26º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR)
49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

ANÁLISE DA DENSIFICAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS NO COMPACTADOR GIRATÓRIO SUPERPAVE EM FUNÇÃO DA CURVA GRANULOMÉTRICA E DA ESPESSURA DA CAMADA

Douglas Antônio Thiel[1]; Allan Monteiro Silva[1]; Ana Carolina Ostrovski[1] e Andreia Raffler[1]

RESUMO
As misturas de concreto asfáltico usinado a quente são amplamente utilizadas no Brasil para a construção de pavimentos. Para a execução destes revestimentos, normas consagradas limitam a espessura das camadas em função do tamanho nominal máximo (TNM) das curvas granulométricas das misturas. O principal objetivo destas restrições é evitar problemas de compactação em campo. Os baixos níveis de compactação das misturas em função do elevado volume de vazios pode gerar defeitos precoces nos pavimentos, como fadiga e deformação permanente. Para efeitos de análise do comportamento de densificação das misturas, o Departamento Nacional de Infraestrutura em Transportes (DNIT) publicou a norma 426/2020, na qual se utiliza o compactador giratório Superpave para monitorar o ganho de densidade de misturas asfálticas. Muito embora estudos já tenham sido conduzidos na busca de correlacionar parâmetros de densificação com o surgimento de defeitos precoces nos pavimentos, carecem investigações acerca do comportamento de densificação das misturas asfálticas em função da granulometria e do TNM. Assim, o objetivo desta pesquisa é avaliar como as misturas asfálticas se densificam em função da curva granulométrica, do TNM e da espessura da camada. Para isso, amostras foram submetidas à compactação no compactador giratório Superpave até o número de giros de 250. Avaliou-se a densificação por meio do percentual da densidade máxima medida atingida em cada giro. Observou-se que o tanto o TNM quanto a granulometria da mistura exercem influência no comportamento de densificação. Notou-se também que as especificações de espessura analisadas se mostraram insuficientes para garantir os parâmetros volumétricos esperados para a mistura.

PALAVRAS-CHAVE: misturas asfálticas; granulometria; densificação.

ABSTRACT
Hot asphalt concrete mixtures are widely used in Brazil for of asphalt pavements construction. To build pavements, important standards limit the thickness of the layers depending of nominal maximum aggregate size (NMAS), and mixtures' size distribuiton. The main objective of these restrictions is to avoid site compaction problems. The low compaction levels of mixtures due to high void volumes can generate early defects in the pavements, such as fatigue cracking and rutting. For the purposes of analyzing the densification behavior of mixtures, the National Department of Transport Infrastructure (DNIT) published standard 426/2020, in which the Superpave giratory compactor is used to predict the density gain of asphalt mixtures. Although studies have already been conducted aiming to correlate densification parameters with the appearance of early defects in pavements, there is a lack of investigation into the densification behavior of asphalt mixtures as a function of granulometry and NMAS. Therefore, the objective of this research is to evaluate asphalt mixtures densify depending on the particle size distribution, NMAS and layer thickness. For that, samples were subjected to compaction in the Superpave giratory compactor until the number of 250 gyrations. Densification was evaluated using the percentage of the maximum measured density reached in each gyration. It was observed that NMAS and the particle size distribution of the mixture influence the densification behavior. It was also noted that the thickness specifications analyzed proved to be insufficient to guarantee the volumetric parameters expected for mixtures.

KEY WORDS: asphalt mixture; size distribution; densification.

[1] E-Vias Tecnologia em Infraestrutura Viária Ltda., e-mail: douglas.thiel@e-vias.com.br; allan@e-vias.com.br; ana.ostrovski@e-vias.com.br; andreia.raffler@gmail.com.

INTRODUÇÃO

As rodovias brasileiras são predominantemente pavimentadas com revestimento de concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ). O CAUQ é um composto de ligante e agregados pétreos, este último respondendo por mais de 90% do volume total da mistura. Neste composto, podem ser adicionados materiais de *filler*, como cal, e melhoradores de adesividade, *e.g.*. Na mistura asfáltica, o ligante é responsável pelo envolvimento das partículas de agregados, ao passo que o agregado é responsável por conferir a resistência às tensões de compressão pelos veículos, provendo o esqueleto mineral da mistura (BERNUCCI *et al.*, 2022; GOUVEIA; FERNANDES JR.; SOARES, 2007).

A conformação da estrutura interna da mistura se dá por meio do processo de compactação. Ao longo da compactação, reduzem-se os vazios a fim de constituir uma adequada interação entre as partículas de agregado. A formação deste esqueleto depende de fatores como energia de compactação aplicada, temperatura, proporção de materiais e de propriedades do agregado, como forma, angularidade e textura, além da granulometria (GOUVEIA; FERNANDES JR.; SOARES, 2007).

