi o método que mais divergiu do campo.

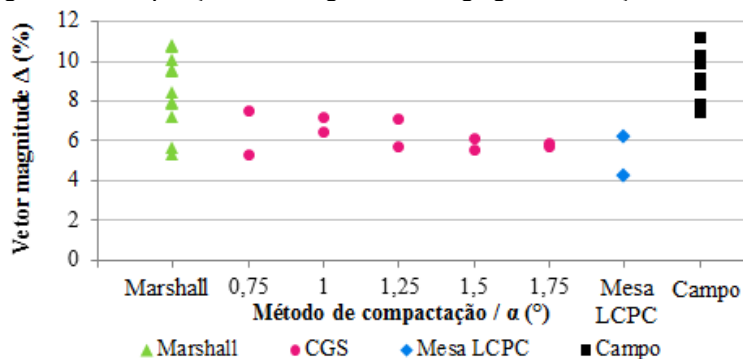
Figura 92 - Comparação ângulo de orientação radial dos agregados nas seções horizontais



Fonte: Autoria própria.

A Figura 93 expõe os vetores magnitude dos agregados obtidos para os diferentes métodos de compactação analisados (Marshall, CGS, mesa compactadora tipo LCPC e amostras do trecho experimental).

Figura 93 - Comparação vetor magnitude dos agregados nas seções horizontais



Fonte: Autoria própria.

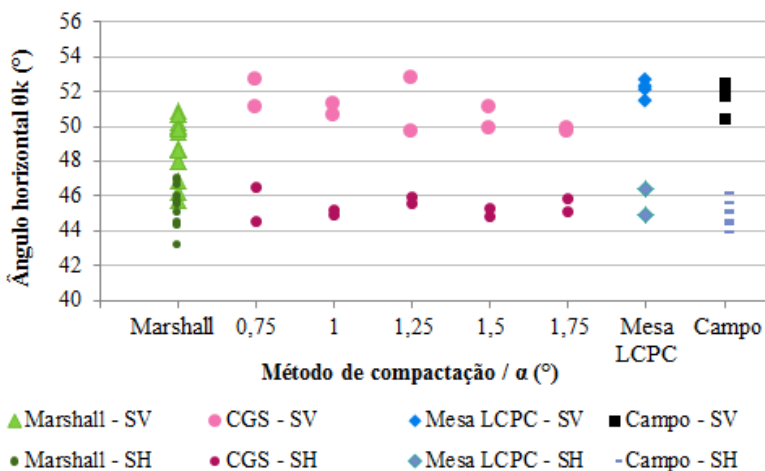
Os vetores magnitude dos agregados oscilaram num intervalo entre 4% e 12%, valores baixos considerando que este parâmetro varia entre 0 e 100%. Um valor mais próximo de zero, indica que há uma tendência dos agregados estarem distribuídos aleatoriamente. Em geral, o parâmetro vetor magnitude apresentou dispersão significativa entre as amostras analisadas. O compactador Marshall, mesmo apresentado uma dispersão dos resultados superior ao campo, foi o método de

compactação que produziu corpos de prova mais similares ao campo, considerando o vetor magnitude.

Comparação seções verticais e horizontais

Na Figura 94, expõem-se os ângulos médios de orientação horizontal dos agregados obtidos para os diferentes métodos de compactação analisados nas seções horizontais e verticais.

Figura 94 - Comparação ângulo de orientação horizontal dos agregados nas seções verticais e horizontais



Fonte: Autoria própria.

Como nas seções transversais (verticais), o ângulo de orientação horizontal dos agregados foi superior àqueles das seções horizontais e a 45° , não se pode inferir que há uma tendência à organização dos agregados no plano horizontal. Visualmente, o compactador Marshall, devido à variabilidade dos resultados, não exibiu um comportamento completamente distinto dos ângulos horizontais nas seções verticais e horizontais. Estatisticamente, não se pode rejeitar a hipótese de que θ_k é maior nas seções verticais do que nas seções horizontais com uma confiabilidade de quase 100% (alfa igual a 6×10^{-11})¹⁹. Igualmente, o

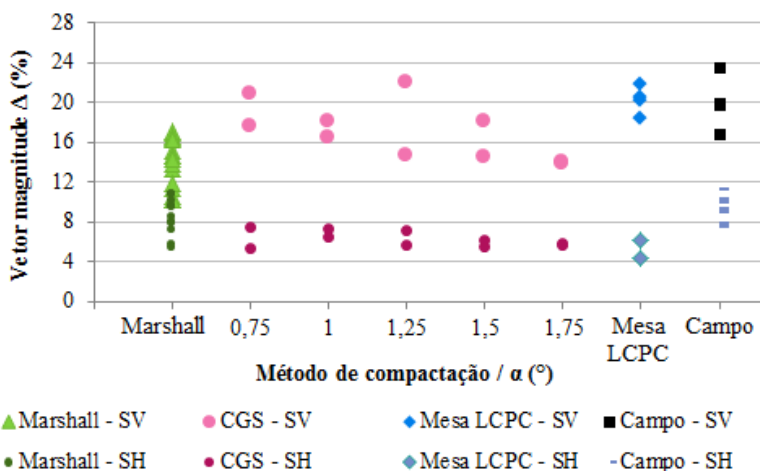
¹⁹ Foi realizado o teste de Kolmogorov-Smirnov, com uma confiabilidade de 95% (alfa igual a 5%), para verificar a normalidade dos ângulos

CGS, a mesa compactadora e o campo apresentaram ângulos de orientação maiores nas seções transversais.

Os resultados obtidos divergem daqueles de Tashman et al. (2001) e de Zhang et al. (2008) que afirmaram existir uma orientação preferencial dos agregados no plano horizontal, ou seja, o ângulo de orientação horizontal dos agregados foi maior nas seções horizontais.

A Figura 95 mostra um comparativo dos valores obtidos de vetor magnitude dos agregados, nas seções verticais e horizontais, de corpos de prova compactados nos compactadores Marshall, CGS, mesa compactadora e de amostras extraídas do campo.

Figura 95 - Comparação vetor magnitude dos agregados nas seções verticais e horizontais



Fonte: Autoria própria.

Os vetores magnitude dos agregados, nas seções verticais e horizontais, variaram entre 4 % e 25%. Valores mais próximos de zero indicam que há uma tendência dos agregados estarem distribuídos aleatoriamente (materiais isotrópicos). Visualmente, o compactador

horizontais nas seções horizontais e nas seções verticais. Aceita a normalidade, foi realizada a comparação de duas médias e determinada a confiabilidade limite para a qual a diferença de médias não pode ser rejeitada.

Marshall, devido à variabilidade dos resultados, não exibiu um comportamento completamente distinto dos vetores magnitude dos agregados nas seções verticais e horizontais. Estatisticamente, não se pode rejeitar a hipótese de que θ_k é maior nas seções verticais do que nas seções horizontais com uma confiabilidade de quase 100% (alfa igual a 3×10^{-11})²⁰. Igualmente, o CGS, a mesa compactadora e o campo apresentaram vetores magnitude maiores nas seções transversais. Isso significa que há uma tendência de organização maior das partículas nas seções transversais do que nas seções horizontais

4.3.2.2 Zonas de contato

As regiões de contato entre agregados determinadas pelos diferentes métodos de compactação foram comparadas, em seções verticais (SV) e horizontais (SH), por meio dos parâmetros: número de zonas de contato, comprimento de contatos, ângulo de orientação dos contatos (θ_c) e vetor magnitude dos contatos (Δc).

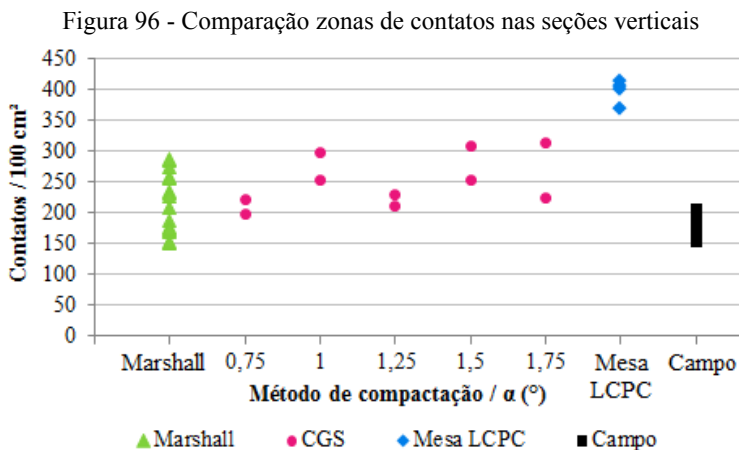
Seções verticais

A Figura 96 apresenta a ocorrência (quantidade) de zonas de contatos entre agregados obtidos para os diferentes métodos de compactação analisados (Marshall, CGS, mesa compactadora tipo LCPC e amostras do trecho experimental).

A ocorrência de zonas de contato para os diferentes métodos de compactação foi variável, entre 150 e 425 zonas de contato por 100 cm² de imagens analisadas. O Marshall foi o método de compactação que apresentou maior dispersão dos resultados. Enquanto que, a mesa compactadora e as amostras extraídas do campo apresentaram resultados menos dispersos. Os corpos de prova moldados no CGS não exibiram uma tendência de dispersão, sendo está variável dependendo do ângulo de inclinação do eixo de rotação (α). Para este parâmetro, o compactador

²⁰ Foi realizado o teste de Kolmogorov-Smirnov, com uma confiabilidade de 95% (alfa igual a 5%), para verificar a normalidade dos ângulos horizontais nas seções horizontais e nas seções verticais. Aceita a normalidade, foi realizada a comparação de duas médias e determinada a confiabilidade limite para a qual a diferença de médias não pode ser rejeitada.

Marshall foi aquele que apresentou os resultados mais similares ao campo, embora com maior dispersão dos valores.



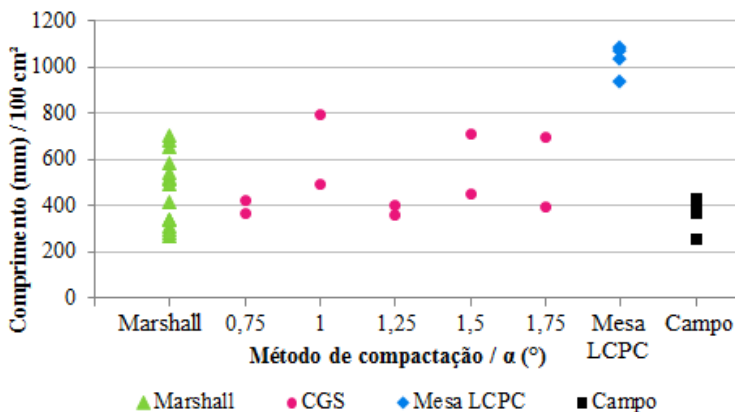
Tashman et al. (2001) concluíram que o material do campo possuía mais pontos de contato do que a mistura asfáltica compactada no CGS. Entretanto, neste trabalho, verificou-se a menor ocorrência de contatos por área de imagem investigada nas amostras do trecho experimental. Tal conclusão deve-se às restrições observadas neste estudo quando os parâmetros são avaliados em relação à área investigada. As restrições observadas são relatadas no item 4.3.2.5.

Na Figura 97, expõem-se os comprimentos de contatos obtidos para os diferentes métodos de compactação analisados nas seções verticais.

O comprimento dos contatos para os diferentes métodos de compactação oscilou entre 200 e 1100 milímetros por 100 cm² de imagens analisadas. O Marshall foi o método de compactação que apresentou maior dispersão dos resultados. Enquanto que, a mesa compactadora e as amostras extraídas do campo apresentaram resultados menos dispersos. Os corpos de prova moldados no CGS não exibiram uma tendência de dispersão, sendo está variável dependendo do ângulo de inclinação do eixo de rotação (α). Para este parâmetro, o compactador Marshall foi aquele que apresentou os resultados mais similares ao campo, embora com maior dispersão dos valores. Os corpos de prova moldados no CGS, ângulos de inclinação igual a 0,75° e 1,25°,

apresentaram resultados menos dispersos e dentro da faixa de valores obtida para as amostras do trecho experimental.

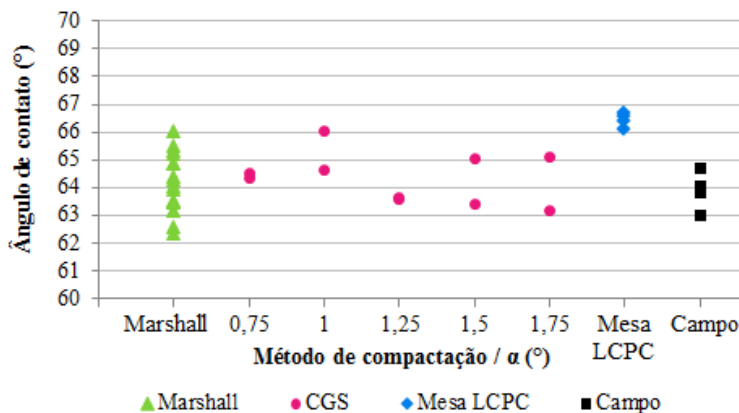
Figura 97 - Comparação comprimento de contatos nas seções verticais



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 98, podem-se visualizar os ângulos de orientação dos contatos obtidos para corpos de prova moldados no compactador Marshall, no CGS, na mesa compactadora tipo LCPC e para amostras extraídas do trecho experimental.

