

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/688

Influência da Determinação da Curva de Compactação de um Material Granular no Dimensionamento de Pavimentos

Eduarda Fração Santos

Doutoranda, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, eduardafracao@gmail.com

Luciano Pivoto Specht

Professor PhD, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, uspecht@ufsm.br

RESUMO: Foram observadas diferentes práticas laboratoriais para determinação da curva de compactação de materiais granulares, que apresentam uma maior heterogeneidade quando comparados aos solos. Assim, amostras parciais para a obtenção de teores de umidade podem não ser representativas. Diante dessa variabilidade, este trabalho tem por objetivo investigar a influência dessas práticas no dimensionamento de pavimentos. Foram usados agregados pétreos provenientes do município de Itaara e classificados como um riodacito de origem vulcânica. A mistura granular produzida em laboratório atendeu aos limites da Faixa C DNIT 141/2010-ES. Foi realizado ensaio de compactação com energia modificada, utilizando o cilindro tripartido, conforme descreve o Procedimento Rede 04 (PETROBRAS, 2010). Definiu-se três metodologias diferentes para obtenção das curvas de compactação: a primeira empregando a média das umidades das amostras e do corpo de prova (CP); em seguida, aplicando um filtro estatístico; e, por fim, empregando apenas o teor de umidade obtido para o CP. Foram determinados os parâmetros de compactação para cada método, observando-se uma pequena variação das curvas. Por fim, empregou-se o software Medina, versão v.1.1.9.0, para analisar os efeitos no desempenho de estruturas, para diferentes níveis de tráfego. Concluiu-se que as alterações produzidas tendem a gerar melhores desempenhos para as curvas com maiores massas específicas.

PALAVRAS-CHAVE: Compactação, Britas Graduadas Simples, Teor de umidade, Medina.

ABSTRACT: Different laboratory practices were observed to determine the compaction curve of unbond granular materials, which present greater heterogeneity when compared to soils. Therefore, partial samples to obtain moisture levels may not be representative. Given this variability, this work aims to investigate the influence of these practices on pavement design. Stone aggregates from the municipality of Itaara were used and classified as a rhyodacite of volcanic origin. The granular mixture produced in the laboratory met the limits of Range C DNIT 141/2010-ES. A compaction test was carried out with modified energy, using a three-part cylindrical mold, as described in Procedure Rede 04 (PETROBRAS, 2010). Three different methodologies were defined to obtain the compaction curves: first using the average moisture content of exceed material and the compacted sample, another applying a statistical filter in these values and finally using only the moisture content obtained for the sample. The compaction parameters were determined for each method, observing a small variation in the curves. Finally, the Medina software, version v.1.1.9.0, was used to analyze the effects on the performance of structures, for different levels of traffic. It was concluded that the changes produced tend to generate better performance for curves with greater specific masses.

KEYWORDS: Compaction Test, Unbound Granular Materials, Moisture content, Medina.

1 INTRODUÇÃO

As rodovias brasileiras compõem o principal modal de transporte empregado no Brasil, representando cerca de 65% no deslocamento das cargas e 95% dos passageiros (CNT, 2023). Assim, as condições de trafegabilidade dos pavimentos geram impactos econômicos, sociais e ambientais. Ademais, fomentam a busca por técnicas que permitam evitar o surgimento de patologias precoces.

Os avanços computacionais permitem hoje um melhor entendimento do comportamento dos materiais empregados em pavimentos, gerando novos métodos de dimensionamento que permitem obter uma análise prévia de desempenho. Como exemplo dessa evolução, o novo Método Nacional de Dimensionamento para pavimentos (MeDiNa), emprega modelos matemáticos semi-empíricos para determinação das tensões e deformações em cada camada do pavimento, conforme diferentes níveis de tráfego e materiais (LIMA, 2020; FRANCO e MOTA, 2020).

Logo, diferentemente do Método DNER, que tem como objetivo evitar a ruptura por cisalhamento do subleito através de relações empíricas da rigidez com o índice CBR (*California Bearing Ratio*), o MeDiNa também considera critérios de ruptura funcional. Estes critérios são definidos como um limite de 30% para área trincada e 10 mm para afundamento plástico em trilha de roda (ART), para um sistema arterial com 95% de confiabilidade (FRANCO e MOTA, 2020; COUTINHO, 2011).

