

VALIDAÇÃO DE MODELO DE AJUSTE DE CURVA E DELIMITAÇÃO DE FASES DO ENSAIO DE *FLOW NUMBER* EM MISTURAS ASFÁLTICAS

MILENA CARDOSO NEITZEL¹; NICOLE LEIVAS GOMES²; LUIZY BORGES VIEGAS³; CHAYANE COSTA LOBO⁴, NATÁLIA GUTERRES MENSCH⁵, KLAUS MACHADO THEISEN⁶.

¹Universidade Federal de Pelotas – mimicneitzel@gmail.com

²Universidade Federal de Pelotas – nicolegomesufpel@gmail.com

³Universidade Federal de Pelotas – viegasluizy@gmail.com

⁴Universidade Federal de Pelotas – contatochayanelobo@gmail.com

⁵NM Engenharia – natalia.mensch@gmail.com

⁶Universidade Federal de Pelotas – theisenkm@yahoo.com.br

1. INTRODUÇÃO

Segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2024) o modal rodoviário é responsável por 65% das cargas transportadas no país e mais de 95% do total de passageiros. Também, segundo a publicação, existem 213,5 mil quilômetros de rodovias pavimentadas no Brasil, porém elas são apenas 12,4% do total de rodovias, além do fato de existir grande variação na qualidade do pavimento. Assim, a qualidade da infraestrutura rodoviária torna-se um fator crítico, especialmente no que diz respeito à durabilidade e ao desempenho do pavimento. Entre as várias patologias possíveis, os pavimentos sofrem com a patologia da deformação permanente, que são depressões longitudinais nas trilhas de roda, causadas por fatores como o tráfego intenso, sobrecarga, problemas de dosagem da mistura asfáltica, enfraquecimento do subleito, dentre outros (BALBO, 2007).

Visando a qualidade dos pavimentos, é necessário saber previamente as resistências das misturas asfálticas às cargas do tráfego. Para isso, segundo a norma DNIT 184/2018 (DNIT, 2018), foi desenvolvido o ensaio de *Flow Number* (FN), que avalia a deformação permanente em misturas asfálticas a partir da aplicação de cargas repetidas uniaxiais à corpos de prova e faz parte do programa MeDiNa (*software* que realiza a verificação do dimensionamento de pavimentos por método mecanístico-empírico), sendo o FN um indicador no comportamento das misturas (SIMONE, 2021; DNIT, 2020; SILVA, 2018). O ensaio consiste em submeter corpos de prova à repetidos carregamentos de compressão vertical, gerando gráficos de deformação permanente vertical uniaxial e taxa de deformação plástica vertical versus números de ciclos de carga (DNIT, 2018). O FN é o ciclo da curva de deformação plástica vertical onde começa a zona terciária, o momento que caracteriza a ruptura pelo início do cisalhamento isovolumétrico (DNIT, 2018).

Segundo Theisen *et al.* (2017), a adequada interpretação do ensaio de FN é crucial para avaliar a propensão das misturas asfálticas ao afundamento de trilhas de roda. Os autores afirmam que modelos tradicionais de ajuste podem apresentar limitações por não considerar com precisão todas as fases do comportamento do material. Assim, Theisen *et al.* (2017) propuseram um modelo que, ao contemplar separadamente as fases primária, secundária e terciária, apresentou menor erro percentual médio em comparação aos modelos tradicionais e forneceu valores mais baixos de FN, o que é mais seguro para dosagens de misturas asfálticas.

Assim, o trabalho tem o objetivo de validar a aplicabilidade do modelo de Theisen *et al.* (2017) em diferentes misturas asfálticas, verificando se o modelo apresenta consistência e precisão em contextos variados.

2. METODOLOGIA

O presente trabalho é um desdobramento da tese de doutorado de Mensch (2022), baseada nos dados de oito misturas asfálticas submetidas ao ensaio de FN. A tese testou 4 tipos de ligantes CAP 50/70, AMP 60/85, AB8.1 (asfalto-borracha) e AB8.2 (asfalto-borracha), combinando à 3 granulometrias contínua (12,5mm), contínua (19 mm) e descontínua (*gap graded*).