Figura 98 - Comparação ângulo de orientação dos contatos nas seções verticais

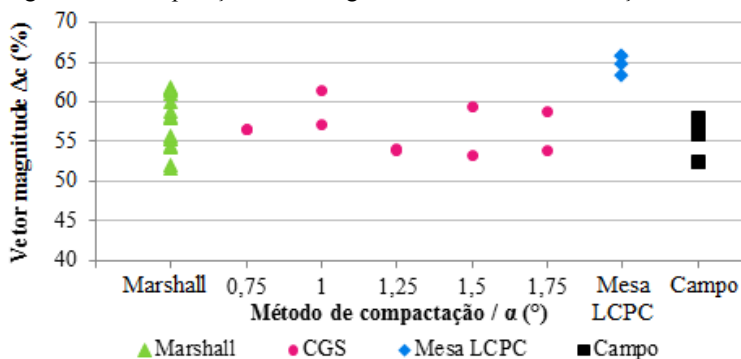


Fonte: Autoria própria.

A orientação do contato define a efetividade dos contatos em relação à distribuição das tensões decorrentes da aplicação de uma carga. Quanto mais próxima a orientação do contato for do sentido da orientação normal (90°), mais eficaz será o contato na resistência à carga axial. Os ângulos de orientação dos contatos agregados variaram entre 62° e 67° . A mesa compactadora foi o método de compactação que apresentou os maiores ângulos de orientação dos contatos e variação dos resultados. A partir da análise isolada deste parâmetro, corpos de prova produzidos na mesa compactadora apresentariam resistência à carga superiores. O Marshall foi o método de compactação que apresentou maior dispersão dos resultados. Os corpos de prova moldados no CGS não exibiram uma tendência de dispersão, sendo está variável dependendo do ângulo de inclinação do eixo de rotação (α). Para este parâmetro, o compactador Marshall foi aquele que apresentou os resultados mais similares ao campo, embora com maior dispersão dos valores. Os corpos de prova moldados no CGS, ângulos de inclinação igual a $0,75^\circ$ e $1,25^\circ$, apresentaram resultados menos dispersos e dentro da faixa de valores obtida para as amostras do trecho experimental.

A Figura 99 apresenta a comparação dos vetores magnitude dos contatos obtidos para os diferentes métodos de compactação analisados (Marshall, CGS, mesa compactadora tipo LCPC e amostras do trecho experimental).

Figura 99 - Comparação vetor magnitude dos contatos nas seções verticais



Fonte: Autoria própria.

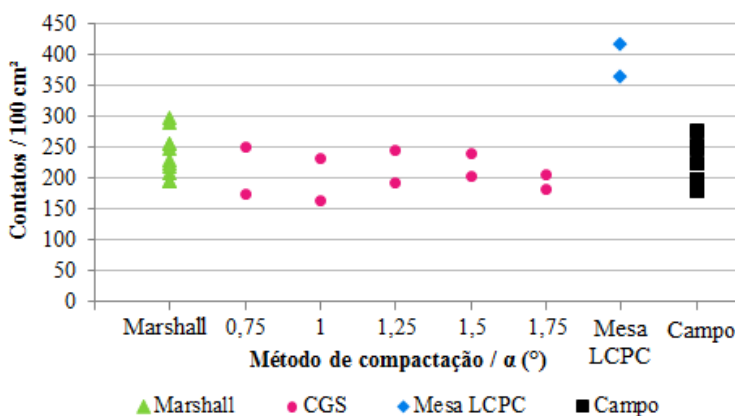
Os vetores magnitude dos contatos oscilaram num intervalo entre 50% e 70%. Valores próximos de 1 ou 100%, indica que os contatos possuem a tendência a estarem orientados em uma direção (anisotropia).

O Marshall foi o método de compactação que apresentou maior dispersão dos resultados. Enquanto que, a mesa compactadora e as amostras extraídas do campo apresentaram resultados menos dispersos. Os corpos de prova moldados no CGS não exibiram uma tendência de dispersão, sendo está variável dependendo do ângulo de inclinação do eixo de rotação (α). Para este parâmetro, o compactador Marshall foi aquele que apresentou os resultados mais similares ao campo, embora com maior dispersão dos valores. Os corpos de prova moldados no CGS, ângulos de inclinação igual a $0,75^\circ$ e $1,25^\circ$, apresentaram resultados menos dispersos e dentro da faixa de valores obtida para as amostras do trecho experimental.

Seções horizontais

A Figura 100 apresenta uma comparação da ocorrência de zonas de contatos obtidos para os diferentes métodos de compactação analisados (Marshall, CGS, mesa compactadora tipo LCPC e amostras do trecho experimental).

Figura 100 - Comparação zonas de contatos nas seções horizontais



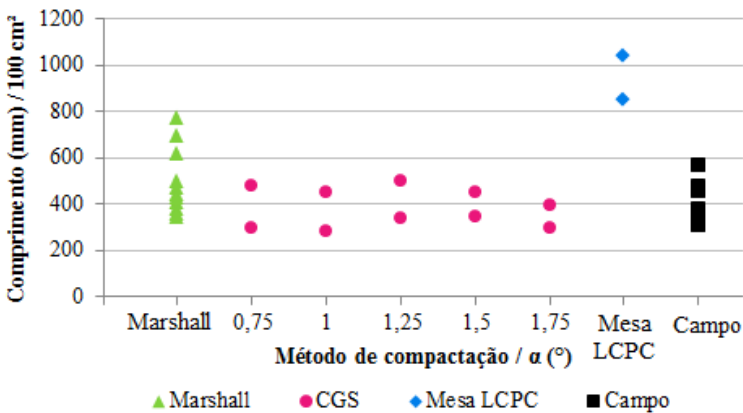
Fonte: Autoria própria.

A ocorrência de zonas de contato para os diferentes métodos de compactação foi variável, entre 150 e 425 zonas de contato por 100 cm² de imagens analisadas. Os corpos de prova Marshall e as amostras extraídas do campo apresentaram dispersão dos resultados semelhante. Para este parâmetro, o compactador Marshall e o CGS apresentaram resultados mais semelhantes ao campo. Quanto às zonas de contato nas

seções horizontais, a mesa compactadora não representa o que ocorre em campo. A mesa compactadora apresentou amostras com maior ocorrência de contatos, concordando com os resultados obtidos por Sefidmazgi e Bahia (2014).

Na Figura 101, podem-se visualizar os comprimentos dos contatos obtidos para corpos de prova moldados no compactador Marshall, no CGS, na mesa compactadora tipo LCPC e para amostras extraídas do trecho experimental.

Figura 101 - Comparação comprimento de contatos nas seções horizontais

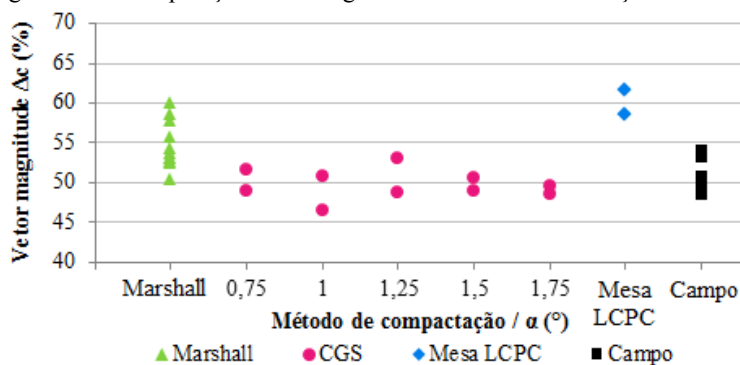


Fonte: Autoria própria.

O comprimento dos contatos para os diferentes métodos de compactação oscilou entre 200 e 1100 milímetros por 100 cm² de imagens analisadas. O Marshall foi o método de compactação que apresentou maior dispersão dos resultados. Para este parâmetro, o compactador Marshall e o CGS apresentaram resultados mais semelhantes ao campo, enquanto que a mesa compactadora não representa o que ocorre em campo.

A Figura 102 apresenta os vetores magnitude dos contatos obtidos para os diferentes métodos de compactação analisados (Marshall, CGS, mesa compactadora tipo LCPC e amostras do trecho experimental).

Figura 102 - Comparação vetor magnitude dos contatos nas seções horizontais



Fonte: Autoria própria.

Os vetores magnitude dos contatos oscilaram num intervalo entre 45% e 65%. Não há tendência de orientação dos contatos em uma direção, nem orientados aleatoriamente. O Marshall foi o método de compactação que apresentou maior dispersão dos resultados. Os corpos de prova moldados no CGS, ângulos de inclinação igual a 0,75°, 1,25°, 1,5° e 1,75°, apresentaram resultados menos dispersos e dentro da faixa de valores obtida para as amostras do trecho experimental. As placas moldadas na mesa compactadora não representam o que ocorre no campo, para este parâmetro.

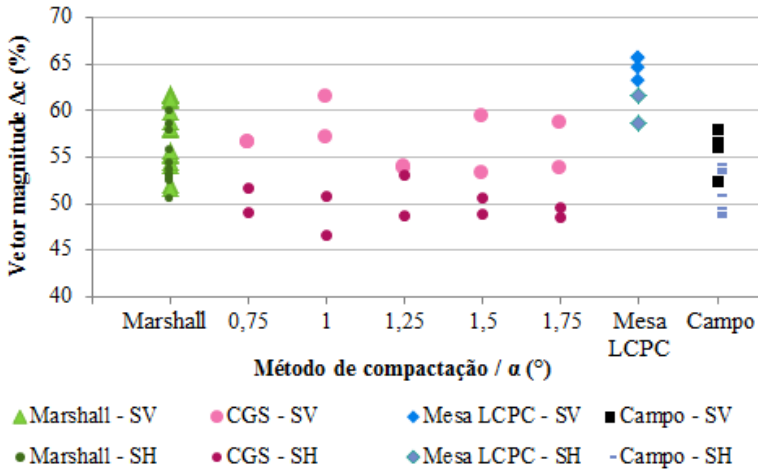
Comparação seções verticais e horizontais

A Figura 103 mostra um comparativo dos valores obtidos de vetor magnitude dos contatos, nas seções verticais e horizontais, de corpos de prova compactados nos compactadores Marshall, CGS, mesa compactadora e de amostras extraídas do campo.

Os vetores magnitude dos contatos, nas seções verticais e horizontais, variaram entre 45 % e 75%. Valores próximos de 1 ou 100%, indica que os contatos possuem a tendência a estarem orientados em uma direção (anisotropia). Devido à variabilidade dos resultados, não se observou, a partir das nuvens de pontos, um comportamento distinto dos vetores magnitude dos contatos nas seções verticais e horizontais. Estatisticamente, não se pode rejeitar a hipótese de que Δc é diferente nas seções horizontais e nas seções verticais com uma

confiabilidade de até 98% (alfa igual a 0,02)²¹. Igualmente, o CGS, a mesa compactadora e o campo apresentaram vetores magnitude maiores nas seções transversais. Isso significa que há uma tendência de organização maior dos contatos nas seções transversais do que nas seções horizontais.

Figura 103 - Comparação vetor magnitude dos contatos nas seções verticais e horizontais



Fonte: Autoria própria.

4.3.2.3 Segregação

A segregação dos agregados (tamanho dos agregados distribuídos por grupo de segregação) foi analisada através do índice de segregação e dos histogramas de frequência. A segregação vertical foi avaliada nos métodos de compactação estudados (Marshall, CGS, Mesa

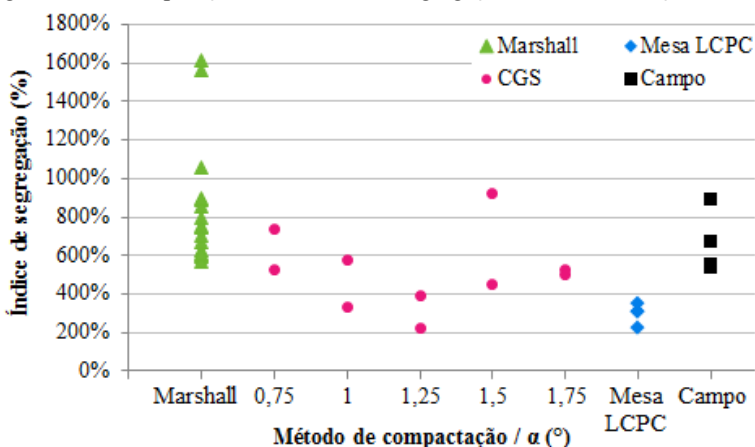
²¹ Foi realizado o teste de Kolmogorov-Smirnov, com uma confiabilidade de 95% (alfa igual a 5%), para verificar a normalidade dos ângulos horizontais nas seções horizontais e nas seções verticais. Aceita a normalidade, foi realizada a comparação de duas médias e determinada a confiabilidade limite para a qual a diferença de médias não pode ser rejeitada.

compactadora tipo LCPC e campo) e, a segregação radial, nos corpos de prova moldados no compactador Marshall e CGS.

Seções verticais

A Figura 104 apresenta um comparativo dos índices de segregação vertical de corpos de prova compactados no compactador Marshall, no CGS, na mesa compactadora e de amostras extraídas do campo.

Figura 104 - Comparação dos índices de segregação vertical nas seções verticais



Fonte: Autoria própria.