Assim, as análises laboratoriais ganham ainda mais importância sob a ótica do MeDiNa, permitindo a obtenção de parâmetros de entrada que podem influenciar no dimensionamento dos pavimentos. Dentre essas análises estão os ensaios para materiais granulares, como os testes triaxiais de carga repetidas para obtenção de modelos para módulo de resiliência e deformação permanente.

Para a realização desses testes, é essencial definir valores de controle para a compactação das amostras, permitindo a obtenção de densidades máximas equivalentes aos atingíveis em campo. Sendo que, valores de densidade maiores tendem a aumentar o módulo de resiliência das camadas granulares, conforme demonstrado em estudos de Hicks e Monismith (1971); Kolisoja (1997) e Lekarp, Isacsson e Dwason (2000). Deste modo, é esperado que energias de compactação maiores proporcionem camadas mais compactas, aumentando a rigidez da estrutura.

Além de variações de energia, fatores intrínsecos dos testes de compactação também podem resultar em valores de densidade distintos. Logo, o foco deste estudo reside em investigar se diferentes metodologias empregadas para obtenção de curvas de compactação podem afetar o desempenho de estruturas de pavimentos dimensionadas segundo o método MeDiNa, visando contribuir para a qualificação da tomada de decisões assertivas em análises laboratoriais.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Material granular

O material granular pétreo empregado neste estudo é oriundo do município de Itaara, na região central do estado do Rio Grande do Sul. Trata-se de uma rocha de origem vulcânica ígnea, classificada como um riodacito, com textura afanítica inequigranular porfirítica muito fina (SAGRILO et al., 2023). Foram empregadas as britas comerciais nas frações 3/4", 3/8" e Pó de Pedra para compor a mistura granular, atendendo aos limites estabelecidos para a Faixa C da especificação 141/2010-ES (DNIT, 2010) para materiais estabilizados granulometricamente.

Para melhor atender a faixa granulométrica adotada, foi definida a composição de 25% de Brita 3/4", 25% Brita 3/8" e 51% de Pó de Pedra para a Mistura Granular de Riodacito. Contudo, devido à utilização de corpos de prova de 10 cm de diâmetro, optou-se por excluir partículas retidas na peneira 3/4" (19,1 mm), assim, assegurando a proporção de diâmetro máximo das amostras e dimensão do corpo de prova de 1:4. Na Figura 1, são apresentadas as curvas granulométricas dos agregados e da mistura produzida. Já na Figura 2, é possível visualizar os materiais necessários para compor cerca de 5 kg da mistura.