Em termos de compactação em campo, algumas especificações técnicas consagradas no país têm se preocupado com a capacidade de se atingir os parâmetros volumétricos de projeto em função do tamanho máximo do agregado. Para tanto, toma-se a definição da norma DNIT 412/2019-ME (DNIT, 2019), na qual o tamanho nominal máximo (TNM) é o tamanho da abertura da peneira imediatamente acima daquela que retém mais que 10% acumulado da distribuição granulométrica.

Com base no TNM, as especificações de execução da mistura asfáltica em campo estipulam a espessura mínima que determinada camada deve ter em função deste parâmetro. As especificações DNIT 031/2006-ES (DNIT, 2006) e DER/PR ES-PA 21/23 (DER-PR, 2023) limitam o TNM a 2/3 da espessura da camada. Já especificações de concessionárias, como Arteris ES 027 (ARTERIS, 2022) define que a espessura da camada compactada deve ser maior que 2,5 vezes o TNM.

Ao se analisar a especificação MS-2 do Asphalt Institute (2014), registra-se uma restrição ainda maior em relação à espessura das camadas de revestimento asfáltico, recomendando espessura mínima da camada de misturas asfálticas densas igual a quatro vezes o TNM. Ainda, o mesmo manual indica que espessuras de até duas vezes o TNM podem apresentar performance diminuída. De comum acordo, pode-se verificar que as especificações nacionais e estrangeiras buscam garantir que a compactação do CAUQ seja satisfatória.

Para verificação do comportamento de densificação de misturas asfálticas pode-se utilizar o compactador giratório Superpave (CGS), considerando-se variáveis como a granulometria da mistura e diferentes espessuras da amostra. Além disso, o CGS é um bom indicativo do comportamento de densificação da mistura em campo uma vez que o processo de compactação se dá por amassamento, simulando o rolo compactador no processo de execução do revestimento (RIBAS; THIVES, 2019).

No Brasil há a norma DNIT 426/2020-IE (DNIT, 2020), que prevê a obtenção de dois parâmetros de densificação por meio do CGS, denominados de índice de densificação por compactação (CDI) e índice de densificação pelo tráfego (TDI). O CDI está relacionado a energia necessária para compactar a mistura asfáltica em campo durante o processo de execução, tendo vinculação com a obtenção de 92% da densidade máxima medida da mistura (*Gmm*). Já o TDI é correspondente ao processo de tráfego dos veículos após a entrega da obra, correlato aos 98% da *Gmm* (DNIT, 2020).

A avaliação dos parâmetros de compactação da mistura asfáltica foi investigada por Nascimento

(2008), Guimarães *et al*. (2022), Onofre *et al*. (2011) e Soares (2014), no objetivo de estipular correlação entre a compactação da mistura e a deformação permanente. Todavia, carecem estudos que visem analisar a influência da granulometria e da espessura das camadas de CAUQ no comportamento de densificação da mistura. A adoção dos parâmetros de 92 e 98% da *Gmm* podem servir de indicativo para a análise do comportamento de densificação da mistura em função do número de ciclos.

Ainda, as restrições de espessura em função do TNM necessitam ser avaliadas quanto à suscetibilidade à densificação de misturas asfálticas compostas de diferentes faixas granulométricas e da espessura da camada. Esta análise visa identificar a influência da espessura e da energia de compactação aplicada na densificação de misturas asfálticas tanto a nível de laboratório quanto de campo.

Outrossim, o objetivo do presente trabalho é verificar o comportamento de densificação de misturas asfálticas com diferentes granulometrias, avaliando-se a influência da restrição de altura de camada de revestimento imposta pelas especificações de serviço do DNIT (2006) e DER-PR (2023).

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a avaliação dos parâmetros de compactação, foram selecionadas misturas asfálticas produzidas com ligante CAP 50-70, oriundo da refinaria REPAR, localizada no município de Araucária, PR. Os agregados utilizados para a produção das misturas têm origem basáltica, provenientes de Coronel Vivida, PR, e Siqueira Campos, PR. As misturas asfálticas foram dosadas segundo a metodologia de volumetria Marshall (DNER, 1995). A escolha da metodologia de dosagem Marshall se deu pelo fato de que a maioria dos projetos brasileiros são realizados por meio deste procedimento. Fatores como facilidade de verificação dos parâmetros volumétricos em campo e dispensa de equipamentos sofisticados para elaboração de corpos de prova de checagem subsidiam esta predileção pela metodologia Marshall na elaboração dos projetos. Os resultados da dosagem, bem como as faixas granulométricas adotadas nas misturas estão apresentados na Tabela 1. A Figura 1 traz a demonstração gráfica das curvas granulométricas.