Inicialmente, ajustou-se as curvas deformação permanente x número de ciclos, gerando-se gráficos para cada mistura, correlacionando os valores de FN com os valores de PTD1, PTD2 e PTD3, que são as taxas de deformação percentuais das fases primária, secundária e terciária, respectivamente, conforme modelo de Theisen *et al.* (2017). Isso possibilitou a identificação visual das misturas que foram desclassificadas. O critério de desclassificação se baseia no fim de duas fases: i) Fase primária: ocorre quando a curva do PTD1 cruza a curva do PTD2 e ii) Fase secundária: ocorre quando a curva do PTD2 cruza a curva do PTD3. Para classificação, o cruzamento das curvas PTD1 e PTD2 (fim da fase primária) deve acontecer em um número de ciclos de FN menor do que o cruzamento das curvas PTD2 e PTD3 (fim da fase secundária). As misturas foram desclassificadas se o valor de N no fim da fase primária fosse maior que o valor no fim da fase secundária.

Após, calculou-se o PTD2 máximo (o maior valor de PTD2) e o FN ajustado (o menor valor na coluna da derivada da curva deformação permanente x número de ciclos ajustada pelo modelo). Em seguida, obteve-se o FN Real como a variação da deformação real (obtida experimentalmente) entre dois ciclos, dividida pela variação dos valores desses ciclos. Finalmente, os resultados foram organizados em uma tabela com duas colunas: a primeira coluna contém o valor obtido pela divisão do FN no fim da fase primária pelo PTD2 máximo, e a segunda coluna apresenta os valores da constante c_1 para cada mistura obtida, segundo ajuste do modelo de Theisen *et al.* (2017). Com a tabela, foi gerado um gráfico de dispersão com uma linha de tendência, englobando os dados de todas as misturas. Para identificar quais misturas se adequam ao modelo de Theisen *et al.* (2017), o coeficiente de determinação (R^2) da equação foi utilizado como critério (pelo menos acima de 0,70, mantendo um mínimo de três misturas no gráfico).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 mostra os resultados obtidos para as misturas asfálticas testadas. Pela tabela, percebe-se que algumas misturas se adequaram ao modelo de Theisen *et al.* (2017). As primeiras misturas desclassificadas são AB8.1 GAP, CAP 50/70 TMN19 e AB8.1 TMN19 (constante A2 é negativo caso específico da desclassificação) pois seus valores de N de fim de fases primária e secundária não estão de acordo ao esperado. No caso da mistura AB8.1 TMN19 há um caso específico de desclassificação pois sua constante A2, relacionada PTD2, é negativa. Após, nos dados da tabela 2 a mesma mistura AB8.1 TMN19 é desclassificada novamente por não apresentar valores de fim da fase primária.

Mesmo com misturas desclassificadas no critério anterior, deve-se levar em consideração que o gráfico de dispersão da Figura 1 se relaciona com os valores de fim de fase primária, sendo assim algumas misturas antes desclassificadas consideradas agora. Assim, para a tabela 2, sete misturas foram consideradas.

Com todas as misturas vistas na Tabela 2, o R^2 da relação c_1 com a razão (Nfim da fase primária/flow number) foi 0,3111. Após a exclusão das misturas AB8.2 TMN 12,5 e AB8.1 GAP, o valor alterou para 0,7093, considerado aceitável. Para

maximizar R^2 com as três misturas, as misturas AB8.2 GAP e CAP 50/70 TMN19 foram removidas. Como resultado, o R^2 máximo de 0,9864 foi alcançado com as seguintes misturas: CAP 50/70 TMN12,5, AB8.1 TMN12,5 e AMP 60/85 TMN12,5.

Tabela 1: resultados obtidos para as misturas asfálticas

Mistura	R ² do ajuste modelo Theisen et al. (2017)	N primária-secundária	N secundária-terciária	FN ajustado	N para PTD2 máximo	FN real
AB8.1 GAP	1,0000	82	40	113	113	160
AB8.2 GAP	1,0000	14	181	62	62	74
AB8.1 TMN12,5	0,9998	58	670	234	234	346
AB8.2 TMN12,5	0,9999	108	1434	469	469	772
AMP 60/85	0,1822	599	1281	936	936	1488
CAP 50/70 TMN12,5	1,0000	31	443	147	147	186
AB8.1 TMN19	0,9998	-	-	352	1	581
CAP 50/70 TMN19	1,0000	24	-	93	93	106

Tabela 2: Relação da constante c_1 com a razão (Nfim fase primária/PTD2 máx)

MISTURAS	N fim da fase primária/PTD2 máx.	Constante c_1
AB8.1 GAP	0,73	0,0199
AB8.2 GAP	0,23	0,0866
AB8.1 TMN 12,5	0,25	0,0260
AB8.2 TMN 12,5	0,23	0,0127
AMP 60/85	0,64	0,0100
CAP 50/70 TMN 12,5	0,21	0,0363
CAP 50/70 TMN 19	0,26	0,0451