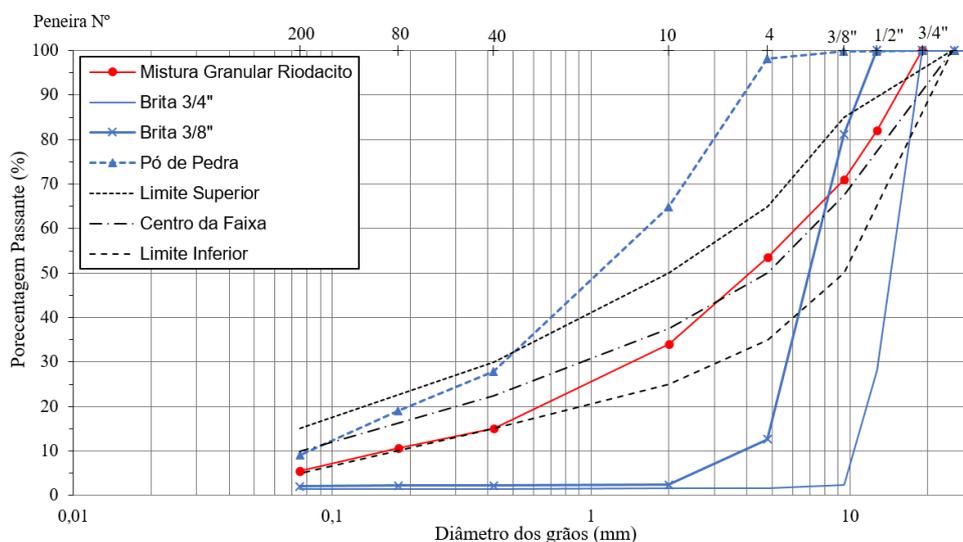


Figura 1. Curvas granulométricas e Faixa C DNIT 141/2010-ES



Figura 2. Frações empregadas para compor a mistura granular e materiais

2.2 Compactação

Os ensaios de compactação foram realizados seguindo o Procedimento Rede 04 (PETROBRAS, 2010), empregando o cilindro tripartido e energia modificada (56 golpes por camada), conforme está resumido na Tabela 1. As amostras foram preparadas previamente com cerca de cinco quilos de material, aos quais foram adicionados teores de água em relação ao peso e homogeneizadas em sacos plásticos por cerca de 24h. A Figura 3 ilustra o processo de compactação das amostras.

Tabela 1: Método de compactação das amostras

Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Volume (cm ³)	Energia (kgf.cm/cm ³)		Nº de camadas	Altura de queda (cm)	Peso do soquete (kgf)	Nº de golpes por camada
			Modificada					
10	20	1570,8	Modificada	27,3	10	30,5	2,5	56
						45,7	4,53	21
						30,5	4,53	31
						45,7	2,5	38

Fonte: Procedimento Rede 04 (PETROBRAS, 2010)

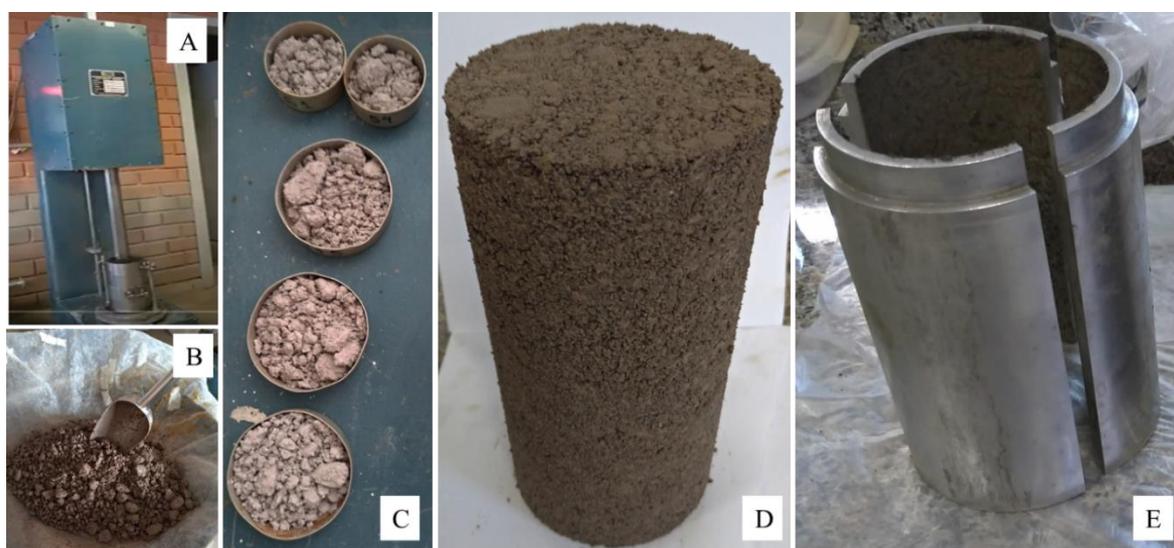


Figura 3: Processo de compactação da mistura

Legenda: A: Compactador Mecânico; B: Material homogeneizado; C: Amostras para aferição da umidade retiradas do material excedente; D: Corpo de Porca compactado; E: Molde Tripartido.

Para a aferição do teor de umidade foram retiradas cinco cápsulas do material excedente de cada amostra compactada, além da umidade fornecida após secagem do corpo de prova em estufa a 40°C. Assim, foram obtidas as curvas de compactação para a mistura granular, considerando três métodos: (1) utilizando a média das umidades das amostras e do corpo de prova (CP); (2) aplicando um filtro estatístico e (3) empregando apenas o teor de umidade obtido para o CP.

