

ATUALIZAÇÃO DA FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA DO DANO DE FADIGA PARA A ÁREA TRINCADA DO PROGRAMA MEDINA

Marcos Antonio Fritzen¹, Filipe Augusto Cinque de Proença Franco², Laura Maria Goretti da Motta³ e Mariluce de Oliveira Ubaldo⁴

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Laboratório de Geotecnia, Av. Pedro Calmon s/n, 21941-596, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, Brasil: email: marcosantonio_ufrj@yahoo.com.br

²Universidade Federal do Rio de Janeiro, Laboratório de Geotecnia, Av. Pedro Calmon s/n, 21941-596, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, Brasil

³Universidade Federal do Rio de Janeiro, Laboratório de Geotecnia, Av. Pedro Calmon s/n, 21941-596, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, Brasil

⁴Universidade Federal do Rio de Janeiro, Laboratório de Geotecnia, Av. Pedro Calmon s/n, 21941-596, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, Brasil

Sumário

A modelagem mecânica no dimensionamento de pavimentos vem da busca constante de melhorar os projetos de pavimentação. A calibração entre campo e laboratório, ponto do empirismo nos métodos de dimensionamento, ainda são necessários no atual estado da prática sendo representada pela Função Transferência. O trabalho de [1] fez uma grande contribuição como desenvolvimento da Função Transferência que chegou a ser utilizada no programa MeDiNa com determinado sucesso. Entretanto, inconsistências matemáticas exigiram sua atualização. O objetivo deste trabalho, portanto, é atualizar a Função Transferência, considerando a mesma base de dados e considerações utilizadas pelo autor, mas com nova abordagem teórica.

Palavras-chave: Função de Transferência, Ensaio de laboratório, Desempenho de campo, Trechos experimentais e Método de Dimensionamento Mecânico.

1 INTRODUÇÃO

A condição empírica dos métodos de dimensionamento de pavimentos tem sido tópico de discussão entre engenheiros rodoviários há muitos anos. Os métodos empíricos baseiam-se em regras desenvolvidas a partir de observações e experiências em campo, porém com certos tipos de pavimentos, de materiais de pavimentação e condições específicas de clima, que não necessariamente as da região do projeto em questão. A maior limitação dos métodos empíricos é que eles não podem ser generalizados com confiabilidade para outras condições senão àquelas para as quais foram desenvolvidos.

A necessidade da modelagem mecânica no dimensionamento de estruturas de pavimentos vem da busca constante de se melhorar os projetos de pavimentação em termos de eficiência estrutural, de modo a utilizar materiais, cujo desempenho de campo ainda não se têm experiência suficiente, considerando, também, os efeitos das condições ambientais e de tráfego, diferentes daquelas para as quais os Métodos Empíricos foram desenvolvidos.

Diversas pesquisas em desenvolvimento nas Universidades Brasileiras estão buscando gradativamente um entendimento mais analítico do problema e tentando, com isso, reduzir, ou até mesmo eliminar esta parcela de empirismo.

No enfoque analítico, o pavimento é tratado como uma estrutura de engenharia e seu comportamento mecânico é avaliado em função do carregamento e da resistência dos materiais, assim como é feito com as estruturas de concreto ou de aço. Além disso, relacionam-se as tensões de tração na base da camada asfáltica com a formação de trincas no revestimento do pavimento ou as deformações verticais com o desenvolvimento do afundamento de

trilha de roda. No entanto, em geral, tais teorias ainda estão em pesquisa para se buscar uma modelagem de diversos fatores, cujas propriedades variam com o tempo e com as condições ambientais, e que tem a deterioração acumulada com a passagem das cargas variáveis em intensidade, distribuição e velocidade. Assim, o último passo no processo de dimensionamento acaba por ter uma parcela empírica, com a aplicação dos fatores de calibração campo-laboratório sobre os modelos desenvolvidos em laboratório [2] e [3].

Os modelos matemáticos obtidos de regressões de dados de ensaios em laboratório e que tentam traduzir as tensões, as deformações e os deslocamentos em danos nos pavimentos podem ser considerados o elo mais fraco no método mecanístico de dimensionamento de pavimentos. Apesar do avanço das pesquisas e das técnicas de ensaios no campo e no laboratório, o fator de calibração entre o campo e o laboratório, ponto onde se encontra o empirismo, no atual estado-da-prática, ainda não deixou de ser utilizado [4].