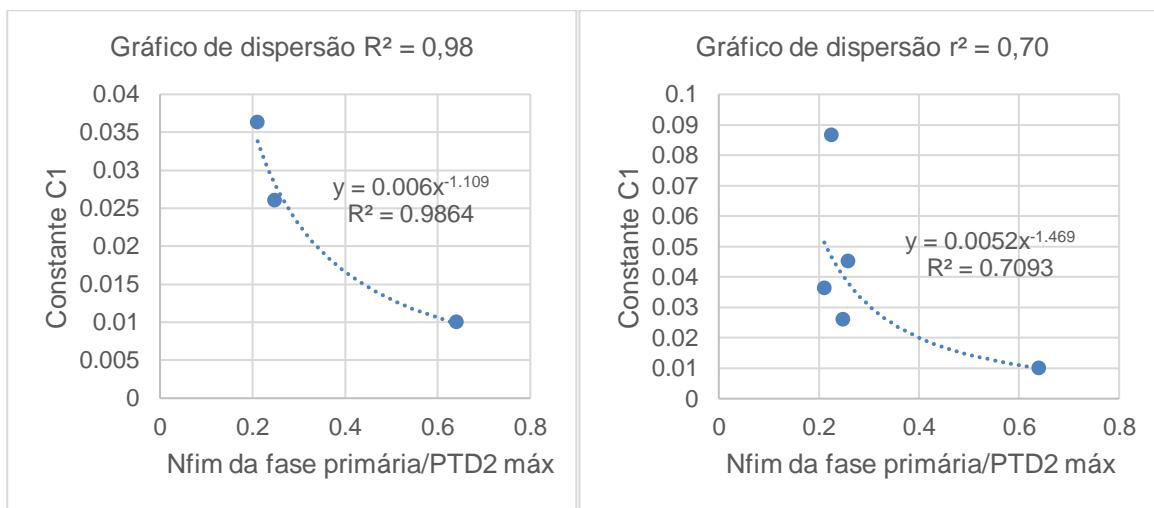


Figura 1: Relação da constante c_1 com a razão (Nfim da fase primária/flow number)

4. CONCLUSÕES

A qualidade do ajuste do modelo de Theisen *et al.* (2017) foi avaliada com base no coeficiente de determinação R^2 do ajuste, que considera as deformações da mistura antes e após o momento do FN. Nesse âmbito, sete misturas foram aceitas, exceto a AMP 60/85 TMN12,5 que apresentou um R^2 de 0,1822. Esse resultado indica que o ligante polimérico presente pode não se ajustar ao modelo.

Verificou-se que algumas misturas não apresentaram comportamento compatível com o modelo, levando-se em conta o coeficiente de determinação (R^2) da relação c_1 com a razão (Nfim da fase primária/Flow number), nesse âmbito as misturas que contribuíram para o ajuste do modelo, foram: CAP 50/70 TMN12,5; AB8.1 TMN12,5 e AMP 60/85 TMN 12,5. Esses resultados indicam que misturas com granulometria contínua de TMN 12,5 mm, que entram na faixa C (DNIT).

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALBO, J. T. Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Pini, 2007.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Pesquisa CNT de Rodovias 2024. Brasília: CNT, 2024. Disponível em: <https://cnt.org.br/documento/cbf59b9e-fd1a-41fc-b230-172c4dc42100>
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
- DNIT 184/2018 – ME: Ensaio de número de fluxo – Método de Ensaio. Brasília: DNIT, 2018.
Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit-184-2018-me-1.pdf>
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
Manual de utilização do MeDiNa – Versão 1.1.4. Brasília: DNIT, 2021.
Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/medina-1-1-4-manual-de-utilizacao.pdf>
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
Portal MeDiNa – Informações e downloads.
Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina>
- IBRAOP – Instituto Brasileiro de Auditoria de Obras Públicas.
MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional. Brasília: IBRAOP, 2021.
Disponível em: <https://www.ibraop.org.br/wp-content/uploads/2021/04/MeDina.pdf>
- MENSCH, N. G. *Modelagem da deformação permanente de misturas asfálticas a partir de princípios viscoplásticos*. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Porto Alegre, 2022.
- SILVA, J. E. G. Método nacional de dimensionamento de pavimentos - MeDiNa, avaliação da duplicação da AL-145. *Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil)*, Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, 2018.
- THEISEN, K. M.; PIVETTA, F. do C.; BRITO, L. A. T.; CERATTI, J. A. P. Proposta de modelo para ajuste e interpretação de resultados de ensaio de flow number em diferentes misturas asfálticas. In: CONGRESO IBERO-LATINOAMERICANO DEL ASFALTO – CILA, 2017.