Tabela 1. Resultados volumétricos de dosagem das misturas asfálticas produzidas para o ensaio de parâmetros de compactação

Faixa granulométrica	B (DER-PR, 2023)	C (DER-PR, 2023)	C adapt. (DNIT, 2006)	C (DNIT, 2006)
TNM (mm)	19,1	19,1	12,7	19,1
Teor de ligante (%)	4,3	4,5	5,1	4,7
Vv (%)	5,0	4,2	4,7	3,9
RBV (%)	68,9	73,3	73,8	75,5
VAM (%)	16,2	15,9	18	15,9
Gmb	2,521	2,537	2,500	2,581
Gmm	2,655	2,650	2,624	2,686
MF	4,95	4,75	4,63	4,84

TNM: tamanho nominal máximo | Vv: volume de vazios | RBV: relação betume-vazios | VAM: vazios no agregado mineral | *Gmb*: massa específica aparente | *Gmm*: massa específica máxima medida | MF: módulo de finura

É possível extrair da Tabela 1 que as misturas asfálticas produzidas com faixa B DER-PR, C DER-PR e C DNIT apresentam o mesmo TNM, sendo que a faixa C DNIT adaptada à reperfilagem

possui TNM menor, de 12,7 mm. Todavia, ao se observar o módulo de finura (MF) das misturas, nota-se que a faixa B DER-PR apresenta o maior valor, sendo a faixa que contém maior percentual de agregados graúdos, seguido das faixas C DNIT e C DER-PR. A faixa C DNIT adaptada à reperfilagem, além de apresentar o menor TNM, também possui maior quantidade de partículas finas de todas as faixas comparadas, comprovado pelo menor valor de MF.

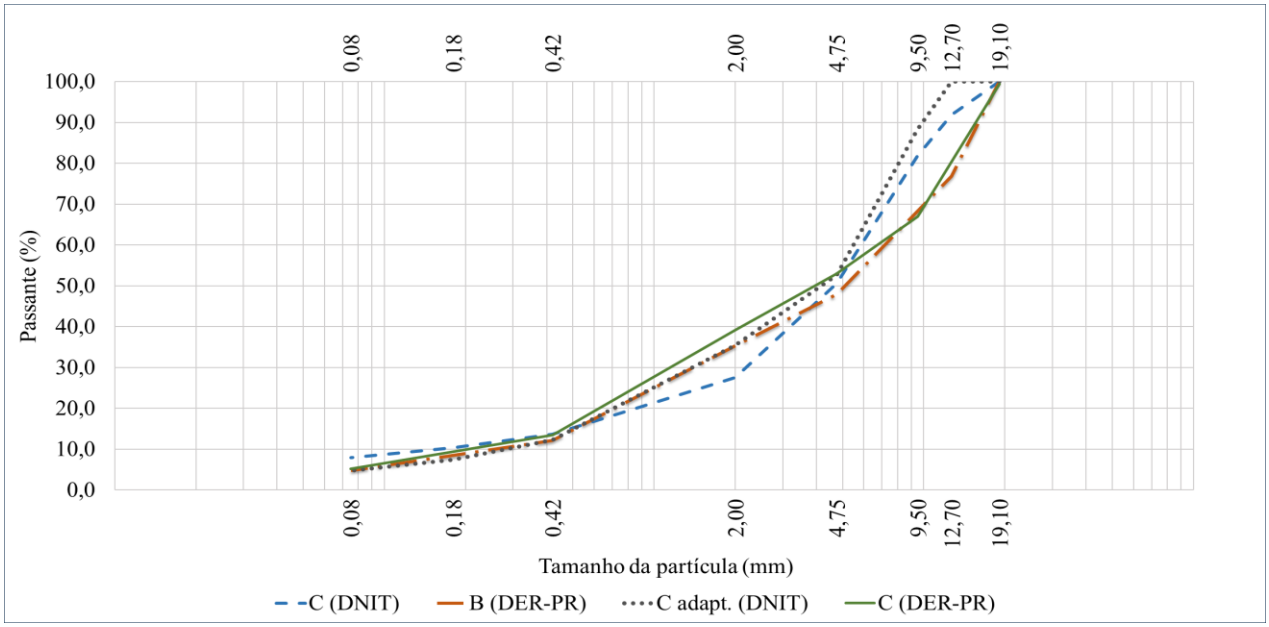

Figura 1. Curvas granulométricas do projeto de dosagem das misturas asfálticas compactadas no CGS