No Brasil, a primeira referência sobre a calibração foi feita por [5]. O autor realizou a calibração do seu modelo de dano de fadiga por área trincada com base em observações e análises do comportamento no campo de trechos da rodovia BR-101. O autor definiu curvas para estimar os valores mínimos e máximos do fator campo-laboratório para o seu modelo, associados à deformação específica inicial e às diferenças de tensões no revestimento dos trechos da rodovia analisados. Diversos projetistas vêm utilizando o coeficiente igual a 10^4 como fator campo-laboratório para esse modelo, que corresponde a cerca de 20% da área trincada do pavimento a uma temperatura de 54°C e em termos de diferença de tensões.

Mais recentemente, [6], definiu uma Função de Transferência utilizando 27 segmentos experimentais construídos e monitorados na Cidade Universitária do Rio de Janeiro – Projeto Fundação. Esta Função de Transferência é aplicada sobre o dano obtido a partir da curva de fadiga do ensaio de tração direta com carregamentos sob deformação controlada das misturas asfálticas e com o estado de tensões e deformações calculado pelo programa Layered Viscoelastic Pavement Analysis for Critical Distresses (LVECD), a partir do módulo dinâmico.

Inspirado no trabalho de [6], [1] desenvolveu uma nova Função de Transferência, mas considerando os ensaios mecânicos de módulo de resiliência e fadiga por compressão diametral de cargas repetidas de misturas asfálticas, e calculando o estado de tensões e deformações pelo programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC), adaptado do trabalho desenvolvido por [4]. O autor utilizou para a calibração dados de 45 segmentos experimentais avaliados do Projeto Fundação. O trabalho de [1] foi inicialmente implantado nas versões de teste do Método de Dimensionamento Nacional de Pavimento – programa MeDiNa.

Muito embora a calibração de [1] apresentasse resultados compatíveis com as observações de campo, as expressões e a metodologia algébrica para se alcançar os resultados apresentou inconsistências quando o programa MeDiNa começou a ser utilizado durante a fase de testes. Após várias análises matemáticas nos códigos do programa MeDiNa, pode-se verificar que a variabilidade percebida no dimensionamento para pequenas variações de espessura da camada asfáltica eram decorrência da alta sensibilidade dos coeficientes das expressões da função de transferência. Isso ocorria por conta da limitação do dano ao valor unitário e, também, pela curva de fadiga dos materiais obtida pelo ensaio diametral ser muito severo.

Nesse sentido, novos estudos foram realizados, avaliando a consideração sobre o dano de fadiga limitado a unidade, variando o número de pontos da malha de cálculo, todos no sentido de se obter uma função de transferência capaz de sanar as inconsistências nos resultados.

Com base nestes novos estudos este trabalho foi desenvolvido, que tem como objetivo atualizar a função de transferência estabelecida por [1], considerando a mesma base de dados e considerações utilizadas pelo autor, mas com uma nova abordagem teórica, onde o dano de fadiga não é limitado ao valor unitário.

2 DADOS PARA PESQUISA

Os dados para o trabalho foram obtidos das mesmas fontes do trabalho de [1], ou seja, dos dados de ensaios de campo e laboratório dos trechos monitorados na Cidade Universitária da UFRJ, chamado projeto Fundação, realizado em parceria entre o CENPES e a COPPE/UFRJ – Setor de Geotecnia e Pavimentos, cuja concepção e implantação foi no ano de 2006.

Ao todo foram construídos 113 segmentos experimentais na Cidade Universitária e dentre estas soluções foram utilizadas misturas asfálticas mornas, misturas a quente com o uso de ligantes convencionais e modificados com borracha ou polímeros, e uso de agregados alternativos como a argila calcinada. Utilizaram também, soluções a

frio como tratamentos superficiais simples, duplo e triplo, microrrevestimentos e pré-misturados a frio em diferentes níveis de tráfego: baixo, médio e alto. Estes últimos trechos não foram objeto de análise neste trabalho, o que totalizou 40 segmentos listados no Quadro 1.