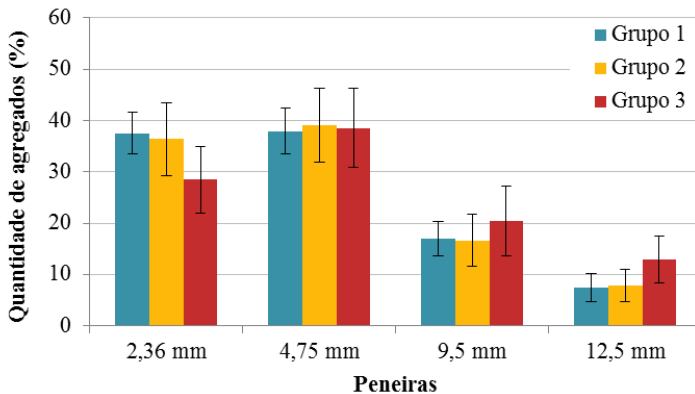
Os índices de segregação vertical oscilaram entre 200% e 1600%, com uma concentração dos resultados entre 200% e 1000%. O Marshall foi o método de compactação que apresentou maior dispersão dos resultados. Enquanto que, a mesa compactadora apresentou valores menores de índice de segregação e resultados menos dispersos. Hunter, Airey e Collop (2004) encontraram uma menor segregação dos agregados no compactador de placas. Bessa, Castelo Branco e Soares (2012) observaram que o CGS produziu amostras mais segregadas do que a mesa compactadora. Considerando o ângulo de inclinação do eixo de rotação do CGS igual a $1,25^\circ$, os resultados encontrados são distintos uma vez que não se pode afirmar que há diferença de segregação entre o CGS (α igual a $1,25^\circ$) e a mesa compactadora tipo LCPC.

Quanto aos histogramas de frequência dos agregados, os resultados obtidos coincidem, em geral, com aqueles de Vasconcelos,

Evangelista Jr. e Soares (2005). Concluiu-se que esta análise qualitativa mostrou-se ineficaz ao tentar conclusões sobre algum padrão de distribuição das partículas. Exceto a segregação vertical das amostras extraídas do trecho experimental, em que se observou que há uma tendência de segregação dos agregados graúdos no fundo em relação ao topo, como afirmam Hassan, Airey e Kahn (2012). Masad et al. (1999) afirmaram que as amostras do campo são mais segregadas. Os histogramas de frequência da distribuição vertical dos agregados de placas extraídas do trecho experimental são mostrados nas Figuras 105 a 108. (Nas Figuras 105 a 108, as barras de erros indicam a variabilidade dos dados e representam mais ou menos um desvio padrão calculado).

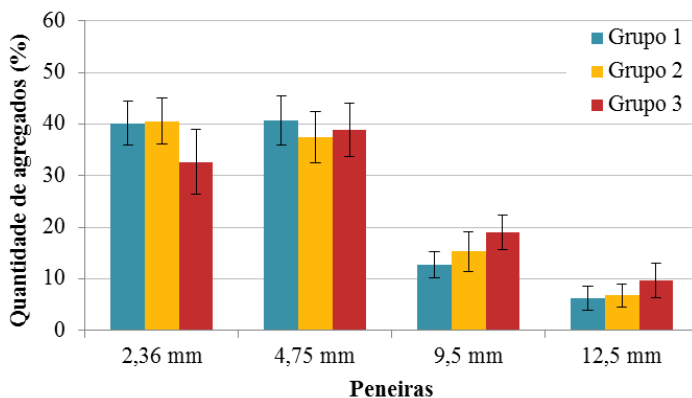
Os três grupos de segregação (G1, G2 e G3) são fixos e definidos/padronizados pelo *software*. Em relação à segregação vertical das partículas, o *software* IPAS-2 foi capaz de fornecer a quantidade de cada tamanho de agregado por grupo de segregação: (i) Grupo 1, relativo à fatia inferior, de altura igual a um terço da altura do corpo de prova; (ii) Grupo 2, relativo à fatia intermediária, de altura igual a um terço da altura do corpo de prova; e (iii) Grupo 3, relativo à fatia superior, de altura igual a um terço da altura do corpo de prova. O programa considerou os agregados retidos em quatro peneiras.

Figura 105 - Segregação vertical das amostras do trecho experimental (1ª camada, CVL)



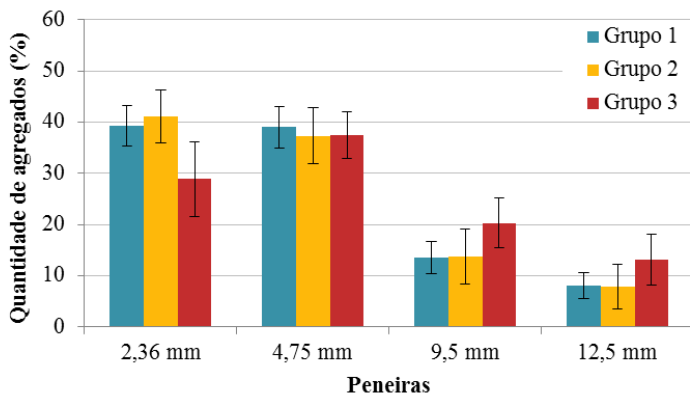
Fonte: Autoria própria.

Figura 106 - Segregação vertical das amostras do trecho experimental (1ª camada, CVT)



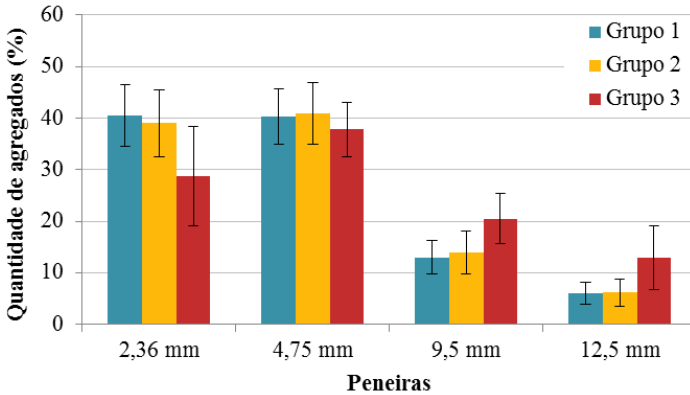
Fonte: Autoria própria.

Figura 107 - Segregação vertical das amostras do trecho experimental (2ª camada, CVL)



Fonte: Autoria própria.

Figura 108 - Segregação vertical das amostras do trecho experimental (2ª camada, CVT)



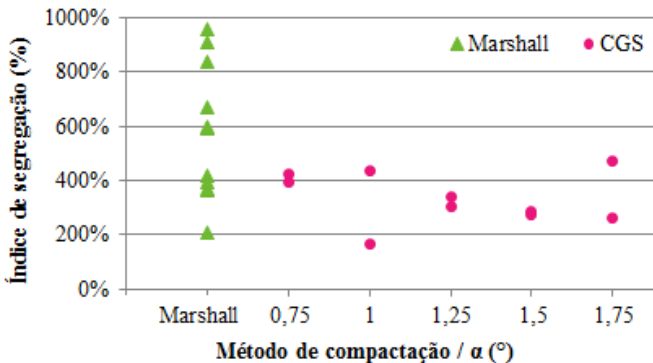
Fonte: Autoria própria.

Como mostram as Figuras 105, 106, 107 e 108, houve uma tendência de os agregados maiores, retidos nas peneiras 9,5 mm e 12,5 mm, depositarem no fundo (Grupo 3, em vermelho) em relação ao topo.

Seções horizontais

A Figura 109 mostra um comparativo dos índices de segregação radial de corpos de prova compactados nos compactadores Marshall e CGS. A segregação radial foi analisada nestes métodos de compactação por apresentarem confinamento circular.

Figura 109 - Comparação dos índices de segregação radial nas seções horizontais



Fonte: Autoria própria.

O índice de segregação radial variou aproximadamente entre 200% e 1000%. O compactador Marshall apresentou uma maior dispersão dos resultados. A variabilidade dos resultados e a aleatoriedade da disposição dos agregados nos grupos de segregação são inerentes do processo/método de compactação. Não há uma tendência de segregação definida.

Outro fator significativo para a dispersão dos índices de segregação é a curva granulométrica da mistura asfáltica. A composição granulométrica caracteriza-se por pequena quantidade de agregados graúdos e grande quantidade de agregados miúdos. Assim sendo, pode ocorrer uma maior segregação dos agregados graúdos: há uma dificuldade em se distribuir uniformemente uma pequena quantidade de agregados nos três grupos de segregação. Essa ocorrência também foi verificada por Vasconcelos, Evangelista Jr. e Soares (2005) que afirmaram que quanto menor o agregado, mais uniforme a distribuição.

Nas tabelas de cálculo dos índices de segregação, em geral, tal fenômeno também pôde ser identificado pelos maiores coeficientes de variação dos agregados graúdos nos três grupos de segregação. Um maior coeficiente de variação indica um elevado nível de segregação, enquanto que uma distribuição uniforme nas três regiões irá resultar num desvio padrão zero (nenhuma segregação). A Tabela 41 exemplifica a variação da distribuição dos agregados nas seções verticais de placas compactadas na mesa compactadora tipo LCPC.

Como pode ser visto nas colunas 6 e 7 da Tabela 41, os coeficientes de variação dos agregados retidos nas peneiras de 9,5 mm e 12,5 mm foram maiores do que os agregados retidos nas peneiras 2,36 mm e 4,75 mm.

Tabela 41 - Cálculo do índice de segregação de placas da mesa compactadora (seções verticais)

Identificação		Porcentagem de agregados (%)					IS (%)
Placa	Corte	Diâmetro (Di)	2,36mm	4,75mm	9,5mm	12,5mm	
1 A	CVT	Média	45	38	12	6	310
		CV	5%	1%	11%	15%	
		CV.Di	11%	6%	107%	185%	
1 C	CVL	Média	46	38	10	5	226
		CV	3%	2%	15%	5%	
		CV.Di	8%	11%	144%	63%	
2 J	CVT	Média	44	39	13	4	310
		CV	3%	2%	7%	18%	
		CV.Di	8%	9%	65%	228%	
2 L	CVL	Média	44	38	13	4	352
		CV	4%	3%	11%	18%	
		CV.Di	9%	16%	106%	221%	

Fonte: Autoria própria.

4.3.2.4 Avaliação da macroestrutura

Considerando-se que a compactação laboratorial deve ser representativa do que ocorre no campo/trecho experimental, faz-se uma avaliação, a partir da análise visual da nuvem de pontos das Figuras 89 a 109, da macroestrutura dos métodos de compactação laboratorial com o campo.

Pode-se inferir que as semelhanças da macroestrutura com o campo dependem dos parâmetros analisados bem como o tipo de seccionamento, vertical ou horizontal.

Para as seções verticais, quanto à orientação dos agregados, a mesa compactadora tipo LCPC foi aquela que melhor representou o campo, considerando a menor dispersão dos resultados. Ainda, os corpos de prova moldados no CGS, ângulo de inclinação do eixo de rotação 0,75° e 1°, também foram representativos. No que diz respeito às zonas de contato, os corpos de prova Marshall e CGS, ângulos de inclinação iguais a 0,75° e 1,25°, apresentaram similaridade ao campo.

Ao analisar as seções horizontais, a mesa compactadora produziu placas menos representativas do que ocorre no campo. Os parâmetros macroestruturais, orientação dos agregados e zonas de contato, não exibiram uma tendência de comportamento. Em geral, os compactadores Marshall e giratório reproduziram o que ocorre no trecho experimental.

No âmbito geral, o compactador Marshall e o CGS, ângulos de inclinação do eixo de rotação $0,75^\circ$, $1,25^\circ$ e 1° , nesta ordem, foram os mais representativos do campo quanto aos parâmetros macroestruturais. Contudo, ressalta-se que o compactador Marshall foi o que apresentou maior variabilidade dos resultados.

A representatividade da compactação do campo não é função apenas de um parâmetro macroestrutural, mas, de um conjunto de parâmetros e das características de desempenho mecânico do material. Neste sentido, é salutar a realização de ensaios de desempenho que complemente esta avaliação dos métodos de compactação por meio da análise da macroestrutura da mistura asfáltica.

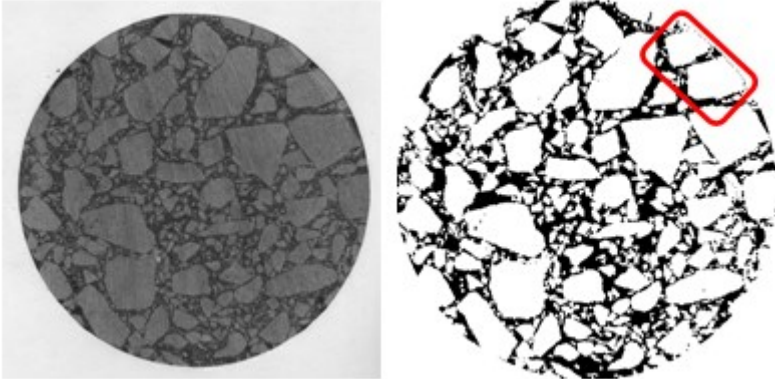
4.3.2.5 Restrições observadas

A partir da análise de imagens de misturas asfálticas produzidas no compactador Marshall, no CGS, na mesa compactadora tipo LCPC e de amostras extraídas do trecho experimental, verificou-se determinadas restrições concernentes aos moldes/condição de confinamento do método de compactação e; à granulometria e forma dos agregados empregados na mistura asfáltica. Estes fatores, intrínsecos aos materiais e métodos deste trabalho, demandaram algumas observações.

Quanto aos moldes/condições de confinamento, observou-se que as placas produzidas na mesa compactadora sofrem menor influência do molde, produzindo amostras menos segregáveis (Figura 112). Pôde-se inferir, a partir da observação visual, que a forma de compactação da mesa e do método Marshall resultou diferente quando os corpos de prova foram serrados. Nos corpos de prova provenientes da mesa compactadora os agregados, principalmente os grãos, se mantiveram intactos e em contato, enquanto que aqueles do método Marshall sofreram arrancamento dos grãos durante o corte. É possível que o tamanho e a forma do molde possam ter influência. Ainda, os corpos de prova produzidos no Marshall (Figura 110) e no CGS (Figura 111) sofrem maior efeito de borda do molde, isto é, são mais susceptíveis a desagregação dos agregados grãos expostos na superfície do corpo de prova (contorno do molde). Embora, não tenha sido verificado na

análise da macroestrutura orientação preferencial radial dos agregados que indique efeito de borda.