O segundo método, nomeado de “filtro estatístico”, consistiu em empregar limites máximos e mínimos para os teores obtidos através das equações 1 a 4. Os valores que ultrapassam os limites definidos são descartados e uma nova média é calculada. O processo é repetido quantas vezes necessárias até que todos os valores empregados para obtenção do valor médio respeitem o intervalo. Empregou-se um coeficiente de majoração, "Z", igual a 1,0, para maior confiabilidade dos resultados.

$$\mu = \frac{\sum_i^n x_i}{n} \quad (1)$$

$$DP = \sqrt{\frac{\sum_i^n (x_i - \mu)^2}{n - 1}} \quad (2)$$

$$\text{Limite Máximo} = \mu + Z \times DP \quad (3)$$

$$\text{Limite Mínimo} = \mu - Z \times DP \quad (4)$$

Onde: n = número de amostras; x_i = Teores de umidade; μ = Média Aritmética; DP = Desvio Padrão; Z = Coeficiente de Majoração (empregado $Z = 1,0$)

2.3 Análise Mecanicista: Medina

O Software MeDiNa permite obter estimativas de desempenho de pavimentos empregando modelos matemáticos semi-empíricos representativos dos materiais utilizados em suas estruturas. Dessa maneira, é possível analisar previamente qual tipo de material e/ou estrutura geraria um melhor desempenho frente às solicitações do tráfego.

Os parâmetros de compactação, massa específica aparente seca máxima (MEASm) e teor de umidade ótima (Wot) são empregados na base de dados dos materiais incorporados ao pavimento e permitem o cálculo de previsão das tensões e deformações que a estrutura sofrerá. Portanto, mudanças nestes parâmetros podem repercutir no desempenho final do pavimento.

A análise mecanicista, elaborada neste estudo, consistiu em alterar os valores de MEASm e Wot da camada granular, verificando se as alterações provocadas pelas diferentes metodologias de elaboração da curva de compactação afetariam as estimativas de desempenho das estruturas. Para isso, empregou-se o software MeDiNa, versão v.1.1.9.0, considerando três estruturas dimensionadas para atender aos níveis de tráfego distintos ($N = 5,00 \times 10^5$, $N = 8,00 \times 10^6$ e $N = 2,5 \times 10^7$).

Foram utilizados os materiais disponíveis no banco de dados do MeDiNa como revestimento e, para compor o subleito, empregou-se o solo analisado por Pascoal et al. (2023), coletado do horizonte pedológico B e empregado em seções de aterro da rodovia ERS-342, no município de Cruz Alta-RS. Para a base granular, foram empregados os modelos representativos para módulo de resiliência e deformação permanente, obtidos por Santos (2021). Nas tabelas 2 e 3, são resumidas informações das estruturas para cada nível de tráfego e dos materiais empregados.

Tabela 2: Estruturas dimensionadas para cada nível de tráfego

Estrutura	A	B	C
Nível de Tráfego	$N = 5,00 \times 10^5$	$N = 8,00 \times 10^6$	$N = 2,5 \times 10^7$
Revestimento	Tratamento Superficial Duplo TSD (2,0cm)	Concreto Asfáltico Classe 3 (12,70cm)	Concreto Asfáltico Classe 4 (18,10cm)
Base	Brita Graduada Simples de Riodacito (30,0cm)		
Subleito	Solo Cruz Alta (PASCOAL et al, 2023)		