Quadro 1: Identificação das seções do projeto Fundão utilizadas na atualização da função transferência

Trechos monitorados utilizados na calibração								
SQ01E	SQ01C	SQ02E	SQ02C	SQ02D	SQ03C	SQ03E	SQ05E	SQ05C
SQ12E	SQ12D	SQ19C	SQ14D	SQ06C	SQ06E	SQ08C	SQ08E	SQ13E
SQ33D	SQ33E	SQ35D	SQ35E	SQ35C	SQ34E	SQ34D	SQ38E	SQ26D
SQ26C	SQ26E	SQ41E	SQ40C	SQ40E	SQ42D	SQ42E	SQ80C	SQ10E
SQ29E	SQ29D	SQ43C	SQ43D					

Os trechos selecionados possuem estruturas com camada de revestimento asfáltico com espessuras variáveis (de 5cm a 15cm), misturas asfálticas a quente (com ligantes tradicionais e modificados por polímero), bases granulares e subleito com diferentes módulos de resiliência.

Destes segmentos listados, os dados dos trechos SQ02D, SQ34E, SQ34D, SQ42D, SQ42E foram excluídos das análises por apresentarem valores muito discrepantes do comportamento médio das demais seções. Estas seções possuem características excepcionais, como camada inferior muito trincada, problemas construtivos, e outros que justificam as discrepâncias nos resultados. Assim, foram utilizados dados de 35 seções.

Em todos os segmentos existem os dados da evolução da área trincada com o crescimento do tráfego, contagem de eixos, ensaios dos materiais asfálticos por compressão diametral (módulo e fadiga), retroanálise de bacias de FWD, além de outros.

Esses dados são ricos de informações e tanto foram utilizados na calibração da função transferência do trabalho de [6], quanto no trabalho de [1].

3 FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA

Para obtenção da função transferência, o processo de acompanhamento de trechos e o levantamento e registro de dados estabelecido em [1] não foi alterado.

De posse destes dados, foram plotados em um gráfico, a relação entre a área trincada observada e o número N de repetições de carga do eixo padrão. Observou-se nesses gráficos que o formato das curvas de evolução da área trincada se aproximava de uma função sigmoideal. Ou seja, o trincamento no começo evolui lentamente, passa por um período mais acelerado e depois volta a ficar lento quando o estado de trincamento é elevado, até o limite de 100%.

Os gráficos apresentados na Figura 1 comparam o formato da evolução da área trincada com uma curva sigmoideal para três das 35 seções utilizadas no desenvolvimento da atualização da função transferência.

Assim, foi definido que a evolução da área trincada seria representada por uma curva sigmoideal ($N \times AT$), no lugar de uma função potencial (dano médio $\times AT$) como era na proposta anterior.

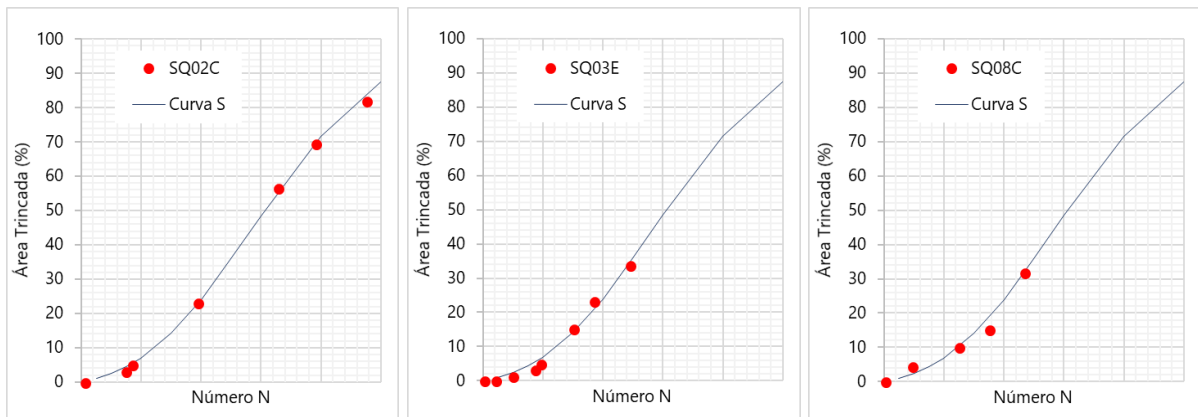


Fig. 1: Evolução da Área Trincada observada em relação ao número N para três seções experimentais do projeto Fundão