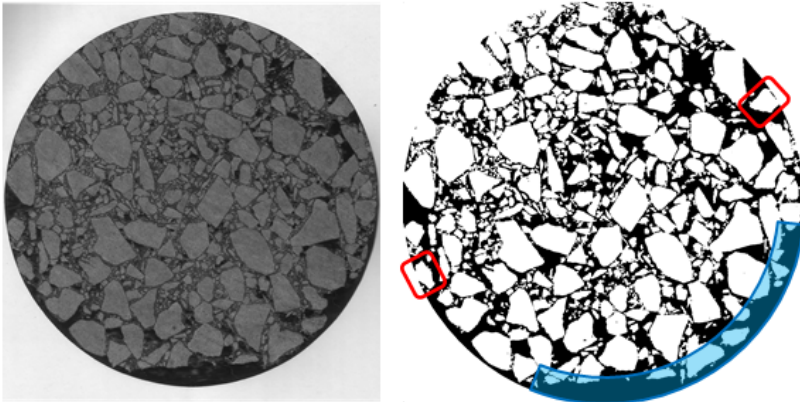
Figura 110 - Restrições observadas quanto aos moldes - corpo de prova Marshall



Nota: Exemplos de agregados potencialmente desagregáveis destacados em vermelho.

Fonte: Autoria própria.

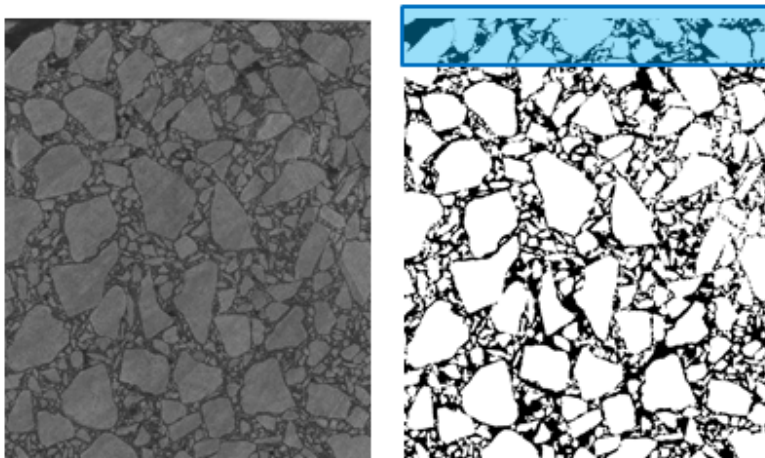
Figura 111 - Restrições observadas quanto aos moldes - corpo de prova CGS



Nota: Exemplos de agregados potencialmente desagregáveis destacados em vermelho; efeito de borda destacado em azul.

Fonte: Autoria própria.

Figura 112 - Restrições observadas quanto aos moldes - amostras mesa compactadora



Nota: Corte de uma imagem obtida de mistura asfáltica compactada na mesa compactadora; efeito de borda do molde da placa destacado em azul.

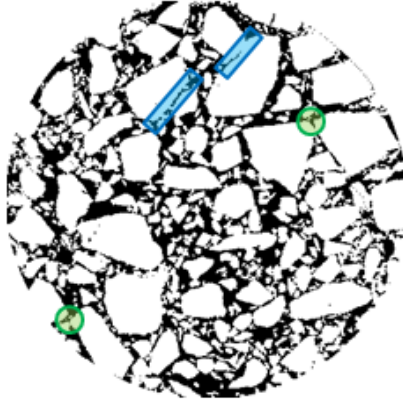
Fonte: Autoria própria.

Quanto à granulometria e à forma dos agregados, observou-se que os agregados basálticos de forma lamelar apresentam duas formas de intertravamento bastante distintas, mostradas na Figura 113: os agregados podem estar contiguamente orientados no sentido do maior comprimento (proporcionando elevados comprimentos de contato) ou os agregados graúdos podem estar em contato através de um ponto de contato e a região entre eles envolta por mastique e uma matriz de agregados finos (originando pequenos pontos de contato). Desta forma, a organização de um esqueleto mineral composto por agregados basálticos de forma lamelar pode apresentar parâmetros macroestruturais bastante variáveis.

A aparência superficial da macroestrutura resultante do efeito de confinamento dos moldes, da granulometria mais graúda utilizada (faixa B do DNIT) e do formato lamelar dos agregados de origem basáltica pode justificar a variabilidade dos parâmetros ocorrência de contatos e comprimento de contatos por área de imagem analisada. Uma pequena região desagregada ou vazia em função da macroestrutura pode variar a densidade dos contatos e conseqüentemente, dos comprimentos destes, por área de imagem analisada já que o *software* de análise de imagens só

permite a análise de imagens retangulares ou circulares perfeitas (não permitindo a exclusão dessas imperfeições).

Figura 113 - Restrições observadas quanto à granulometria e à forma dos agregados

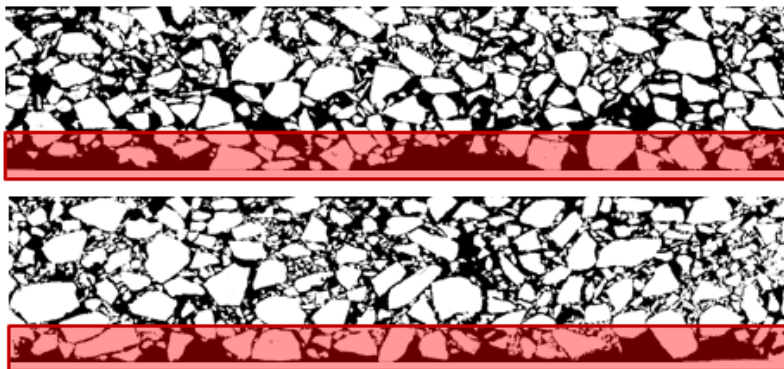


Nota: Agregados contigualmente alinhados destacados em azul; “pontos” de contato destacados em verde.

Fonte: Autoria própria.

A menor ocorrência de zonas de contato no material do campo pode também indicar problemas de execução na camada de revestimento asfáltico. A inconstância da espessura das camadas, mostradas na Figura 114, mesmo que com pequenas variações em nível de trecho experimental, aliada a macroestrutura, corroboram para a dispersão dos resultados e pequenas densidades de contatos nas amostras do trecho experimental. Não se pode, ainda, excluir o efeito/impacto da sonda rotativa e da máquina de corte na extração das amostras dos trechos experimentais que contribuem para a fratura e desagregação do material.

Figura 114 - Imagens da primeira camada de revestimento asfáltico (cortes verticais)



Nota: Inconstâncias na espessura no fundo da primeira camada destacadas em vermelho.

Fonte: Autoria própria.

4.4 ENSAIO DE DESEMPENHO MECÂNICO

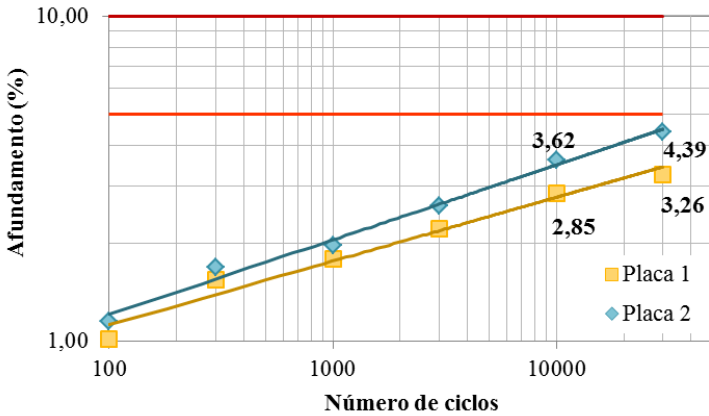
O ensaio de caracterização mecânica realizado foi o desempenho à deformação permanente, verificado no simulador de tráfego francês *Orniéreur*.

As diretrizes francesas recomendam 10% de afundamento, o valor aceitável de deformação de misturas asfálticas utilizadas para fins de revestimento (LCPC, 2007). Contudo este valor admissível de deformação é definido conforme as diretrizes francesas de tráfego, na qual o eixo padrão de solicitação corresponde a 130 kN. No Brasil, o eixo padrão utilizado no dimensionamento de pavimento é 80 kN (8,2 tf).

Outra diretriz europeia limita as deformações permanentes em 5% no caso de misturas asfálticas densas, utilizadas como revestimento em rodovias de tráfego pesado (COST 333, 1999).

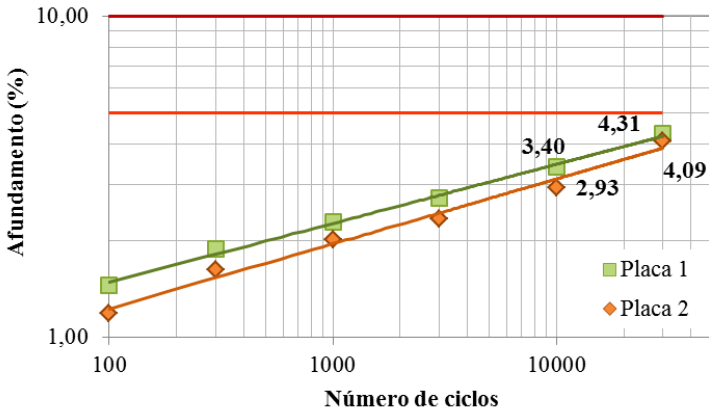
As Figuras 115 e 116 apresentam os resultados dos ensaios de desempenho a deformação permanente de placas compactadas em laboratório e extraídas de campo, respectivamente.

Figura 115 - Desempenho a deformação permanente de placas moldadas em laboratório



Fonte: Autoria própria.

Figura 116 - Desempenho a deformação permanente de placas extraídas do trecho experimental



Fonte: Trichês (2014).

Verificou-se que os materiais produzidos em laboratório e os extraídos do campo apresentam desempenhos semelhantes à deformação permanente, mesmo que a análise da macroestrutura tenha-se mostrado distinta quanto aos parâmetros analisados. As quatro placas ensaiadas (de laboratório e de campo) obtiveram uma deformação permanente inferior a 5% especificado pela normativa europeia mais restritiva.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

De acordo com os objetivos propostos neste trabalho, foram levantados subsídios teóricos e práticos sobre métodos de compactação laboratorial e de campo. As misturas asfálticas foram compactadas em laboratório no compactador Marshall, no CGS e na mesa compactadora. Amostras compactadas em campo por rolos lisos e pneumáticos foram extraídas de um trecho experimental na rodovia BR-101. As diferenças induzidas no esqueleto mineral das misturas asfálticas compactadas por diferentes métodos de compactação foram analisadas por meio do Processamento Digital de Imagens com o uso do *software* IPAS-2. Conclui-se que os objetivos foram alcançados, demonstrados durante o desenvolvimento deste trabalho.

Considerações sobre a compactação no Compactador Giratório Superpave

Corpos de prova foram compactados no Compactador Giratório Superpave com ângulos de inclinação do eixo de rotação iguais a 0,75°; 1°; 1,25°; 1,5° e 1,75° a fim de investigar a variação deste parâmetro. A compactação foi concluída a partir do critério da massa específica aparente, de modo que as amostras atenderam ao critério do grau de compactação entre 97% e 101%.

Para o critério de finalização da compactação adotado, o número de giros total da compactação dos corpos de prova diminuiu com o aumento do ângulo de inclinação do eixo de rotação para um intervalo de volume de vazios que compreende 97% a 101% do grau de compactação. Observou-se uma tendência linear (constante) quanto ao volume de vazios obtidos, uma vez que este foi, indiretamente, o critério especificado para a finalização da compactação.

Uma mudança na taxa de compactação, denominado ponto de inflexão, ocorreu a aproximadamente um terço do início da compactação. Este parâmetro está diretamente relacionado com o percentual de volume de vazios na mistura, pois, houve uma redução na taxa de compactação após a mistura asfáltica atingir um volume de vazios menor ou igual a 7,3% aproximadamente.

O parâmetro relacionado ao intertravamento da mistura, o *locking point*, ocorreu, em média, aos 82 giros e apresentou pouca variação com a alteração do ângulo de inclinação do eixo de rotação. A pouca variação encontrada neste índice indicou que é uma característica da mistura asfáltica e, possivelmente, a pressão de compactação exerceu

maior influência. Quanto ao percentual da massa específica máxima teórica atingida (%Gmm) no *locking point*, os ângulos de inclinação 1,25°, 1,5° e 1,75° foram os que mais se aproximam da massa específica aparente última de campo (avaliada por Prowell e Brown, 2007) igual a 96% Gmm. No entanto, o ângulo de inclinação 1,25° torna-se mais adequado para realização dos ensaios, pois é o menor ângulo de inclinação do eixo de rotação do equipamento em que todos os corpos de prova moldados atingiram o *locking point*.

A partir dos resultados dos ensaios de compactação observou-se que as inclinações das curvas de compactação aumentaram com o aumento do ângulo de inclinação do eixo de rotação do CGS. Ocorreu uma diminuição da resistência à compactação e um aumento da taxa de compactação com o aumento do esforço cisalhante (aumento do ângulo de inclinação do eixo de rotação) na mistura asfáltica. No intervalo entre 1° e 1,5° visualiza-se um aumento acentuado e constante, enquanto que pequenas variações ocorrem entre 0,75° e 1° e, entre 1,5° e 1,75°. Este comportamento pode estar relacionado com a faixa de temperatura de compactação da mistura asfáltica. O CGS não possui sistema de aquecimento para o molde. Observou-se que o molde e a mistura asfáltica perdem temperatura e isso pode ter influenciado na inclinação da curva.