Para a avaliação do comportamento de densificação das misturas apresentadas na Tabela 1, foram preparadas 02 amostras por espessura para cada uma das faixas granulométricas, sendo utilizadas espessuras de 30, 50 e 70 mm (Figura 2). A massa das amostras foi determinada em função da *Gmb* oriunda do projeto de dosagem. Após o período de condicionamento em estufa em temperatura de 144°C, a mistura foi colocada no molde do CGS de diâmetro de 150 mm. Na sequência, as amostras foram inseridas no CGS para aplicação dos ciclos, com pressão de 605 kPa e ângulo de giro de 1,25°. Todas as amostras foram submetidas ao número máximo de 250 giros. A escolha de 250 como o número máximo de giros (N_{max}) se deu para promover a análise do comportamento de densificação mesmo após a ação de tráfego extremo. A condição de alto volume de tráfego é equivalente ao N_{max} = 205, conforme a norma R 35-17 (AASHTO, 2020). Por fim, obteve-se, do CGS, a altura em cada um dos giros, dos quais foi calculada a *Gmb* da amostra por giro, conforme método disposto na norma DNIT 426/2020-IE (DNIT, 2020).

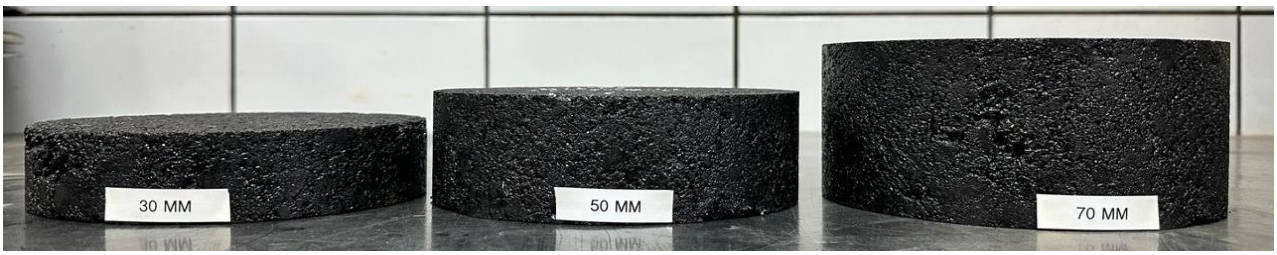

Figura 2. Exemplo de mistura asfáltica compactada no CGS com diferentes espessuras

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 3 estão apresentadas as curvas de densificação obtidas do CGS para as misturas produzidas com agregados enquadrados na Faixa B da especificação do DER-PR. É possível observar que aos 100 giros as amostras com espessura de 50 e 70 mm atingiram ao menos 92% da *Gmm*. A análise do parâmetro de *Gmm* aos 100 giros se justifica pela equivalência deste parâmetro com o número de giros de projeto para rodovias de médio a alto tráfego (BERNUCCI *et al*., 2022). Este valor tem sido adotado em trabalhos como o de Thiel (2023). Esta expectativa é corroborada pela especificação ET-DE-P00/027 (DER-SP, 2007), ao determinar grau de compactação de pista admissível em valores acima de 92% da *Gmm*.

Em sequência, ao se analisar a mesma mistura com 30 mm de espessura, verificou-se que o valor de 92% da *Gmm* não foi atingido nem aos 250 giros. Na prática, pode-se notar que a baixa espessura da amostra comprometeu a compactação da mistura a níveis exigidos de projeto. É possível que a faixa granulométrica com maior presença de agregados graúdos, comprovado pelo maior valor de MF de todas as misturas, tenha contribuído para a baixa densificação. Ainda, verifica-se que a taxa de densificação aproximou-se de nula a partir dos 175 ciclos. O esqueleto mineral formado por agregados maiores e baixo percentual de finos pode ter contribuído para os resultados colhidos, conforme sugere Hassan *et al*. (2021).