A expressão da curva sigmoide padronizada é:

$$AT(\%) = \frac{e^{-A} \cdot e^{-B}}{1 - e^{-B}} \quad (1)$$

$$A = \left(\frac{N'-1}{Z-1}\right)^n \quad (2)$$

$$B = \left(\frac{-1}{Z-1}\right)^n \quad (3)$$

em que, Z e n: são parâmetros da curva sigmoide;

e^x : função exponencial cuja base é o número de Euler;

AT (%): é a área trincada estimada em percentual; e

N' : é o número equivalente ajustado.

Para utilizar uma curva sigmoide padronizada, os eixos tanto das abcissas quanto das ordenadas precisam ser iguais para todas as seções. A área trincada varia de 0 a 100% em todas as seções e foi utilizado no eixo Y.

Para o eixo X, representando o tráfego, foi utilizado o valor N' obtido a partir do número de repetições do eixo padrão rodoviário N com a aplicação do fator de deslocamento (expressão 4).

De forma similar ao processo de definição da função transferência estabelecida por [1], o valor do tráfego (N) de todas as seções avaliadas foram multiplicados por fatores de deslocamento, conforme a expressão abaixo, de forma a coincidir a evolução da área trincada com a curva sigmoide padrão.

$$N' = (N \cdot fS) \cdot 10^{-10} \quad (4)$$

em que, N: é o número de repetições do eixo padrão quando foi realizada a medição da área trincada;

fS: é o fator de deslocamento atribuído para o ajuste da curva da área trincada para a curva sigmoide;

N' : é o número N ajustado.

Na sequência, com todos os dados das 35 seções, buscou-se obter matematicamente a melhor curva Sigmoidal que representasse o comportamento da evolução da área trincada dos segmentos monitorados.

O melhor ajuste obtido para a curva sigmóide padrão foi a que apresentou os parâmetros Z e n iguais a 0,25 e 5,0 respectivamente e com um coeficiente de determinação $r^2 = 0,82$.

Após todos os fatores de deslocamento (fS) aplicados, as 35 seções do projeto Fundão se ajustaram à curva sigmóide padrão e cujo resultado é apresentado no gráfico da Figura 2:

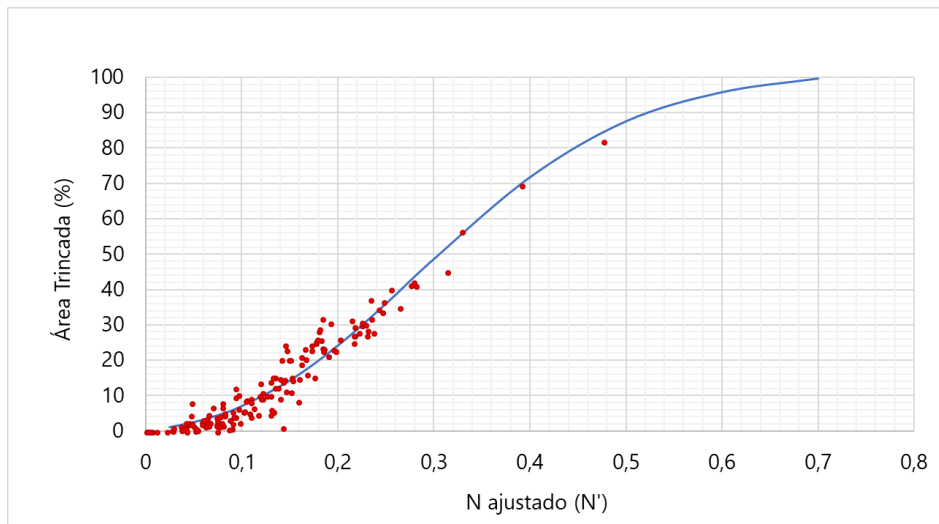


Fig. 2: Curva sigmóide que relaciona o número N ajustado (N') em relação a porcentagem de área trincada observada de 35 seções do projeto Fundão.