Considerações sobre a macroestrutura das misturas asfálticas

A avaliação da influência do método de compactação na macroestrutura da mistura asfáltica foi realizada por meio do Processamento Digital de Imagens com o uso do *software* IPAS-2. Foram analisadas imagens de misturas asfálticas compactadas em laboratório no compactador Marshall, no CGS (com ângulos de inclinação do eixo de rotação iguais a 0,75°; 1°; 1,25; 1,5° e 1,75°) e na mesa compactadora tipo LCPC. Como a macroestrutura da mistura asfáltica durante a compactação em laboratório pode ser diferente daquela obtida em campo, foram extraídos amostras compactadas por rolos lisos e pneumáticos de um trecho experimental na rodovia BR-101.

As diferenças no esqueleto mineral induzidas pelos diferentes modos de compactação (compactador Marshall, compactador giratório, mesa compactadora e rolo compactador em campo) foram descritas em função da orientação das partículas, das zonas de contato e da segregação.

Quanto à orientação das partículas, os ângulos de orientação horizontal dos agregados, nas seções verticais, foram superiores a 45°,

indicando que não houve uma tendência de organização dos agregados no plano horizontal. Além disso, os baixos valores dos vetores magnitude dos agregados, nas seções verticais e horizontais, indicaram que houve uma tendência dos agregados distribuírem-se aleatoriamente. Contudo, vetores magnitude maiores nas seções verticais indicam que houve uma tendência de organização maior das partículas nas seções transversais.

O efeito de confinamento do molde foi avaliado por meio do ângulo de orientação radial dos agregados nas seções horizontais. Como o intervalo dos ângulos oscilou próximo a 45° , não se pode afirmar que houve uma tendência de alinhamento das partículas nas direções circunferencial ou radial. Portanto, não foi verificado neste trabalho efeito de confinamento do molde na orientação dos agregados.

Quanto às zonas de contatos, a ocorrência destas, bem como os comprimentos dos contatos, foram variáveis para os diferentes métodos de compactação. Observou-se que os parâmetros relacionados aos contatos variam conforme as condições de confinamento dos moldes utilizados nos métodos de compactação. Neste sentido, placas produzidas na mesa compactadora sofreram menor influência do molde e apresentaram maiores ocorrências de contatos, divergindo do campo. Enquanto que os corpos de prova produzidos no Marshall e no CGS sofreram maior efeito de borda do molde, isto é, mais susceptíveis a desagregação dos agregados graúdos expostos na superfície do corpo de prova. Embora, não tenha sido verificado na análise da macroestrutura orientação preferencial radial dos agregados que indique efeito de borda. De modo geral, corpos de prova moldados no compactador Marshall e no CGS apresentaram maior semelhança com o campo.

Além disso, a organização de um esqueleto mineral resultante do efeito de confinamento dos moldes, da granulometria mais graúda utilizada (faixa B do DNIT) e do formato lamelar dos agregados de origem basáltica justifica a variabilidade dos parâmetros macroestruturais relacionados aos contatos.

A menor ocorrência de zonas de contato no material do campo pode também indicar problemas de execução na camada de revestimento asfáltico. A inconstância da espessura das camadas, mostradas na Figura 114, mesmo que com pequenas variações em nível de trecho experimental, aliada a macroestrutura, corroboram para a dispersão dos resultados e pequenas densidades de contatos nas amostras do trecho experimental. Não se pode, ainda, excluir o efeito/impacto da sonda rotativa e da máquina de corte na extração das amostras dos trechos experimentais que contribuem para a fratura e desagregação do material

A orientação do contato define a efetividade dos contatos em relação à distribuição das tensões decorrentes da aplicação de uma carga. A partir da análise isolada deste parâmetro, corpos de prova produzidos na mesa compactadora apresentariam resistência superior, pois apresentaram os maiores ângulos de orientação dos contatos (mais próximos a orientação normal).

Os vetores magnitude dos contatos, nas seções verticais e horizontais, variaram entre 45 % e 75%, e indicaram que os contatos possuem a tendência a estarem orientados em uma direção. Em geral, houve uma tendência de os vetores magnitude serem maiores nas seções verticais. Isso significa que houve uma tendência de organização maior dos contatos nas seções transversais do que nas seções horizontais.

Quanto à segregação vertical das partículas, a mesa compactadora apresentou valores menores de índice de segregação e resultados menos dispersos. A análise qualitativa da segregação, por meio de histogramas de frequência dos agregados nos grupos de segregação, mostrou-se ineficaz ao tentar conclusões sobre algum padrão de distribuição das partículas. Exceto a segregação vertical das amostras extraídas do trecho experimental, em que se observou que houve uma tendência de segregação dos agregados graúdos no fundo em relação ao topo.

Notou-se uma dispersão dos resultados dos índices de segregação radial dos corpos de prova Marshall e giratório. A composição granulométrica utilizada contribui para este fato ao caracteriza-se por pequena quantidade de agregados graúdos e grande quantidade de agregados miúdos. Ocorreu uma maior segregação dos agregados graúdos posto que houve uma dificuldade em se distribuir uniformemente uma pequena quantidade de agregados nos três grupos de segregação. Tal fenômeno também foi identificado pelos maiores coeficientes de variação dos agregados graúdos nos três grupos de segregação.

Com o objetivo de certificar que compactação laboratorial seja mais representativa possível do que ocorre no trecho experimental, os parâmetros macroestruturais obtidos na compactação laboratorial foram comparados com o campo. Em geral, o compactador Marshall e o CGS, ângulos de inclinação do eixo de rotação $0,75^\circ$, $1,25^\circ$ e 1° , nesta ordem, foram os mais representativos. Contudo, ressalta-se que o compactador Marshall foi o que apresentou maior variabilidade dos resultados.

Considerando as análises da compactação no CGS e da macroestrutura, o CGS com ângulo de inclinação do eixo $1,25^\circ$ é o que mais se aproxima do que ocorre no campo. A representatividade da compactação do campo não é função apenas de um parâmetro

macroestrutural, mas, de um conjunto de parâmetros e das características de desempenho mecânico do material. Neste sentido, é salutar a realização de ensaios de desempenho que complemente esta avaliação dos métodos de compactação por meio da análise da macroestrutura da mistura asfáltica.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para o prosseguimento deste estudo propõe-se:

- Investigar a quantidade de amostras ou estabelecer critérios (desvio padrão, coeficiente de variação de determinado parâmetro) que norteiem o número mínimo de amostras por condição investigada;
- Investigar, na macroescala, o efeito de agregados de forma lamelar (origem basáltica);
- Realizar o estudo para outras misturas asfálticas (granulometrias, tipo e teor de ligante, percentual de volume de vazios);
- Estudar a organização do esqueleto mineral de misturas asfálticas compactadas somente com rolo liso;
- Utilizar novos equipamentos de análises de imagens que permitam a análise tridimensional e determinar a orientação e distribuição do esqueleto mineral e dos vazios;
- Avaliar os métodos de compactação laboratorial com o campo por meio de ensaios de desempenho da mistura asfáltica;
- Correlacionar os índices/parâmetros da estrutura interna de misturas asfálticas com desempenho mecânico;
- Desenvolver um método de seleção de granulometria baseado na avaliação, comparação laboratório e campo, da estrutura interna resultante e respectivo desempenho.

REFERÊNCIAS

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation. **AASHTO M 323: Standard specification for Superpave volumetric mix design.** Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2013.

_____. **AASHTO R 30: Standard practice for mixture conditioning of hot-mix asphalt (HMA).** Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2010.

_____. **AASHTO R 35: Standard practice for superpave volumetric design for hot-mix asphalt (HMA).** Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2012.

_____. **AASHTO T 112: Standard method of test for clay lumps and friable particles in aggregate.** Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2012.

_____. **AASHTO T 176: Standard method of test for plastic fines in graded aggregates and soils by use of the sand equivalent test.** Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2008.

_____. **AASHTO T 283: Standard method of test for resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage.** Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2011.

ABDUL HASSAN, N.; AIREY, G. D.; HAININ, M. R..
Characterisation of micro-structural damage in asphalt mixtures using image analysis. **Construction and Building Materials**, v. 54, p. 27-328, 2014.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6954: Lastro-padrão - Determinação da forma do material.** Rio de Janeiro, 1989.

_____. **NBR 15897: Misturas asfálticas a quente - Preparação de corpos-de-prova com compactador giratório Superpave.** Rio de Janeiro, 2010.

AFNOR - Association Française de Normalisation. **AFNOR NF P 98-250-2: Essais relatifs aux chaussées - préparation des mélanges hydrocarbonés, partie 2: compactage des plaques.** Association Française de Normalisation, AFNOR. 1991.

_____. **AFNOR NF P 98-253-1: Préparation des mélanges hydrocarbonés, partie 1: essai d'orniérage.** Association Française de Normalisation, AFNOR. 1993.

ALDIGUERI, D. R.; SILVEIRA, M. A.; SOARES, J. B.. Estudo comparativo entre compactação manual e automática de misturas asfálticas. In: 33ª Reunião Anual de Pavimentação. **Anais 33ª Reunião Anual de Pavimentação.** Florianópolis, 2001.

AL-KHATEEB, G. et al. Target and tolerance for the angle of gyration used in the Superpave Gyratory Compactor. In: Annual Meeting of the Transportation Research Board. **The Transportation Research Board**, 2002.

AL-ROUSAN, T. et al. Evaluation of image analysis techniques for quantifying aggregate shape characteristics. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 5, p. 978-990, maio 2007.

AMELIAN, S.; ABTAHI, S. M.; HEJAZI, S. M. Moisture susceptibility evaluation of asphalt mixes based on image analysis. **Construction and Building Materials**, v. 63, p. 294-302, jul. 2014.

ANDERSON, R. M.; TURNER, P. A.; PETERSON, R. L.; MALLICK, R.B.. Relationship of Superpave Gyratory Compaction Properties to HMA Rutting Behavior. **National Cooperative Highway Research Program - NCHRP**. Washington. 2002. (NCHRP REPORT 478).

ARCHILLA, Adrián Ricardo. Use of Superpave Gyratory Compaction Data for Rutting Prediction. **Journal of Transportation Engineering**, v. 132, n. 9, p. 734-741, 2006.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM C 1252: Standard test methods for uncompacted void content of fine**

aggregate (as influenced by particle shape, surface texture and grading). USA. 2006.

_____. **ASTM C 127: Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate.** USA. 2012.

_____. **ASTM C 131: Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine.** USA. 2006.

_____. **ASTM C 88: Standard test method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate.** USA. 2013.

_____. **ASTM D 36: Standard test method for softening point of bitumen (ring-and-ball apparatus).** USA. 2014.

_____. **ASTM D 4402: Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer.** USA. 2013.

_____. **ASTM D 5: Standard test method for penetration of bituminous materials.** USA. 2013.

_____. **ASTM D 5821: Standard test method for determining the percentage of fractured particles in coarse aggregate.** USA. 2013.

BAHIA, Hussain. **Asphalt Mixture Visualization - IPas2 Software and Characterization of Aggregate Skeleton** (Apresentação). In: Congresso Brasileiro de Reologia, Aracaju, 2013.

BERNUCCI, L. B. et al.. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008.

BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B.. **Caracterização de Agregados Convencionais e Alternativos Utilizando Técnicas de Processamento Digital de Imagens.** In: XXIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. **Anais do XXIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**, ANPET, Vitória, 2009.

_____. Evaluation of Different Digital Image Processing Software for Aggregates and Hot Mix Asphalt Characterizations. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 370-378, 2012.

BESSA, Iuri Sidney. **Avaliação do Processamento Digital de Imagens como Ferramenta para Caracterização de Agregados e Misturas Asfálticas**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Fortaleza, 2012.

BRASIL. **DNIT 031/2006 - ES: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de Serviço**. Norma rodoviária. Rio de Janeiro: 2006a.

_____. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de Pavimentação**. 3. Ed. - Rio de Janeiro, 2006b.

BROWN, E. Ray. Density of asphalt concrete: How much is needed? In: 69th Annual Meeting of the Transportation Research Board. **NCAT Report**, v.3, Washington, 1990.

BRUNO, L.; PARLA, G.; CELAURO, C. Image analysis for detecting aggregate gradation in asphalt mixture from planar images. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 21-30, mar. 2012.

BUCHANAN, M. S.; BRUMFIELD, J.; SHEFFIELD, R.. Investigation of the gyration angle of superpave gyratory compactors. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 16, n. 5, p. 444-451, 2004.

CEN - European Committee for Standardization. **EN 12697-10 - Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 10 - Compactability**. Bruxelas, Bélgica, 2001.

CHAVES, J. M. C.; SILVA, A. H. M.; BERNUCCI L. B.; ALBA, V.; FLORÊNCIO, H. Desenvolvimento de equipamento de compactação por rolagem para laboratório. **Anais do 8º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões - CBR&C 2013**. Santos, 2013.

Controls. **SHRP Method / Superpave System**. Disponível em: <
<http://www.controls->

group.com/backend/technology_comm/file_tmp/140505163271_shrp_method_superpave_system.pdf>. Acesso em: 18 mar 2016.

COST 333. Development of New Bituminous Pavement Design Method: Final Report of the Action. European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research. European Commission Directorate General Transport. Belgium. 1999.

DARABI, M. K.. A thermo-viscoelastic-viscoplastic-viscodamage constitutive model for asphaltic materials. **International Journal of Solids and Structures**, v. 48, n. 1, p. 191-207, 2011.

DELGADILLO, R.; BAHIA, H. U.. Effects of Temperature and Pressure on Hot Mixed Asphalt Compaction: Field and Laboratory Study. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 20, n. 6, p. 440-448, 2008.