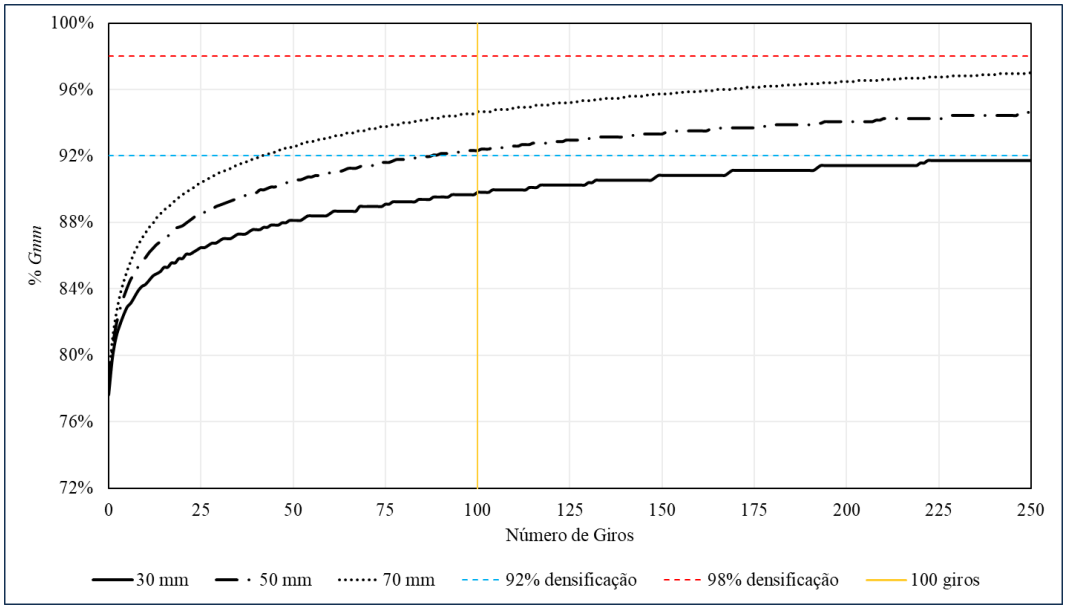

Figura 3. Curvas de densificação das amostras produzidas com agregados enquadrados na "Faixa B" DER-PR

Em análise das curvas de compactação da mistura produzida com agregados enquadrados na Faixa C da especificação DER-PR (Figura 4), é possível notar que as misturas com 50 e 70 mm de espessura atingiram 92% da *Gmm* mesmo antes de se completarem os 100 giros. A mistura com 30 mm atingiu 92% da *Gmm* próximo do fim do processo de compactação (245 giros). Em comparação à mistura da Faixa B DER-PR (Figura 3), é possível verificar que a granulometria mais fina da mistura da Faixa C DER-PR colaborou para melhor densificação das amostras com 50 e 70 mm. Entretanto, observa-se que o TNM idêntico das duas faixas pode ter contribuído para a mistura moldada com 30 mm de espessura alcançasse o volume de vazios somente com grandes esforços de

compactação, o que de modo análogo em campo seria muito difícil de se atingir, uma vez que a mistura asfáltica já teria perdido temperatura, tornando o ligante mais viscoso e menos suscetível a conformação.

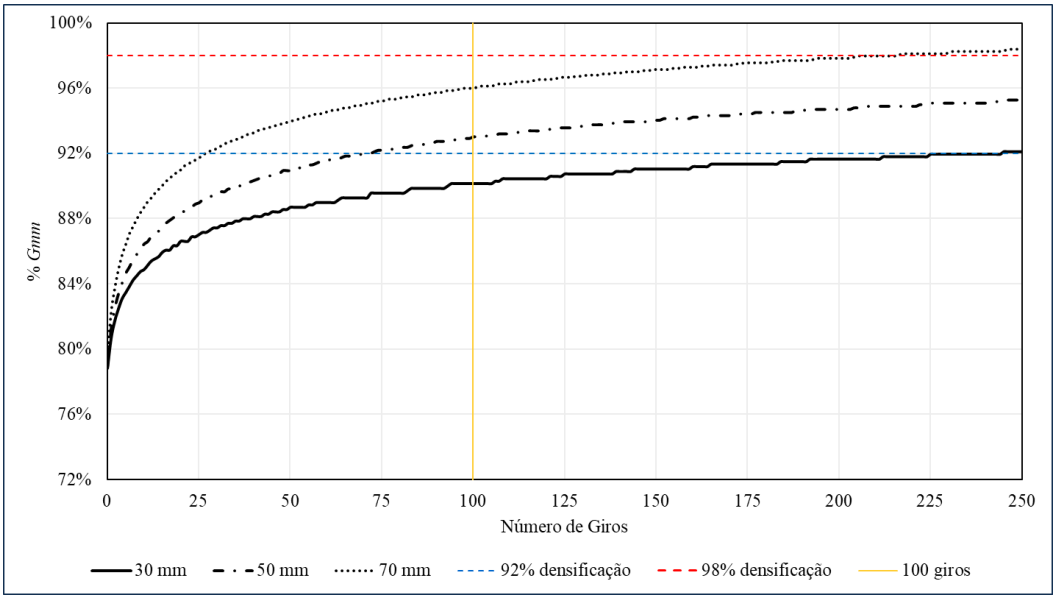

Figura 4. Curvas de densificação das amostras produzidas com agregados enquadrados na "Faixa C" DER-PR