Para correlacionar os dados de percentual de Área Trincada observada com alguma informação estrutural do pavimento, buscou-se aplicar a mesma linha de pensamento da calibração anteriormente estabelecida, ou seja, o dano médio de fadiga dos mesmos 110 pontos da calibração de [1], só que desta vez, sem aplicar a limitação do dano de fadiga ao valor unitário.

De modo a tornar o processo mais simples, verificou-se que com apenas 20 pontos foi possível estabelecer uma boa correlação com os fatores de deslocamento (fS) do número N, considerando, dos 110 pontos, somente os dez pontos da superfície com os dez pontos da face inferior da camada asfáltica.

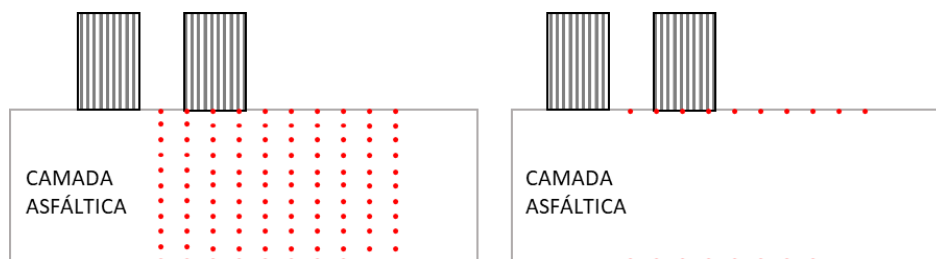


Fig. 3: Esquema com a localização dos pontos na versão anterior com 110 pontos (esquerda) e na proposta no artigo com 20 pontos (direita).

Este dano médio, portanto, foi determinado numa malha distribuída em 20 pontos da camada de revestimento, em uma grade de 10 pontos distribuídos na direção horizontal a partir do centro do carregamento (considerando o eixo padrão) – ponto 0 cm até 32,85 cm na superfície e na face inferior da camada asfáltica.

O dano médio de fadiga ($D_{\text{médio}}$) de cada ponto da malha de 20 pontos foi calculado pela divisão de uma aplicação do eixo padrão rodoviário pelo número permissível de aplicações de eixos de carga (N), expresso por:

$$D_{\text{médio}} = \frac{1}{20} \sum \left(\frac{1}{N} \right) \quad (5)$$

Finalmente obteve-se a atualização da Função de Transferência (FT) que transforma o dano médio em 20 pontos em área trincada prevista, por meio de duas constantes C1 e C2 definidas no processo de calibração. O resultado da correlação, expressa pela equação (6), é apresentado no gráfico apresentado na Fig. 4, onde os fatores C1 e C2 do melhor ajuste foram 1993,7 e 0,3737 respectivamente.

$$fS = C1 \times (D_{\text{médio}})^{C2} \quad (6)$$

em que fS: é o fator de deslocamento;

$D_{\text{médio}}$: é o dano médio de fadiga da malha de 20 pontos;

C1 e C2: são os coeficientes de ajuste da curva.