DELRIO-PRAT, M. et al.. Energy consumption during compaction with a Gyrotory Intensive Compactor Tester. Estimation models. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 2, p. 979-986, 2011.

DESSOUKY, S.; MASAD, E.; BAYOMY, F.. Prediction of Hot Mix Asphalt Stability Using the Superpave Gyrotory Compactor. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 16, n. 6, p. 578-587, 2004.

DeVOL, J.; J Krause; S. McLaughlin; K. Willoughby; I. McLean. **Superpave Gyrotory Compactor internal angle of gyration study.** (Relatório técnico) USA, 2007.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 084: agregado miúdo - Determinação da densidade real.** Método de Ensaio. Rio de Janeiro. 1995.

_____. **DNER-ME 085: Material finamente pulverizado - Determinação da massa específica real.** Método de Ensaio. Rio de Janeiro. 1994.

DUBOIS, V.; DE LA ROCHE, C.; BURBAN, O.. Influence of the compaction process on the air void homogeneity of asphalt mixtures samples. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 6, p. 885-897, 2010.

EAPA - European Asphalt Pavement Association. **What is asphalt.** Disponível em: <<http://www.eapa.org/asphalt.php?c=78>>. Acesso em: 5 abr. 2016.

EL-HAGE, Robert Becerra. **Estudo de misturas asfálticas tipo Stone Matrix Asphalt (SMA) à luz dos compactadores Marshall e Superpave.** Dissertação (mestrado) - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2012.

FAUCHARD, C. et al.. Determination of the compaction of hot mix asphalt using high-frequency electromagnetic methods. **NDT & E International**, v. 60, p. 40-51, 2013.

FHWA - Federal Highway Administration Research and Technology. **Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis.** Federal Highway Administration, FHWA-SA-95-003. Lexington, KY, USA. 1994

_____. **Bituminous Mixtures Laboratory.** Disponível em: <<https://www.fhwa.dot.gov/research/tfhrc/labs/materialscomplex/mixtures/>>. Acesso em: 10 maio 2014.

FONTES, Liseane Padilha Thives da Luz. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos.** Tese (doutorado) - Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Minho, 2009.

HAMZAH, M. O. et al. Quantification of moisture sensitivity of warm mix asphalt using image analysis technique. **Journal of Cleaner Production**, v. 68, p. 200-208, abr. 2014.

HAMZAH, M. O.; VON, W. C.; ABDULLAH, N. H.. Effects of Compactor Types on Aggregate Orientation of Asphalt Mixtures. **International Journal of Engineering**, v. 26, p. 677-684, 2013.

HARMAN, T. et al.. The history and Future Challenges of Gyrotory Compaction 1939 to 2001. In: Annual Meeting of the Transportation Research Board. **Transportation Research Board**, USA, 2001.

HASSAN, N. A.; AIREY, G. D.; KHAN, R.. Nondestructive characterisation of the effect of asphalt mixture compaction on aggregate orientation and segregation using x-ray computed

tomography. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 5, n. 2, p. 84-92, 2012.

HUERNE, H. L. ter . **Compaction of asphalt pavements**. Tese (doutorado) - University of Twente, Enschede, The Netherlands, 2004.

HUNTER, A. E.; AIREY, G. D.; COLLOP, A. C.. Aggregate Orientation and Segregation in Laboratory-Compacted Asphalt Samples, **Journal of the Transportation Research Record**, TRB, No. 1891, TRB, p. 8-15. Washington, DC, 2004

HUNTER, A. E.; MCGREAVY, L.; AIREY, G. D. Effect of Compaction Mode on the Mechanical Performance and Variability of Asphalt Mixtures. **Journal of Transportation Engineering**, v. 135, n. 11, p. 839-851, 2009.

IPC Global[®]. **Servopac**. Disponível em: < <http://www.ipcglobal.com.au/products/product-range/servopac.html?referer=Home%20-%3E%20Products%20-%3E%20Application%20-%3E%20Asphalt%20Applications%20-%3E%20Gyratory%20Compaction>>. Acesso em: 6 abr. 2015.

_____. **IPC Global PREBOX - Laboratory Asphalt Compactor**. Disponível em: < <http://www.ipcglobal.com.au/products/product-range/presbox-laboratory-asphalt-compactor/>>. Acesso em: 20 mar. 2016.

James Cox & Sons. **California kneading compactor**. Disponível em: < <http://jamescoxandsons.com/asphalt-compaction/california-kneading-compactor.php>>. Acesso em: 10 maio 2014.

KHAN, R. et al. Moisture damage in asphalt mixtures using the modified SATS test and image analysis. **Construction and Building Materials**, v. 43, p. 165-173, jun. 2013.

KHAN, Z. A. et al.. Comparative study of asphalt concrete laboratory compaction methods to simulate field compaction. **Construction and Building Materials**, v. 12, n. 6-7, p. 373-384, 1998.

KHOSLA, N. P.; AYYALA, D.. A Performance-based Evaluation of Superpave Design Gyration for High Traffic Surface Mixes. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 104, p. 109-118, 2013.

KHOSRAVI, H. et al. An analytical-empirical investigation of the bleeding mechanism of asphalt mixes. **Construction and Building Materials**, v. 45, p. 138-144, ago. 2013.

LCPC. **Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés à chaud**. Groupe de travail RST Formulation des enrobés à chaud. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. France. 2007.

LEANDRO, R. P.; VASCONCELOS, K.; BERNUCCI, L. L. B.; BEJA, I. A.; CHAVES, J. M. C.. Avaliação no nível de densificação de misturas asfálticas resultantes de diferentes métodos de compactação de laboratório. **Anais do 9º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões - CBR&C 2013**. Brasília, 2015.

LIU, T. et al. Research on the homogeneity of asphalt pavement quality using X-ray computed tomography (CT) and fractal theory. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 587-598, out. 2014.

MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. **Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; efeito da compactação por impacto e giratória**. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

MARTIN, W. D.; PUTMAN, B. J.; KAYE, N. B. Using image analysis to measure the porosity distribution of a porous pavement. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 210-217, nov. 2013.

MASAD, E. et al.. Internal structure characterization of asphalt concrete using image analysis. **Journal of Computing in Civil Engineering**, American Society of Civil Engineering, p. 88-95, 1999.

_____. Aggregate Orientation and Segregation in Asphalt Concrete. **Geotechnical Special Publication**, American Society of Civil Engineering, v. 85, p. 69-80, 2009.

MELO, João Victor Staub de. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos**. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2014.

MICAELLO, Rui Alexandre Lopes Baltazar. Compactação de misturas betuminosas: Ensaio de campo e modelação numérica. Tese (doutorado) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2008.

Modified Asphalt Research Center (MARC), University of Wisconsin-Madison. **IPAS (Image Processing & Analysis System)**. *Software download* (versão 1) e *request form* disponíveis em: <<https://uwmarc.wisc.edu/ipas-software-package>>. Acesso em: 30 out. 2014

NASCIMENTO, L. A. H. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

ONOFRE, F. C. et al.. Correlação Entre Variáveis de Densificação do Compactador Giratório e Resistência à Deformação Permanente de Misturas Asfálticas Convencionais e com Resíduos. **Revista Transportes**, v. XIX, p. 13-22. Rio de Janeiro. 2011

OTTO, Gustavo Garcia. **Misturas asfálticas mornas - verificação da fadiga e do módulo complexo**. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

Pavement Interactive. **Gradation and Size**. Disponível em: <<http://www.pavementinteractive.org/article/gradation-and-size/>>. Acesso em: 25 abr. 2016. Publicado em: jun. 2009.

Pavement Interactive. **Factors Affecting Compaction**. Disponível em: <<http://www.pavementinteractive.org/article/factors-affecting-compaction/>>. Acesso em: 13 abr. 2015. Publicado em: dez. 2010.

PETERSON, R. L. et al.. Comparing Superpave Gyrotory Compactor Data to Field Cores. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 16, n. 1, p. 78-83, 2004.

PROWELL, B. D.; BROWN, E. R. Superpave Mix Design: Verifying Gyration Levels in the Ndesign Table. **National Cooperative Highway Research Program - NCHRP**. Washington. 2007. (NCHRP REPORT 573).

PROWELL, B. D., BROWN, E. R.; HUNER, M.. **Evaluation of the internal angle of gyration of Superpave Gyratory Compactors in Alabama**. National Center for Asphalt Technology, Auburn University. Estados Unidos, 2003.

TRICHÊS, Glicério. **Relatório Final Projeto Petrobrás Fase 1**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014.

SEFIDMAZGI, N. R.; BAHIA, H.. Effect of compaction conditions on aggregate packing using 2-dimensional image analysis and the relation to performance of HMA. **Materials and Structures**, v. 47, p. 1313-1324, 2014.

SEFIDMAZGI, N. R.; TASHMAN, L.; BAHIA, H.. Internal Structure Characterization of Asphalt Mixtures for Rutting Performance Using Imaging Analysis. **Road Materials and Pavement Design**, v. 13, p. 21-37, 2012.

SEFIDMAZGI, Nima Roohi. **Defining effective aggregate skeleton in asphalt mixture using digital imaging**. Dissertação (mestrado). The University of Wisconsin-Madison. Madison, 2011.

SOLOTEST. **Catálogo de produtos**. Disponível em: <<http://www.solotest.com/catalogos/B2.PDF>>. Acesso em: 10 maio 2014.

SOUZA, L. T.; EVANGELISTA JR, F.; SOARES, J. B. Processamento Digital de Imagens Aplicado a Análise Micromecânica de Misturas Asfálticas. In: 18º Encontro de Asfalto - IBP. **Anais do 18º Encontro de Asfalto**, Rio de Janeiro, 2006.

STAKSTON, A.; BAHIA, H.. The effect of fine aggregate angularity, asphalt content and performance graded asphalts on hot mix asphalt performance. **Wisconsin Highway Research Program**, Wisconsin, 2003.

SWIERTZ, D.; MAHMOUD, E.; BAHIA, H.. **Asphalt Mixture Compaction and Aggregate Structure Analysis Techniques**: State of the art report. University of Wisconsin-Madison, 2010.

TASHMAN, L. et al.. 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, 2001.

U.S DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Superpave fundamentals: reference manual**. Federal Highway Administration, National Highway Institute. 2010.

VASCONCELOS, K. L.; EVANGELISTA JR., F.; SOARES, J. B. Análise da Estrutura Interna de Misturas Asfálticas. In: XVII Congresso Brasileiro de Pesquisa e Ensino em Transportes. **Anais do XVII Congresso Brasileiro de Pesquisa e Ensino em Transportes**, Recife, 2005.

VASCONCELOS, Kamilla Lima. **Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Quente Dosadas pelas Metodologias Marshall e Superpave com Diferentes Granulometrias**. Dissertação (mestrado) - Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

VECTRA France. **PCG3 mlpc® - Compactibility**. Disponível em: <<http://vectrafrance.com/materials-and-solutions/laboratory-equipment/peg3-mlpcR-compactibility?L=6>>. Acesso em: 15 abr. 2015.

WANG, Yongping. **Digital Simulative Test of Asphalt Mixtures Using Finite Element Method and X-Ray Tomography Images**. Tese (doutorado). Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, 2007.

WATSON, D. E. et al. Verification of Superpave Number of Design Gyration Compaction Levels for Georgia. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington, n. 2057, 2008. 75 - 82.

XIAO, F. et al.. Feasibility of Superpave gyratory compaction of rubberized asphalt concrete mixtures containing reclaimed asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 432-438, 2012.

YU J. M. et al.. Study of microstructural finite element modelling of asphalt mixture. In: 25th Annual Southern African Transport Conference 2006. **Proceedings of 25th Southern African Transport Conference**, África do Sul, 2006.

YUE Z. Q.; CHEN S.; THAM, L. G.. Finite element modeling of geomaterials using digital image processing. **Computers and Geotechnics**, v. 30, n. 5, p. 375-397, 2003.

ZHANG, L. et al.. Characterization of HMA Internal Structure analysis. **American Society of Civil Engineers**, p.1968-1975, 2008.

ZIARI, H.; DIVANDARI, H.; BEHBAHANI, H.. Developing a forecasting model for asphalt rutting potential using gyratory compactor parameters. **Life Science Journal**, v. 9, n. 4, p. 4140-4149, 2012.

APÊNDICE A - Resultados da análise da macroestrutura

Neste apêndice, são apresentados os resultados obtidos da análise da macroestrutura das misturas asfálticas, bem como o coeficiente de variação dos parâmetros em uma amostra (CV^*).