Tabela 3: Características dos materiais empregados

Material	Propriedades	Modelos
Revestimento		
Tratamento Superficial Duplo (TSD)	Massa esp. (g/cm ³): 2,4 Coef. De Poisson: 0,25 Espessura: 2 cm Fonte: Banco de dados do Medina	Resiliente Linear MR = 1000 MPa
Concreto Asfáltico Classe 3	Massa esp. (g/cm ³): 2,4 Coef. De Poisson: 0,30 Resiliente Linear MR = 8000 MPa Fonte: Banco de dados do Medina	Ensaio de Fadiga -Modelo: $k_1 \cdot (e^k)^2$ -Coeficiente de Regressão (k1): $\geq 1e-12$ -Coeficiente de Regressão (k2): $\geq -3,75$ -Classe de Fadiga: ≥ 3 -FFM (100 μ a 250 μ): $\geq 0,90$ Flow Number Mínimo - Condição de Tráfego Normal: ≥ 284 ciclos - Condição de Tráfego Severa: ≥ 767 ciclos
Concreto Asfáltico Classe 4	Massa esp. (g/cm ³): 2,4 Coef. De Poisson: 0,30 Resiliente Linear MR = 10492 MPa Fonte: Banco de dados do Medina	Ensaio de Fadiga -Modelo: $k_1 \cdot (e^k)^2$ -Coeficiente de Regressão (k1): $\geq 1,91e-5$ -Coeficiente de Regressão (k2): $\geq -1,9$ -Classe de Fadiga: ≥ 4 -FFM (100 μ a 250 μ): $\geq 1,00$ Flow Number Mínimo - Condição de Tráfego Normal: ≥ 422 ciclos - Condição de Tráfego Severa: ≥ 1117 ciclos
Base		
Riodacito	Descrição do Material = Riodacito Coef. De Poisson: 0,35 Massa específica (g/cm ³) = Variável Umidade Ótima (%) = Variável Energia Compactação = Modificada Faixa Granulométrica = C Norma ou Especificação = DNIT ES 141 Fonte: Santos (2021)	Resiliente Não Linear MR = 68 MPa (1 ^o mês) k1 = 1938,63 k2 = 0,694 k3 = 0,159 k4 = 0,000 Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $e_p = \psi_1 \cdot (s_3^{\psi_2}) \cdot (s_d^{\psi_3}) \cdot (N^{\psi_4})$ Coeficiente de Regressão (k1 ou ψ_1): 0,019 Coeficiente de Regressão (k2 ou ψ_2): -1,113 Coeficiente de Regressão (k3 ou ψ_3): 1,650 Coeficiente de Regressão (k4 ou ψ_4): 0,180
Subleito		
Solo Cruz Alta	Descrição do Material = Argilas lateríticas argilosa da Jazida de Cruz Alta RS-342 Coef. De Poisson: 0,45 ISC=16,6%; Exp.=0,26% (Energia Normal) Grupo MCT = LG' MCT - Coeficiente c' = 2,35 MCT - Índice e' = 0,69 Massa específica (g/cm ³) = 1,625 Umidade Ótima (%) = 25,6 Energia Compactação = Intermediária Norma ou Especificação = DNIT ES 137 Fonte: Pascoal et al (2023)	Resiliente Não Linear MR = 219 MPa (1 ^o mês) k1 = 739,20 k2 = 0,340 k3 = 0,004 k4 = 0,000 Ensaio de Deformação Permanente Modelo: $e_p = \psi_1 \cdot (s_3^{\psi_2}) \cdot (s_d^{\psi_3}) \cdot (N^{\psi_4})$ Coeficiente de Regressão (k1 ou ψ_1): 0,017 Coeficiente de Regressão (k2 ou ψ_2): 0,699 Coeficiente de Regressão (k3 ou ψ_3): 0,517 Coeficiente de Regressão (k4 ou ψ_4): 0,103

3. RESULTADOS

3.1 Parâmetros de compactação

Os valores encontrados para o teor de umidade (W) e massa específica aparente seca (MEAS) dos corpos de prova (CP) compactados foram distintos para cada método. Na Tabela 4, são resumidos os resultados. Percebe-se que, para os valores de umidade mais baixos, houve uma variação menor nos parâmetros entre os métodos. Contudo, para amostras com umidades elevadas, a variação foi mais elevada, chegando ao máximo de 2,12% entre o teor de umidade aferido pelo método 2 e 3 para o CP 09, gerando a maior variação na MEAS de 0,059 g/cm³.