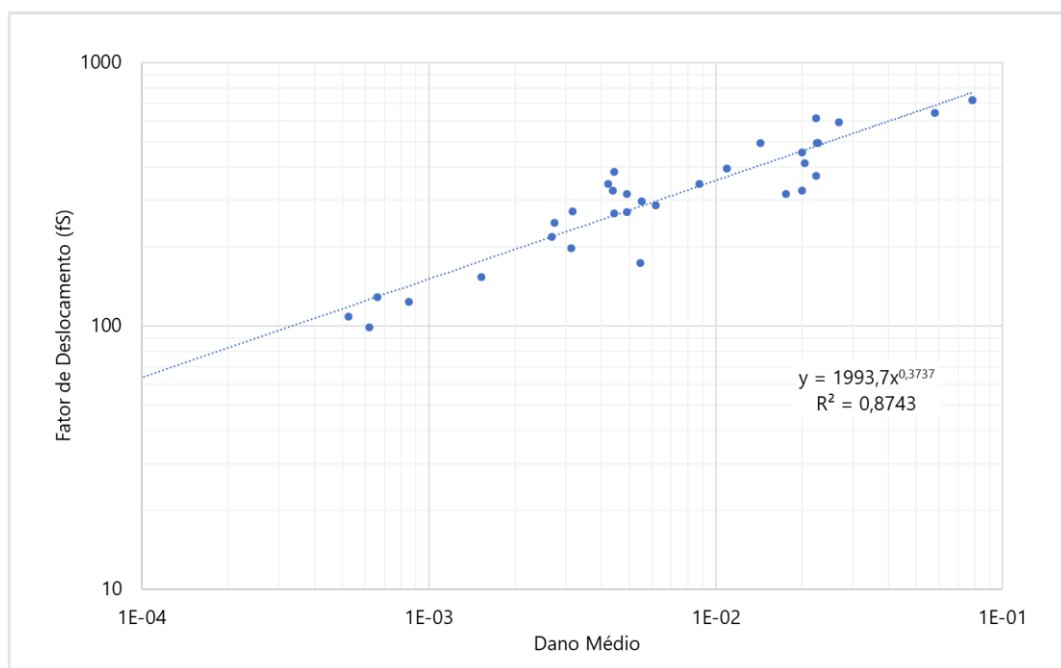


Fig. 4: Gráfico da relação entre o dano médio de fadiga em 20 pontos na camada asfáltica com o fator de deslocamento (fS)

Portanto, a sequência para a determinação da previsão do percentual de área trincada segue uma rotina cujo fluxograma está ilustrado na Fig. 5.

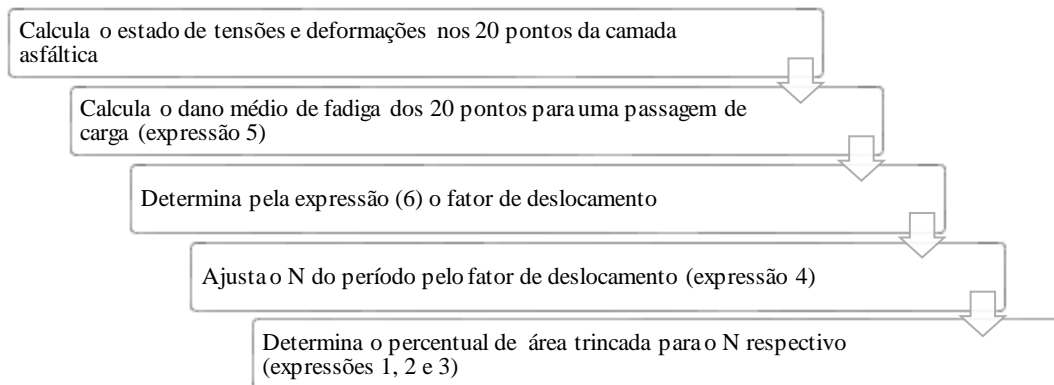


Fig. 5: Fluxograma de cálculo da previsão da área trincada

4 CONFIABILIDADE

Os parâmetros envolvidos no projeto de uma rodovia são de natureza probabilística. Nenhum deles possui um valor único determinístico, de modo que o tratamento estatístico não pode ser dispensado [2].

Diversos fatores incidem sobre o dano de fadiga nas estruturas dos pavimentos tais como: o volume de tráfego, o peso e pressão das rodas do carregamento, a variação lateral da passagem dos veículos, a qualidade dos materiais, o efeito do clima, principalmente da temperatura e da umidade, etc. O projetista não possui o conhecimento exato destes fatores e, na verdade, elabora o dimensionamento com os parâmetros médios ou característicos, com um grau de risco estatístico adotado como aceitável.

A abordagem probabilística confere um grau de confiabilidade nos resultados. Considerando que os modelos de previsão dos danos e de irregularidades possuem uma distribuição probabilística do tipo Normal, dentro do intervalo de interesse do dimensionamento, é possível determinar o valor do dano para o nível de confiabilidade desejado a partir da expressão, a seguir:

$$X_{\alpha} = X_{médio} + Z_{\alpha} \cdot \delta_X \quad (7)$$

em que X_{α} : é o valor crítico para o grau de confiabilidade selecionado;

$X_{médio}$: é o valor médio esperado;

Z_{α} : é a distribuição normal padrão para $\alpha=1$ -confiabilidade; e

δ_X : é o erro padrão de X.

A variável X no caso deste trabalho é o percentual de área trincada.