Tabela 42 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova Marshall nas seções verticais (detalhado)

CP	Imagens		Pontos de contato					Orientação dos agregados		
	Nº	Σ Área (cm ²)	Contatos ¹	Comp. (mm) ¹	θ_c (°)	DP θ_c (°)	Δc (%)	θ_k (°)	DP θ_k (°)	Δ (%)
1	4	224,99	208,6	413,9	63,2	18,3	55,2	46,2	26,2	10,2
CV*	-	-	22%	29%	10%	1%	10%	7%	2%	45%
2	4	224,99	188,0	339,6	64,9	18,8	58,1	48,7	26,2	16,5
CV*	-	-	27%	30%	6%	7%	8%	11%	6%	71%
3	4	241,30	171,6	339,8	63,9	19,6	54,2	50,1	26,0	15,2
CV*	-	-	23%	29%	13%	9%	18%	4%	3%	36%
4	4	241,30	150,0	271,9	62,6	19,4	52,0	48,0	27,4	13,3
CV*	-	-	17%	41%	4%	6%	2%	7%	4%	48%
5	4	223,83	170,3	295,5	63,6	19,0	54,4	48,0	24,7	10,6
CV*	-	-	20%	22%	4%	6%	5%	4%	5%	40%
6	4	223,83	176,7	311,1	62,4	20,1	51,6	48,6	26,5	14,6
CV*	-	-	16%	18%	5%	14%	13%	8%	6%	63%
7	4	226,93	153,3	280,4	63,5	18,9	55,3	45,7	26,1	10,3
CV*	-	-	17%	21%	7%	7%	5%	5%	7%	38%
8	4	226,93	175,3	342,1	64,1	19,2	55,7	50,3	25,9	14,6
CV*	-	-	27%	34%	9%	2%	8%	6%	2%	57%

(Continua)

9	4	219,25	259,4	585,8	64,3	18,6	58,2	50,0	26,4	13,8
CV*	-	-	16%	37%	8%	3%	10%	4%	3%	41%
10	4	219,25	284,3	652,0	65,3	18,8	61,9	50,9	26,6	16,9
CV*	-	-	26%	33%	8%	6%	7%	5%	2%	33%
11	4	206,41	234,9	522,6	64,4	19,3	58,8	48,7	26,9	11,4
CV*	-	-	22%	15%	7%	7%	6%	5%	2%	62%
12	4	206,41	233,6	516,8	63,5	18,7	59,9	46,9	26,3	11,8
CV*	-	-	15%	25%	4%	4%	4%	5%	4%	50%
13	4	215,36	255,9	544,9	64,9	18,3	61,1	50,7	26,0	17,2
CV*	-	-	12%	28%	8%	3%	9%	5%	9%	38%
14	4	215,36	274,5	686,2	65,5	18,0	61,6	50,7	27,2	16,6
CV*	-	-	19%	28%	4%	4%	4%	1%	3%	5%
15	4	214,37	226,7	492,8	66,1	18,4	61,7	49,7	24,9	14,4
CV*	-	-	31%	32%	9%	3%	4%	5%	3%	47%
16	4	214,37	287,3	706,0	65,2	18,1	61,3	49,9	26,4	16,3
CV*	-	-	14%	19%	6%	5%	6%	3%	6%	17%

Nota: ¹ Número de contatos e comprimento (mm) por 100 cm².

Fonte: Autoria própria.

Tabela 43 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova do CGS nas seções verticais (detalhado)

CP	α (°)	Imagens		Pontos de contato					Orientação dos agregados		
		N°	Σ Área (cm ²)	Contatos ¹	Comp. (mm) ¹	θc (°)	DP θc (°)	Δc (%)	θk (°)	DP θk (°)	Δ (%)
5	0,75	6	925,39	199	367,1	64,4	19,1	56,6	52,7	25,0	20,9
CV*	-	-	-	20%	29%	3%	4%	4%	5%	3%	33%
1	0,75	6	925,39	221	424,9	64,5	18,1	56,6	51,1	26,3	17,5
CV*	-	-	-	12%	10%	5%	5%	5%	4%	3%	30%
14	1,00	6	913,59	299	796,3	66,0	17,4	61,5	50,6	26,2	16,4
CV*	-	-	-	10%	13%	3%	4%	2%	5%	3%	43%
11	1,00	6	913,59	253	491,9	64,6	18,3	57,1	51,3	25,5	18,0
CV*	-	-	-	12%	15%	4%	3%	4%	2%	3%	26%
24	1,25	6	908,81	229	401,5	63,6	19,3	54,0	49,7	26,1	14,7
CV*	-	-	-	12%	15%	6%	2%	7%	4%	3%	39%
26	1,25	6	908,81	211	361,4	63,6	18,8	53,8	52,8	25,5	22,0
CV*	-	-	-	22%	22%	5%	5%	4%	4%	3%	26%
35	1,50	6	914,70	308	712,7	65,0	18,3	59,4	51,1	26,1	18,1
CV*	-	-	-	6%	11%	4%	2%	4%	4%	1%	24%
32	1,50	6	914,70	253	449,3	63,4	19,4	53,2	49,9	25,8	14,5
CV*	-	-	-	13%	16%	2%	3%	3%	4%	2%	39%

(Continua)

45	1,75	6	914,79	224	395,6	63,2	18,9	53,8	49,9	26,8	13,8
CV*	-	-	-	17%	15%	3%	2%	5%	5%	1%	48%
46	1,75	6	914,79	315	695,7	65,1	18,0	58,7	49,7	26,4	14,0
CV*	-	-	-	11%	15%	2%	3%	3%	3%	2%	22%

Nota: ¹ Número de contatos e comprimento (mm) por 100 cm².

Fonte: Autoria própria.

Tabela 44 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova da mesa compactadora nas seções verticais (detalhado)

CP	Corte	Imagens		Pontos de contato					Orientação dos agregados		
		Nº	ΣÁrea (cm ²)	Contatos ¹	Comp. (mm) ¹	θc (°)	DP θc (°)	Δc (%)	θk (°)	DP θk (°)	Δ (%)
1 A	CVT	8	1473,69	369	935,9	66,1	17,7	63,2	52,7	25,5	21,8
CV*	-	-	-	15%	22%	6%	5%	6%	4%	4%	24%
1 C	CVL	8	1473,69	412	1031,8	66,6	17,4	64,7	52,1	25,8	20,2
CV*	-	-	-	16%	26%	5%	4%	6%	5%	3%	30%
2 J	CVT	8	1479,07	405	1082,7	66,7	17,5	65,7	52,3	25,4	20,6
CV*	-	-	-	12%	12%	4%	3%	3%	4%	4%	27%
2 L	CVL	8	1479,07	400	1070,5	66,4	17,7	65,6	51,4	26,0	18,5
CV*	-	-	-	24%	38%	6%	5%	7%	3%	2%	24%

Nota: ¹ Número de contatos e comprimento (mm) por 100 cm².

Fonte: Autoria própria.

Tabela 45 - Parâmetros da macroestrutura das amostras do trecho experimental nas seções verticais (detalhado)

CP	Corte	Imagens		Pontos de contato					Orientação dos agregados		
		Nº	∑Área (cm²)	Contatos ¹	Comp. (mm) ¹	θc (°)	DP θc (°)	Δc (%)	θk (°)	DP θk (°)	Δ (%)
1ª camada	CVL	15	2383,00	171	366,3	63,8	30,3	56,5	51,7	25,7	19,7
	CV*	-	-	29%	40%	5%	5%	9%	4%	4%	31%
	CVT	15	2383,00	206	427,5	64,7	18,7	58,1	52,1	26,1	19,8
	CV*	-	-	22%	33%	4%	5%	6%	3%	2%	19%
2ª camada	CVL	15	2203,40	189	402,6	64,1	18,8	56,0	50,5	26,1	16,8
	CV*	-	-	25%	37%	6%	5%	8%	4%	3%	37%
	CVT	15	2203,40	154	256,4	63,0	19,6	52,5	52,5	25,6	23,5
	CV*	-	-	28%	42%	4%	5%	7%	3%	2%	20%

Nota: ¹ Número de contatos e comprimento (mm) por 100 cm².

Fonte: Autoria própria.

Tabela 46 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova Marshall nas seções horizontais (detalhado)

CP	Imagens		Pontos de contato			Orientação dos agregados				
	Nº	Σ Área (cm ²)	Contatos ¹	Comp. (mm) ¹	Δc (%)	θr (°)	DP θr (°)	θk (°)	DP θk (°)	Δ (%)
17	6	463,38	247	445,9	52,6	49,0	26,2	44,5	25,1	7,8
CV*	-	-	15%	21%	8%	3%	3%	6%	5%	74%
18	6	456,24	256	470,1	54,3	46,9	26,7	47,0	25,7	9,6
CV*	-	-	15%	9%	14%	6%	3%	5%	4%	41%
19	6	458,11	225	412,8	53,0	48,3	27,4	45,5	25,8	7,2
CV*	-	-	30%	23%	8%	4%	3%	7%	5%	64%
20	6	456,76	209	382,9	55,7	46,7	27,4	46,6	25,1	10,0
CV*	-	-	32%	39%	9%	6%	3%	6%	3%	32%
21	6	457,40	194	343,2	50,4	49,5	26,7	44,4	25,3	5,7
CV*	-	-	25%	26%	9%	5%	6%	2%	3%	37%
22	6	456,89	196	363,0	53,0	48,3	26,6	45,0	26,2	5,3
CV*	-	-	12%	13%	10%	5%	4%	3%	3%	38%
23	6	464,78	299	774,4	59,9	46,8	26,0	44,3	26,1	7,9
CV*	-	-	30%	53%	12%	8%	4%	6%	5%	39%
24	6	465,82	256	618,9	57,8	48,7	26,5	46,9	26,2	10,8
CV*	-	-	19%	23%	6%	6%	4%	6%	2%	62%

(Continua)

25	6	465,04	289	699,7	58,5	47,5	26,4	45,9	25,7	10,7
CV*	-	-	13%	23%	5%	6%	5%	7%	4%	69%
26	6	457,98	229	501,1	52,4	47,8	26,6	43,2	26,5	9,4
CV*	-	-	27%	20%	11%	6%	4%	6%	4%	54%
27	6	459,08	218	430,3	53,7	49,1	26,5	45,7	25,6	8,4
CV*	-	-	20%	22%	11%	4%	5%	5%	6%	34%

Nota: ¹ Número de contatos e comprimento (mm) por 100 cm².

Fonte: Autoria própria.

Tabela 47 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova do CGS nas seções horizontais (detalhado)

CP	α (°)	Imagens		Pontos de contato			Orientação dos agregados				
		N°	Σ Área (cm ²)	Contatos ¹	Comp. (mm) ¹	Δc (%)	θr (°)	DP θr (°)	θk (°)	DP θk (°)	Δ (%)
3	0,75	10	1749,32	174	294,6	49,0	47,3	26,3	46,5	25,4	7,5
CV*	-	-	-	20%	17%	6%	5%	2%	6%	2%	52%
6	0,75	10	1749,64	251	478,4	51,6	46,4	26,7	44,5	25,8	5,3
CV*	-	-	-	10%	9%	3%	4%	2%	2%	2%	41%
12	1,00	10	1743,08	232	452,9	50,9	47,8	26,2	45,2	26,0	7,2
CV*	-	-	-	19%	26%	9%	3%	3%	5%	2%	45%

(Continua)

15	1,00	10	1757,46	165	284,1	46,5	48,4	26,3	44,9	26,3	6,4
CV*	-	-	-	25%	25%	7%	5%	3%	4%	5%	76%
23	1,25	10	1759,22	247	498,5	53,1	47,3	26,5	46,0	25,8	7,1
CV*	-	-	-	14%	19%	4%	3%	4%	4%	3%	51%
24	1,25	10	1763,83	193	339,6	48,8	46,9	25,9	45,6	25,5	5,7
CV*	-	-	-	30%	28%	5%	5%	2%	3%	2%	78%
34	1,50	10	1759,23	241	449,2	50,6	47,3	26,5	44,9	25,6	5,5
CV*	-	-	-	26%	31%	8%	4%	1%	4%	3%	53%
36	1,50	10	1752,37	203	345,4	48,9	47,1	27,2	45,3	25,9	6,1
CV*	-	-	-	21%	23%	8%	4%	3%	3%	3%	43%
42	1,75	10	1749,03	207	396,6	49,6	47,1	26,3	45,8	26,2	5,9
CV*	-	-	-	22%	27%	8%	5%	3%	5%	4%	84%
43	1,75	10	1750,98	181	298,3	48,5	47,1	27,0	45,1	26,2	5,7
CV*	-	-	-	24%	30%	4%	3%	2%	4%	2%	45%

Nota: ¹ Número de contatos e comprimento (mm) por 100 cm².

Fonte: Autoria própria.

Tabela 48 - Parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova da mesa compactadora nas seções horizontais (detalhado)

Amostra	Imagens		Pontos de contato					Orientação dos agregados		
	Nº	\sum Área (cm ²)	Contatos ¹	Comp. (mm) ¹	θ_c (°)	DP θ_c (°)	Δc (%)	θ_k (°)	DP θ_k (°)	Δ (%)
1 B	6	1566,81	417	1040,6	61,7	45,7	26,3	46,4	26,2	6,2
CV*	-	-	12%	18%	5%	4%	1%	5%	1%	77%
2 K	6	1628,06	364	853,4	58,6	47,3	25,9	44,9	25,9	4,3
CV*	-	-	18%	37%	9%	2%	1%	3%	1%	59%

Nota: ¹ Número de contatos e comprimento (mm) por 100 cm².

Fonte: Autoria própria.

Tabela 49 - Parâmetros da macroestrutura das amostras do trecho experimental nas seções horizontais (detalhado)

Amostra	Imagens		Pontos de contato					Orientação dos agregados		
	Nº	\sum Área (cm ²)	Contatos ¹	Comp. (mm) ¹	θ_c (°)	DP θ_c (°)	Δc (%)	θ_k (°)	DP θ_k (°)	Δ (%)
2	12	922,40	187	310,1	48,8	47,4	26,9	45,1	25,4	9,9
CV*	-	-	26%	25%	6%	6%	2%	6%	3%	51%
3	12	911,71	277	574,0	54,0	48,5	26,1	46,1	25,5	7,4
CV*	-	-	25%	30%	5%	5%	3%	5%	4%	75%

(Continua)

4	12	933,02	198	383,8	48,8	47,9	26,2	45,0	24,9	10,2
CV*	-	-	24%	23%	8%	5%	4%	6%	5%	66%
5	12	931,46	225	459,5	53,3	48,6	26,4	45,0	25,6	8,9
CV*	-	-	37%	36%	8%	5%	3%	5%	4%	40%
6	12	915,28	247	469,7	50,8	47,5	26,7	45,6	25,8	8,9
CV*	-	-	14%	16%	9%	5%	4%	4%	3%	66%
7	12	922,63	187	362,1	50,7	48,6	26,7	44,6	26,0	11,2
CV*	-	-	29%	33%	8%	4%	3%	7%	3%	49%
8	12	938,43	180	332,8	49,3	49,3	26,5	44,4	25,7	7,9
CV*	-	-	24%	18%	8%	5%	4%	6%	4%	47%
11	12	926,71	199	357,1	48,5	48,8	26,7	43,9	25,3	9,2
CV*	-	-	19%	21%	10%	5%	3%	6%	3%	61%
15	12	920,44	252	482,5	53,5	47,7	26,7	44,5	25,5	10,3
CV*	-	-	18%	27%	9%	4%	5%	6%	4%	49%

Nota: ¹ Número de contatos e comprimento (mm) por 100 cm².