Em última análise da Figura 4, verifica-se que somente as amostras com espessura de 70 mm atingiram 98 % da *Gmm*. Ao mesmo tempo, analisando os corpos de prova com espessura de 30 mm, verifica-se dificuldade de compactação. Em campo, esta dificuldade pode ser traduzida em baixos graus de compactação (*Gmb* < 97%), segundo os critérios da norma DNIT 031/2006-ES (DNIT, 2006).

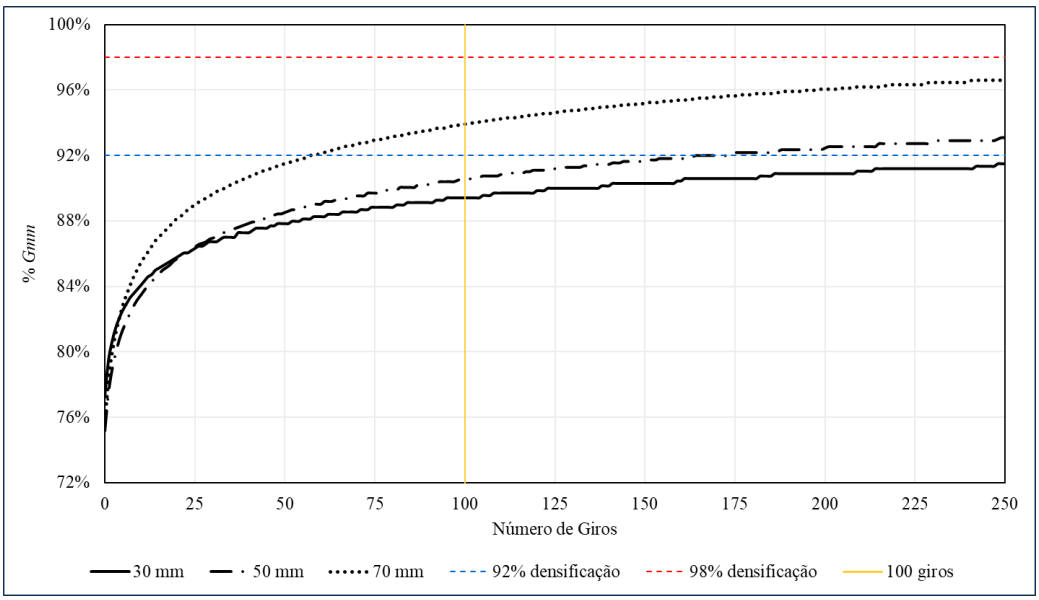

Figura 5. Curvas de densificação das amostras produzidas com agregados enquadrados na "Faixa C" DNIT