Similar ao método empregado por [6] e [1], o erro padrão X da expressão acima foi calculado para diferentes intervalos de previsão de área trincada deste trabalho. A diferença de área prevista com área observada em cada segmento usado na calibração deu origem ao erro desta função transferência (FT). Após o tratamento dos dados, o erro da nova função transferência pode ser obtido por meio da regressão apresentada no gráfico da Fig. 6.

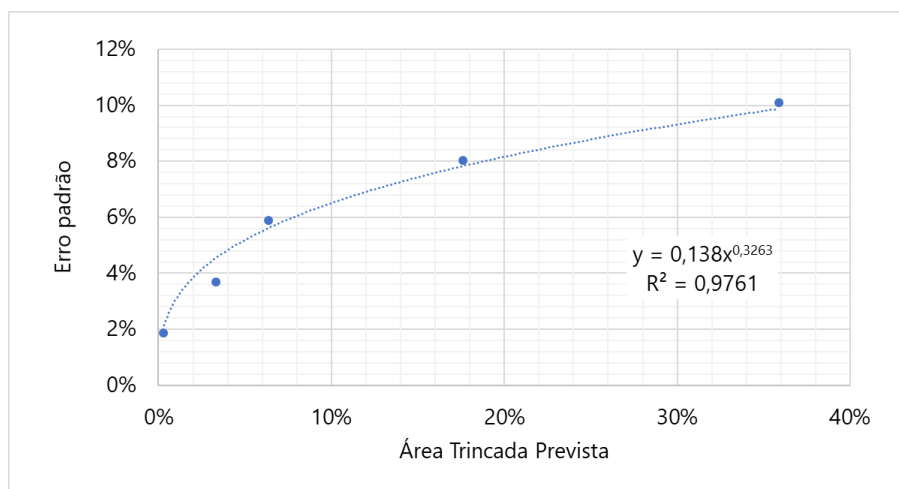


Fig. 6: Erro padrão versus área trincada prevista

O conjunto de dados usados para calibração do modelo de previsão de área trincada é considerado adequado neste momento, igualando o número de seções usado em vários países, ou mesmo superando. Porém, o esforço de recalibração deve ser permanente, visando a inclusão de novos materiais asfálticos, bem como a inclusão de novos trechos monitorados.

5 VALIDAÇÃO DA FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA

Cabe neste ponto avaliar a validade da Função Transferência estabelecida no capítulo anterior deste trabalho. A validação consiste em comparar os resultados obtidos pelo processo descrito neste trabalho, com os dados de medições reais de campo de oito seções monitoradas fora do Projeto Fundão. Os dados dos trechos monitorados, bem como os resultados obtidos pelo processo descrito no fluxograma da Fig. 5 com a estimativa de área trincada estão resumidos no Quadro 2.

Quadro 2: Dados dos trechos monitorados para Validação da Função Transferência

Trecho		NEq	AT (%) observada	AT (%) estimada	k1	k2	MR (MPa)	Fonte
1	CONCER 50/70 ESQ	2,97E+06	13,7	3,1%	2E-14	-4,079	9470	[1]
2	CONCER 50/70 DIR	1,68E+07	48,4	58,0%				
3	CONCER 30/45 ESQ	1,05E+06	4,0	2,2%	2E-11	-3,288	14954	
4	CONCER 30/45 DIR	4,20E+06	13,8	21,2%				
5	USP – Segmento 1 BR 381	2,19E+07	49,9%	44,5%	2E-10	-3,199	5004	[7]
6	USP – Segmento 2 BR 381	3,00E+07	1,0%	0,6%				
7	UFSM – Av Hélivio Basso Faixa 1	1,87E+06	1,0%	1,0%	4E-05	-1,999	4901	[8]
8	UFSM – Av Hélivio Basso Faixa 2	6,68E+06	3,2%	5,1%				

Os trechos escolhidos apresentavam todas as informações necessárias para os cálculos e, ainda, com valores de áreas trincadas superiores a 1%.

De modo geral, as estimativas de área trincada, para uma confiabilidade de 50%, apresentaram uma correlação muito boa, o que permite afirmar que a Função Transferência está bem ajustada, com base nos dados disponíveis.