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE B – Análise estatística dos resultados

A fim de verificar se existe diferença significativa dos parâmetros da macroestrutura nas seções verticais e horizontais dos corpos de prova Marshall, foram realizados: o teste de Kolmogorov-Smirnov (para verificar a normalidade); a verificação da existência de valores espúrios e; a prova de hipótese a respeito de duas médias (seções verticais e seções horizontais) com desvios padrões conhecidos.

Para provar a normalidade optou-se por utilizar a prova Kolmogorov-Smirnov que consiste na comparação das frequências acumuladas observadas e as calculadas pela distribuição normal. Para cada valor “ i ” calcula-se:

- A frequência acumulada relativa observada para o valor ordenado x_i ;
- O valor z_i na distribuição normal padronizada, correspondente a cada x_i ;
- A frequência acumulada relativa teórica;
- A diferença, para cada i , entre as frequências acumulada relativas teórica e observada.

A verificação da existência de valores espúrios é feita calculando-se o resíduo de cada valor x_i , conforme a Equação 12.

$$r_i = \frac{x_i - \bar{x}}{S} \quad (11)$$

Onde: r_i é o resíduo do valor x_i ; x_i é o valor i analisado; \bar{x} é a média da amostra e; S é o desvio-padrão da amostra.

Se o valor do resíduo r_i for menor do que um valor fixado pela “Tabela de valores críticos para a distribuição t ”, o valor x_i não é espúrio.

Uma vez que não se pode rejeitar a hipótese da normalidade dos resultados, foi realizada a prova de hipótese a respeito de duas médias (seções verticais e seções horizontais) com desvios padrões conhecidos. O valor de Z é calculado de acordo com a Equação 12.

$$Z = \frac{|\bar{x} - \bar{y}|}{\sqrt{\frac{\sigma_x^2}{n_x} + \frac{\sigma_y^2}{n_y}}} \quad (12)$$

Onde: Z é o valor a ser comparado com o valor tabelado; \bar{x} e \bar{y} são as médias das amostras; n_x e n_y são o número de elementos das amostras; σ_x e σ_y são os desvios-padrões das amostras.

Se Z for maior do que o valor $Z_{\alpha/2}$ tabelado, a hipótese da igualdade de médias é rejeitada.

Este procedimento de cálculo foi realizado para a análise dos resultados dos parâmetros da macroestrutura dos corpos de prova Marshall: ângulo de orientação dos agregados; vetor magnitude dos agregados e; vetor magnitude dos contatos.

Ângulo de orientação dos agregados

A Tabela 50 apresenta o teste de normalidade e verificação de espúrios para o ângulo de orientação dos agregados das seções horizontais.

Tabela 50 – Teste de normalidade e verificação de espúrios θ_k (seções horizontais)

i	x_i	z_i	$P(x < x_i)$	i/N	$ Diferença $	$Residuo$
1	43,2	-1,790	0,0367	0,09	0,0542	1,790
2	44,3	-0,880	0,1894	0,18	0,0076	0,880
3	44,4	-0,797	0,2126	0,27	0,0601	0,797
4	44,5	-0,715	0,2374	0,36	0,1262	0,715
5	45	-0,301	0,3817	0,45	0,0728	0,301
6	45,5	0,113	0,5449	0,55	0,0005	0,113
7	45,7	0,278	0,6096	0,64	0,0267	0,278
8	45,9	0,444	0,6714	0,73	0,0559	0,444
9	46,6	1,023	0,8469	0,82	0,0287	1,023
10	46,9	1,271	0,8982	0,91	0,0109	1,271
11	47	1,354	0,9121	1,00	0,0879	1,354

Fonte: Autoria própria.

Como 0,1262 é menor do que 0,249 (valor tabelado), não pode ser rejeitada a hipótese da normalidade com confiabilidade de 95% (alfa

igual a 0,05). E, o maior residuo (1,790) menor do que 2,23 (valor tabelado) indica que não há valores espúrios na amostra.

A Tabela 51 apresenta o teste de normalidade e verificação de espúrios para o ângulo de orientação dos agregados das seções verticais.

Tabela 51 – Teste de normalidade e verificação de espúrios θ_k (seções verticais)

i	x_i	z_i	$P(x < x_i)$	i/N	Diferença	Resíduo
1	45,7	-1,986	0,0235	0,06	0,0390	1,986
2	46,2	-1,680	0,0465	0,13	0,0785	1,680
3	46,9	-1,251	0,1054	0,19	0,0821	1,251
4	48	-0,578	0,2817	0,25	0,0317	0,578
5	48	-0,578	0,2817	0,31	0,0308	0,578
6	48,6	-0,210	0,4167	0,38	0,0417	0,210
7	48,7	-0,149	0,4407	0,44	0,0032	0,149
8	48,7	-0,149	0,4407	0,50	0,0593	0,149
9	49,7	0,463	0,6783	0,56	0,1158	0,463
10	49,9	0,585	0,7209	0,63	0,0959	0,585
11	50	0,647	0,7411	0,69	0,0536	0,647
12	50,1	0,708	0,7605	0,75	0,0105	0,708
13	50,3	0,830	0,7968	0,81	0,0157	0,830
14	50,7	1,075	0,8589	0,88	0,0161	1,075
15	50,7	1,075	0,8589	0,94	0,0786	1,075
16	50,9	1,198	0,8845	1,00	0,1155	1,198

Fonte: Autoria própria.

Como 0,1158 é menor do que 0,213 (valor tabelado), não pode ser rejeitada a hipótese da normalidade com confiabilidade de 95% (alfa igual a 0,05). E, o maior residuo (1,986) menor do que 2,44 (valor tabelado) indica que não há valores espúrios na amostra.

Calculado o valor Z com as amostras das seções horizontais tem-se que: com uma confiabilidade em torno de 100% (alfa igual a $6,07 \times 10^{-11}$), os ângulos de orientação horizontal dos agregados (θ_k) são diferentes nas seções horizontais e verticais.

Vetor magnitude dos agregados

A Tabela 52 apresenta o teste de normalidade e verificação de espúrios para o vetor magnitude dos agregados das seções horizontais.

Tabela 52 – Teste de normalidade e verificação de espúrios Δ (seções horizontais)

<i>I</i>	<i>x_i</i>	<i>z_i</i>	<i>P(x < x_i)</i>	<i>i/N</i>	<i> Diferença </i>	<i>Resíduo</i>
1	5,3	-1,677	0,0468	0,09	0,0441	1,677
2	5,7	-1,463	0,0717	0,18	0,1101	1,463
3	7,2	-0,661	0,2543	0,27	0,0184	0,661
4	7,8	-0,340	0,3668	0,36	0,0032	0,340
5	7,9	-0,287	0,3871	0,45	0,0674	0,287
6	8,4	-0,019	0,4922	0,55	0,0532	0,019
7	9,4	0,515	0,6968	0,64	0,0604	0,515
8	9,6	0,622	0,7331	0,73	0,0058	0,622
9	10	0,836	0,7984	0,82	0,0198	0,836
10	10,7	1,210	0,8869	0,91	0,0222	1,210
11	10,8	1,264	0,8968	1,00	0,1032	1,264

Fonte: Autoria própria.

Como 0,1101 é menor do que 0,249 (valor tabelado), não pode ser rejeitada a hipótese da normalidade com confiabilidade de 95% (alfa igual a 0,05). E, o maior resíduo (1,677) menor do que 2,23 (valor tabelado) indica que não há valores espúrios na amostra.

A Tabela 53 apresenta o teste de normalidade e verificação de espúrios para o ângulo de orientação dos agregados das seções verticais.

Como 0,1245 é menor do que 0,213 (valor tabelado), não pode ser rejeitada a hipótese da normalidade com confiabilidade de 95% (alfa igual a 0,05). E, o maior resíduo (1,534) menor do que 2,44 (valor tabelado) indica que não há valores espúrios na amostra.

Tabela 53 – Teste de normalidade e verificação de espúrios Δ (seções verticais)

I	x_i	z_i	$P(x < x_i)$	i/N	$ Diferença $	$Resíduo$
1	10,2	-1,534	0,0625	0,06	0,0000	1,534
2	10,3	-1,494	0,0676	0,13	0,0574	1,494
3	10,6	-1,372	0,0850	0,19	0,1025	1,372
4	11,4	-1,047	0,1474	0,25	0,1026	1,047
5	11,8	-0,885	0,1880	0,31	0,1245	0,885
6	13,3	-0,276	0,3911	0,38	0,0161	0,276
7	13,8	-0,074	0,4707	0,44	0,0332	0,074
8	14,4	0,170	0,5675	0,50	0,0675	0,170
9	14,6	0,251	0,5991	0,56	0,0366	0,251
10	14,6	0,251	0,5991	0,63	0,0259	0,251
11	15,2	0,495	0,6896	0,69	0,0021	0,495
12	16,3	0,941	0,8266	0,75	0,0766	0,941
13	16,5	1,022	0,8466	0,81	0,0341	1,022
14	16,6	1,063	0,8560	0,88	0,0190	1,063
15	16,9	1,184	0,8819	0,94	0,0556	1,184
16	17,2	1,306	0,9043	1,00	0,0957	1,306

Fonte: Autoria própria.

Calculado o valor Z com as amostras das seções horizontais tem-se que: com uma confiabilidade em torno de 100% (alfa igual a $3,16 \times 10^{-11}$), os vetores magnitude dos agregados (Δ) são diferentes nas seções horizontais e verticais.

Vetor magnitude dos contatos

A Tabela 54 apresenta o teste de normalidade e verificação de espúrios para os vetores magnitude dos contatos das seções horizontais.

Tabela 54 – Teste de normalidade e verificação de espúrios Δc (seções horizontais)

i	x_i	z_i	$P(x < x_i)$	i/N	$ Diferença $	$Resíduo$
1	50,4	-1,444	0,0744	0,09	0,0165	1,444
2	52,4	-0,767	0,2217	0,18	0,0399	0,767
3	52,6	-0,699	0,2423	0,27	0,0304	0,699
4	53	-0,563	0,2866	0,36	0,0770	0,563
5	53	-0,563	0,2866	0,45	0,1680	0,563
6	53,7	-0,326	0,3721	0,55	0,1734	0,326
7	54,3	-0,123	0,4510	0,64	0,1854	0,123
8	55,7	0,351	0,6372	0,73	0,0901	0,351
9	57,8	1,062	0,8559	0,82	0,0377	1,062
10	58,5	1,299	0,9030	0,91	0,0060	1,299
11	59,9	1,773	0,9619	1,00	0,0381	1,773

Fonte: Autoria própria.

Como 0,1854 é menor do que 0,249 (valor tabelado), não pode ser rejeitada a hipótese da normalidade com confiabilidade de 95% (alfa igual a 0,05). E, o maior resíduo (1,444) menor do que 2,23 (valor tabelado) indica que não há valores espúrios na amostra.

A Tabela 55 apresenta o teste de normalidade e verificação de espúrios para os vetores magnitude dos contatos das seções verticais.

Como 0,1379 é menor do que 0,213 (valor tabelado), não pode ser rejeitada a hipótese da normalidade com confiabilidade de 95% (alfa igual a 0,05). E, o maior resíduo (1,683) menor do que 2,44 (valor tabelado) indica que não há valores espúrios na amostra.

Tabela 55 – Teste de normalidade e verificação de espúrios Δc (seções verticais)

<i>i</i>	<i>x_i</i>	<i>z_i</i>	$P(x < x_i)$	<i>i/N</i>	Diferença	Resíduo
1	51,6	-1,683	0,0462	0,06	0,0163	1,683
2	52	-1,570	0,0582	0,13	0,0668	1,570
3	54,2	-0,949	0,1714	0,19	0,0161	0,949
4	54,4	-0,892	0,1861	0,25	0,0639	0,892
5	55,2	-0,667	0,2525	0,31	0,0600	0,667
6	55,3	-0,638	0,2616	0,38	0,1134	0,638
7	55,7	-0,526	0,2996	0,44	0,1379	0,526
8	58,1	0,152	0,5603	0,50	0,0603	0,152
9	58,2	0,180	0,5714	0,56	0,0089	0,180
10	58,8	0,349	0,6365	0,63	0,0115	0,349
11	59,9	0,660	0,7452	0,69	0,0577	0,660
12	61,1	0,998	0,8409	0,75	0,0909	0,998
13	61,3	1,055	0,8542	0,81	0,0417	1,055
14	61,6	1,139	0,8727	0,88	0,0023	1,139
15	61,7	1,168	0,8785	0,94	0,0590	1,168
16	61,9	1,224	0,8895	1,00	0,1105	1,224

Fonte: Autoria própria.

Calculado o valor *Z* com as amostras das seções horizontais tem-se que: com uma confiabilidade de 98% (alfa igual a $2,01 \times 10^{-2}$), os vetores magnitude dos contatos (Δc) são diferentes nas seções horizontais e verticais.