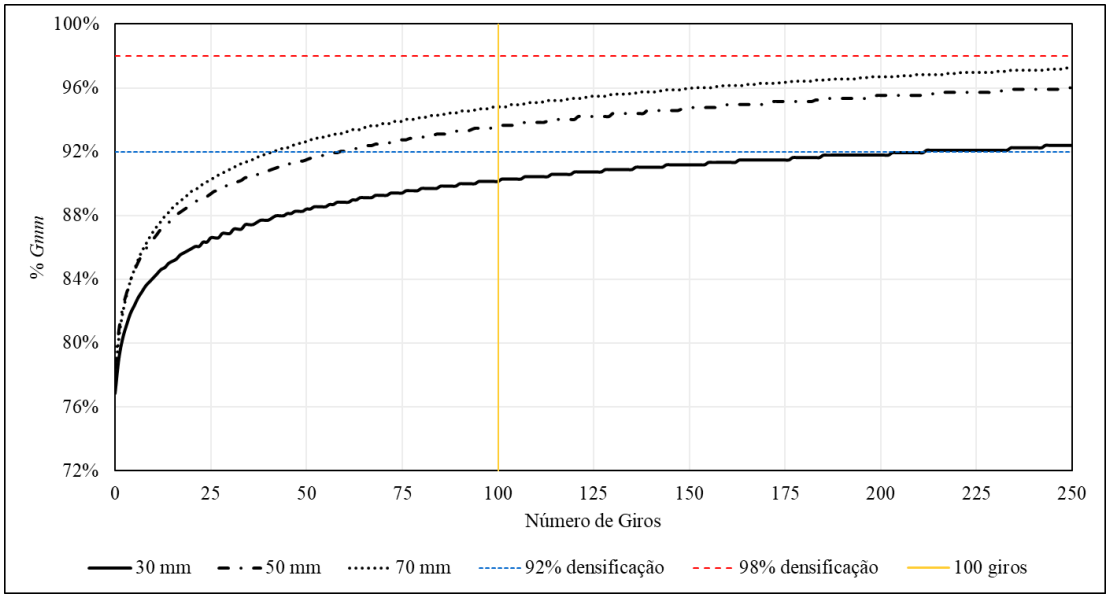

Figura 6. Curvas de densificação das amostras produzidas com agregados enquadrados na "Faixa C" DNIT, adaptada à reperfilagem

Na sequência, analisa-se conjuntamente as curvas de densificação das misturas produzidas com a faixa C do DNIT (Figura 5) e a faixa C DNIT adaptada à reperfilagem (Figura 6). Extrai-se dos resultados que a mistura produzida com agregados enquadrados na faixa C DNIT atingiu 92% da *Gmm* nas espessuras de 70 e 50 mm, sendo a primeira alcançada antes dos 100 giros no CGS. Já em análise da faixa C adaptada, independente da espessura atingiu-se 92% da *Gmm*. Aponta-se que o menor valor de TNM da faixa C adaptada à reperfilagem pode ter exercido influência na melhor densificação da mistura. Ainda, o menor valor de MF também pode ter participado na maior densificação notado nas misturas da faixa C adaptada.

A Tabela 2 contém um resumo dos resultados de número de giros necessários para que se atingisse 92% da *Gmm* para cada uma das curvas granulométricas das misturas em cada uma das três espessuras analisadas. É possível notar que as amostras com espessura mais delgada (30 mm) tiveram dificuldade de atingir 92% da *Gmm*, mesmo em grandes esforços de compactação. Ainda, misturas com TNM de 19,1 mm e granulometrias com maior percentual de agregados graúdos não atingiram 92% de *Gmm* nem ao final dos 250 ciclos. Já no que tange a espessura de 50 mm, somente a faixa C DNIT não atingiu 92% da *Gmm* aos 100 ciclos, o que pode significar dificuldade de compactação em campo para esta espessura. Em análise das especificações do DER-PR (2023) e do DNIT (2006), nota-se que o TNM de 19,1 mm exigiria espessura da camada mínima de 28,7 mm. Já para o TNM de 12,7 mm, se exigiria camada de espessura mínima de 19,1 mm. Os resultados da Tabela 2, todavia, comprovam incapacidade de densificação para as espessuras mínimas de 30 mm em qualquer uma das faixas granulométricas, considerando-se N = 100 giros. Por sua vez, a espessura de 50 mm tem demonstrado bom comportamento de compactação, atingindo-se o parâmetro de 92% da *Gmm* antes dos 100 giros em todas as curvas granulométricas, à exceção da faixa C DNIT (2006). Por fim, registra-se que o parâmetro de 98% da *Gmm* só foi atingido na Faixa C DER-PR (2023) na espessura de 70 mm, aos 217 giros.

Tabela 2. Resumo do número de giros no CGS necessários para se atingir 92% da *Gmm*

Faixa Granulométrica	Espessura da amostra		
	30 mm	50 mm	70 mm
B (DER-PR, 2023)	-	88	42
C (DER-PR, 2023)	245	70	27
C (DNIT, 2006)	-	174	57
C adapt. (DNIT, 2006)	212	59	41

Em linhas gerais, com os resultados colhidos se verificou que especialmente nas amostras com 30 mm de espessura, há uma tendência de estabilidade da taxa de densificação ao se atingir número giros mais elevados no CGS. Na prática, isso significa que mesmo se utilizando de grandes energias de compactação em campo, a densificação almejada não será atingida. Condição análoga foi observada por Gouveia, Fernandes Jr. e Soares (2007), ao evidenciar que misturas asfálticas não sofreram maior densificação em função do aumento da energia de compactação, comprovando-se pela estabilidade no valor de volume de vazios mesmo aplicando-se 75, 110 e 155 golpes por face no soquete Marshall.

Ainda, Onofre *et al.* (2011) apontam que alto percentual de agregados graúdos pode levar a impossibilidade de se atingir valores de densificação desejados. Em análise dos resultados apresentados, nota-se que as misturas produzidas com a faixa B DER-PR e C DNIT podem corroborar esta tese, uma vez que além do TNM de 19,1 mm possuem também os maiores valores de MF.