Tabela 4: Parâmetros de compactação para cada método e amostra compactada

Método	CP	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
(1)	W	5,27	6,55	6,95	8,25	9,07	7,50	9,11	9,50	8,11	7,29
	MEAS	2,042	2,029	2,042	1,922	2,140	2,159	2,149	2,042	2,068	2,160
(2)	W	5,31	6,58	6,98	8,13	8,04	7,21	9,20	10,53	9,20	7,01
	MEAS	2,041	2,028	2,042	1,925	2,161	2,165	2,147	2,023	2,147	2,165
	N.I	3	3	2	4	5	4	4	4	3	3
	DPI	0,234	0,356	0,316	0,330	1,118	0,355	1,115	1,229	0,933	0,385
	DPf	0,002	0,138	0,025	0,025	0,027	0,011	0,050	0,155	0,198	0,045
(3)	W	5,44	5,99	6,96	7,72	8,06	7,50	7,60	8,58	7,08	7,83
	MEAS	2,039	2,039	2,042	1,932	2,160	2,159	2,179	2,060	2,088	2,149

Onde: W: Teor de umidade (%); MEAS: Massa Específica Aparente Seca (g/cm³); N.I: Número de Interações; DPI: Desvio Padrão inicial; DPf: Desvio Padrão final; (1): Método com a média das amostras e CP; (2) Método com filtro estatístico e (3): Método umidade do CP.

A partir dos teores definidos pelos métodos, foram traçadas as curvas de compactação para a mistura granular. Para isso, foram plotadas linhas de tendências, representadas por uma reta ascendente do ramo seco e uma reta descendente do ramo úmido, unidas com uma curva parabólica. As curvas obtidas para cada método de aferição são apresentadas abaixo, na Figura 4.

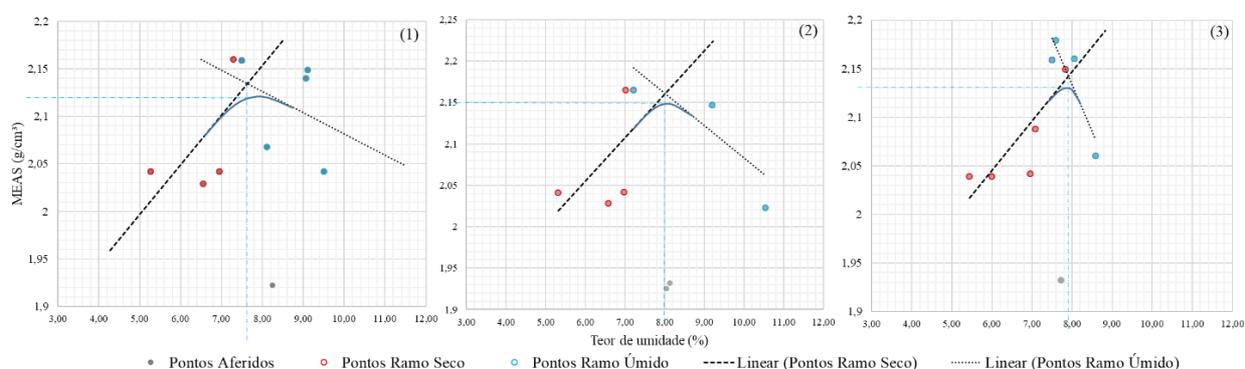


Figura 4. Curvas de compactação obtidas para cada método

Ao observar os gráficos, percebe-se uma maior semelhança entre as curvas obtidas pelo método 1 e 2, enquanto que a curva 3 demonstrou um formato distinto. As inclinações maiores para os ramos seco e úmido da curva 3 sugerem uma maior variação da MEAS com o teor de umidade. Ainda, percebe-se que alguns pontos foram excluídos das tendências lineares, pois apresentaram uma MEAS baixa. Isto pode estar relacionado com o efeito “splash”, isto é, a expulsão dos finos durante o processo de compactação. Os valores obtidos para MEAS_m e W_{ot}, para cada curva de compactação, são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros obtidos para as curvas de compactação

Curva de Compactação	1	2	3
W _{ot} (%)	7,60	8,0	7,90
MEAS _m (g/cm ³)	2,120	2,150	2,130

3.3 Estimativas de desempenho: MeDiNa

Uma vez definidos os parâmetros de compactação para cada uma das curvas, foram variados os valores de massa específica e umidade ótima e realizadas análises empregando o MeDiNa, empregando três situações de tráfego e os modelos de previsão obtidos por Santos (2021). Na Figura 5, é possível visualizar os resultados para as estimativas de ATR para cada curva de compactação e situação de tráfego.