Por fim, reunindo toda a base de dados utilizada para a determinação da Função Transferência, bem como os dados utilizados para a validação, é possível comparar a correlação de todas as estimativas com os dados de área trincada observados, com a Função Transferência estabelecida por [1], cujo coeficiente de determinação era $r^2 = 0,6$. Do gráfico apresentado na Fig. 7, tanto a inclinação da reta quanto o coeficiente de determinação se ajustaram bem, com um coeficiente de determinação de $r^2 = 0,85$. A nova calibração apresentada neste trabalho permitiu resolver as questões relacionadas às inconsistências nos cálculos e, ainda, conseguiu melhorar a correlação entre os valores observados e estimados.

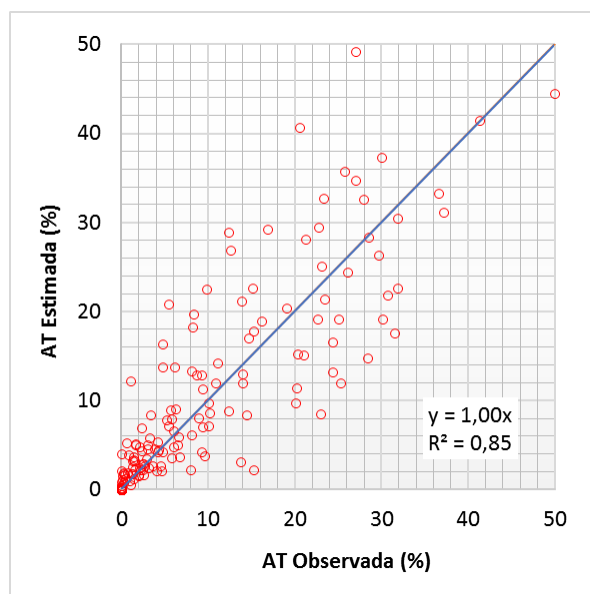


Fig. 7: Comparação da AT Observada com a AT Estimada nos segmentos utilizados na Calibração e nos segmentos utilizados na Validação.

6 CONCLUSÃO

A Função Transferência estabelecida por [1] foi um marco importante no desenvolvimento do método de dimensionamento de pavimentos, pois permitiu a utilização do programa MeDiNa com um bom grau de confiabilidade e onde os resultados obtidos eram compatíveis com dados de observações de campo.

Entretanto, uma nova abordagem matemática foi necessária, uma vez que as expressões e a metodologia algébrica para se alcançar os resultados com a Função Transferência do autor apresentou inconsistências durante a fase de testes do programa MeDiNa. As análises matemáticas nos códigos do programa MeDiNa indicaram que a alta sensibilidade era devido aos coeficientes elevados das expressões da função de transferência, a limitação do dano e a severidade do ensaio diametral para a obtenção da curva de fadiga.

Dessa forma, com base nas contribuições de [6] e [1], os dados foram analisados novamente e uma nova abordagem teórica foi aplicada, que culminou na atualização da Função Transferência, calibrada, com a curva de confiabilidade e validada.

A Função Transferência foi validada comparando-se os resultados obtidos com os observados em oito segmentos nacionais monitorados. A nova Função, além de ter melhorado a correlação entre os valores observados e estimados, soluciona as questões das inconsistências nos cálculos de dimensionamento de Estruturas, surgidas nas versões de teste do programa MeDiNa.

7 REFERÊNCIAS

1. M. A. Fritzen. *Desenvolvimento e Validação de Função de Transferência para Previsão do Dano por Fadiga em Pavimentos Asfálticos*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.
2. L. M. G. Motta, *Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001.
3. F. Lekarp; U. Isacsson; A. Dawson. State of the art. I: resilient response of unbound aggregates. *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, v. 126 (1), Jan/Feb, p. 66-75, 2000.
4. F. A. C. P. Franco. *Método de Dimensionamento Mecânico Empírico de Pavimentos Asfálticos*. Tese D.Sc., Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
5. S. Pinto. *Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1991.
6. L. A. H. Nascimento. *Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil*. Degree of Ph. D. Graduate Faculty of North Carolina State University. Raleigh – North Carolina. USA, 2015.
7. I. S. Bessa. *Laboratory and field study of fatigue cracking prediction in asphalt pavements*. Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
8. L. D. Bueno. *Contribuição para a previsão da irregularidade longitudinal em pavimentos asfálticos do sul e sudeste do Brasil*. Projeto de Tese de DSc. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018.