CONCLUSÃO

Considerando os resultados dos ensaios laboratoriais encontrados na pesquisa de densificação de misturas asfálticas com diferentes curvas granulométricas, pode-se concluir que:

- Um eventual revestimento asfáltico de espessura igual a 2/3 do TNM das amostras desta pesquisa não atingiram 92% da *Gmm* após o processo de compactação;
- Exigências de espessuras de revestimento maiores, como a da especificação MS-2 (ASPHALT INSTITUTE, 2014) se mostram mais adequadas a garantia da densificação adequada das misturas asfálticas;
- Na análise realizada, o TNM é preponderante na influência do ganho de densificação de misturas asfálticas. Todavia, registra-se que o percentual de partículas graúdas (comprovado pelo MF) também influencia na densificação da mistura.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). **R 35-17**: Superpave volumetric design for asphalt mixtures. Washington, 2020.

ASPHALT INSTITUTE. **MS-2 Asphalt mix design methods**. 7. ed. Washington: Asphalt Institute, 2014.

ALMEIDA JUNIOR, Pedro Orlando; BOEIRA, Fernando Dekeper; SPECHT, Luciano Pivoto; CERVO, Tatiana Cureau; PEREIRA, Deividi da Silva; CENTOFANTE, Roberta; BARBOZA JUNIOR, Valdir dos Santos; SILVA, Carlos Filipe Correia e. Avaliação laboratorial do tipo e teor de ligante e da granulometria na deformação permanente

de misturas asfálticas. **Transportes**, v. 26, n. 2, p. 1-15, 2018.

ARTERIS. **Especificações técnicas para materiais e execução de serviços**: pavimentação. São Paulo, 2022, 479 p.

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. 2ª ed. Rio de Janeiro: Petrobras/ABEDA, 2022.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ (DER-PR). **ES-PA 21/23**: Pavimentação: concreto asfáltico, usinado à quente. Curitiba, 2023, 31p.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO (DER-SP). **ET-DE-P00/027**: concreto asfáltico. São Paulo, 2007, 45p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **043**: Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995, 11 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **031**: Pavimentos flexíveis – concreto asfáltico – especificação de serviço. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2006, 14 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **412**: Pavimentação - Misturas asfálticas – Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento – Método de ensaio. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2019. 12 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **426**: Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação dos parâmetros CDI e TDI – Instrução de ensaio. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2020. 9 p.

GOUVEIA, Lilian Tais de; FERNANDES JÚNIOR, José Leomar; SOARES, Jorge Barbosa. Influência da energia de compactação no comportamento volumétrico e mecânico de misturas asfálticas. **Transportes**, Rio de Janeiro, v. 15, p. 34-41, 2007.

GUIMARÃES, Daniela Muniz D'antona; MOTTA, Laura Maria Goretti da; SILVA, Ben-Hur Albuquerque; FRITZEN, Marco Antônio; CASTRO, Carlos Eduardo Neves de. A influência da composição granulométrica segundo as metodologias Bailey, FAD e Marshall no desempenho à deformação permanente de misturas asfálticas. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, n. 3, 18 p., 2022.

HASSAN, Hafiz Muhammad Zahid; WU, Kuanghuai; HUANG, Wenke; CHEN, Sihang; ZHANG, Qiran; XIE, Jiawen; CAI, Xu. Study on the influence of aggregate strength and shape on the performance of asphalt mixture. **Construction and Building Materials**, v. 294, 123599, 2021. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123599.

NASCIMENTO, Luis Alberto Hermann. **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. Rio de Janeiro. 2008, 227p.

ONOFRE, Felipe Coutinho; BESSA, Iuri Sidney; BRANCO, Verônica Teixeira Franco Castelo; SOARES, Jorge Barbosa. Correlação entre variáveis de densificação do compactador giratório e resistência à deformação permanente de misturas asfálticas convencionais e com resíduos. **Transportes**, Rio de Janeiro, v. 19, p. 13-22, 2011.

RIBAS, Cristine Yohana; THIVES, Liseane Padilha. Evaluation of effect of compaction method on the macrostructure of asphalt mixtures through digital image processing under Brazilian conditions. **Construction and Building Materials**, v. 228, 116821, 2019. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116821.

SOARES, Jéssica Santiago. **Investigação da relação entre parâmetros da compactação giratória e de deformação permanente em misturas asfálticas densas**. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo. São Carlos, 2014.

THIEL, Douglas Antônio. **Desempenhos de misturas e ligantes asfálticos modificados com borracha moída de pneus e copolímero SBS quanto à fadiga e à deformação permanente**: estudo de caso na rodovia SC-163. Dissertação (Mestrado). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2023, 143p.