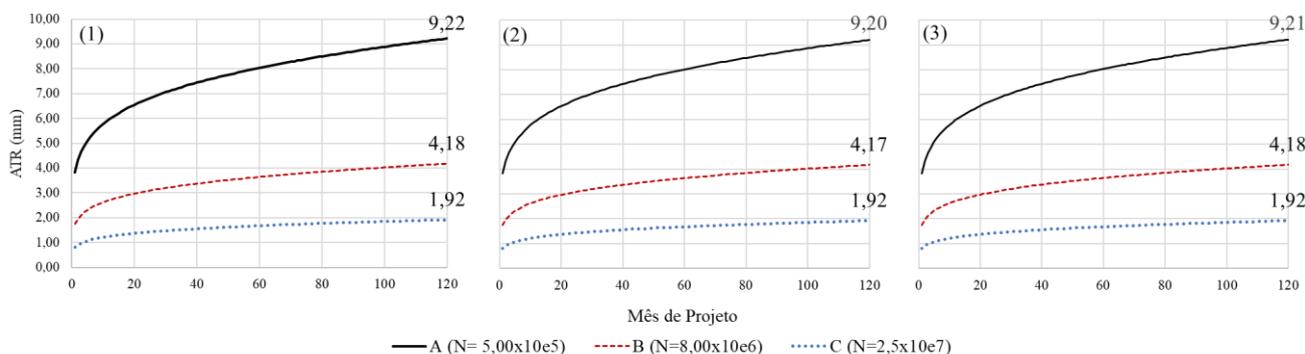


Figura 5. Previsão de ATR para cada situação de tráfego e curva de compactação

Nota-se que não foram observadas diferenças entre os valores de ATR, durante os 120 meses de projeto, para as situações de tráfego elevado ($N=2,5 \times 10^7$), em que atingiu-se 1,92mm para todas as curvas. No entanto, para um tráfego intermediário ($N=8,0 \times 10^6$), a Curva 2, obtida empregando-se o filtro estatístico, obteve menor valor de ATR, mas muito próximo às demais. Isso justifica-se devido ao seu maior valor de massa específica. Enquanto que, para um nível de tráfego baixo ($N=5,00 \times 10^5$), foi possível perceber a maior diferença nos valores de ATR, com a Curva 2 apresentando novamente o menor valor, seguida da Curva 3 e da Curva 1, correspondendo à ordem decrescente dos valores de massa específica.

Já os resultados de previsão da propagação da área trincada são resumidos na Figura 6. Para essas análises, a Situação A com revestimento do tipo TSD não é apresentada, pois esse tipo de material não apresentaria trincamento por fadiga. Observando os valores obtidos para cada curva de compactação e situação de tráfego, percebe-se que os resultados foram muito próximos. Contudo, novamente, a Curva 2, com maior massa específica, apresentou o melhor desempenho, seguida pela Curva 3 e Curva 1, mantendo a tendência anterior.

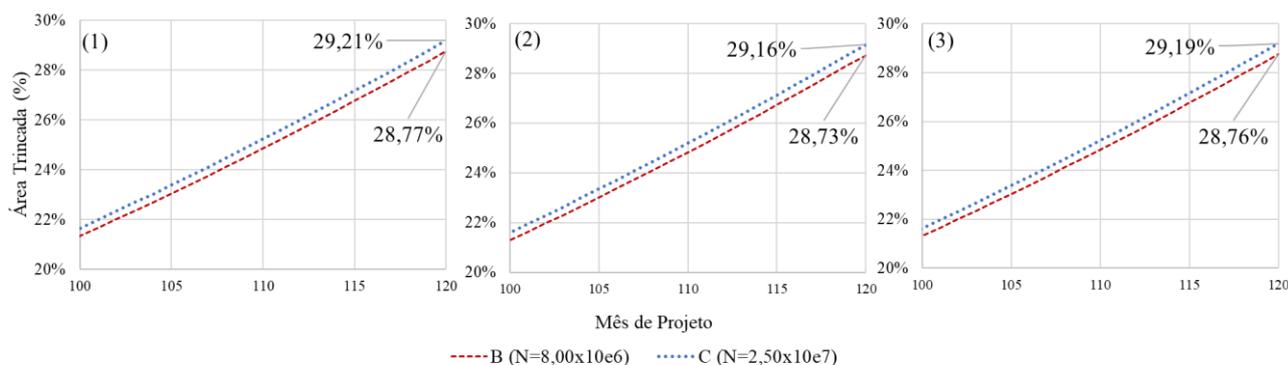


Figura 6. Previsão de propagação de área trincada para cada situação de tráfego e curva de compactação

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme os resultados apresentados anteriormente, pode-se concluir que métodos para determinação da curva de compactação, que geram maiores valores de massa específica, tendem a resultar em misturas granulares com maior resistência a deformações plásticas e elásticas. Assim, podem gerar valores subestimados de ATR e de propagação de área trincada para pavimentos projetados.

Entende-se que a redução nos valores de ATR e área trincada ocorreu devido ao aumento da massa específica, resultando em um material granular com maior rigidez. Assim, as tensões de tração ocorridas na fibra inferior do revestimento são reduzidas, inibindo a formação de trincas. Contudo, características do concreto asfáltico, como o teor de ligante presente e grau de fadiga, também exercem influência direta na vida útil ao trincamento do pavimento.

As diferenças constatadas entre os métodos avaliados, mesmo que mínimas, demonstram que há influência da metodologia empregada em laboratório nas estimativas de desempenho de pavimentos. Portanto, deve ser considerada a adoção de resultados que vão a favor da segurança, evitando a previsões de desempenho que superestimem o comportamento dos materiais investigados.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Confederação Nacional Do Transporte- CNT.(2023) Pesquisa CNT de rodovias 2023. Brasília : CNT : SEST SENAT : ITL, 204p.
- Coutinho, J. C. P. (2011). Dimensionamento de pavimento asfáltico: comparação do método do DNER com um método mecanístico-empírico aplicada a um trecho. 214p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro preto
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes –DNIT (2010). DNIT-ES 141/2010: Pavimentação asfáltica – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço. Rio de Janeiro.
- Franco, F. A. C. de P. e Motta, L. M. G. da. (2020). Manual para utilização do Método Mecanístico-Empírico MeDiNa Apresentação dos programas. Instituto de Pesquisa Rodoviária –IPR. Rio de Janeiro, 68p.
- Hicks, R. G.; Monismith, C. L.(1971). Factors influencing the resilient response of granular materials. Highway Research Record, n. 345, p. 15–31.
- Kolisoja, P. (1997). Resilient Deformation Characteristics of Granular Materials. PhD Thesis, Tampere University of Technology, Tampere, Finland.
- Lekarp, F.; Isacsson, U.; Dawson. A.(2000). State of the Art. II: Permanent Strain Response of Unbound Aggregates. Journal of Transportation Engineering, v. 126, n. 1, p. 76–83.
- Lima, C. D. A. (2020). Avaliação da deformação permanente de materiais de pavimentação a partir de ensaios triaxiais de cargas repetidas. Tese (doutorado em engenharia civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), Rio de Janeiro, 428p.
- Pascoal, P.T. et al. (2023) Lateritic soil deformability regarding the variation of compaction energy in the construction of pavement subgrade. Soils and Rocks, v.46, n.3, p. 1–12. DOI:10.28927/SR.2023.009922
- Petrobras (2010). Rede temática de asfalto. Manual de execução de trechos monitorados. Rio de Janeiro.
- Santos, E. F. (2021). Reciclagem de materiais fresados de diferentes fontes em misturas estabilizadas para uso em camadas granulares de pavimentos. 206p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- Sagrilo, A.V. et al. (2023) Contribution to resilient and permanent deformation investigation of unbound granular materials with different geological origins from Rio Grande do Sul, Brazil. Soils and Rocks, v. 46, n.3, p. 1-13. DOI:10.28927/SR.2023.009822