

Relatório de Pesquisa IPR RP – 013

**AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE
INTERFACE ENTRE AS CAMADAS DO
PAVIMENTO (ADERÊNCIA COMPLETA,
PARCIAL OU NULA) E INDICAÇÃO DAS
MUDANÇAS REALIZADAS NO
PROGRAMA MeDiNa**

**BRASÍLIA/DF
JANEIRO/2026**

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES
DIRETORIA-GERAL
DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA
INSTITUTO DE PESQUISAS EM TRANSPORTES

Relatório de Pesquisa IPR RP – 013

AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE INTERFACE ENTRE AS CAMADAS DO PAVIMENTO (ADERÊNCIA COMPLETA, PARCIAL OU NULA) E INDICAÇÃO DAS MUDANÇAS REALIZADAS NO PROGRAMA MeDiNa

Elaboração: Laboratório de Infraestrutura – INFRALAB/UnB

Termo de Execução Descentralizada - 352/2020 TED /IPR/DPP/DNIT SEDE

Processo: 50600.039998/2025-16

DOI: 10.70859/IPR-RP-013/2026

Brasília - DF

Janeiro/2026

EQUIPE TÉCNICA OU AUTOR:

Eng.º Márcio Muniz de Farias, PhD. – UnB

Eng.º Raul Tadeu Lobato Ferreira, M.Sc. – UnB

Eng.^a Andrea Cardona Pérez, D.Sc. – UnB

Eng.^a Letícia Nunes Lopes, D.Sc. – UnB

REVISÃO:

Eng.º Luiz Heleno Albuquerque Filho, DsC. – IPR

EDITORAÇÃO:

Eng.º Luiz Heleno Albuquerque Filho, DsC. – IPR

Arq. e Urb. Patrícia Cristina Cunha Nunes de Oliveira Fontoura, PhD – Consórcio Progen/HPT

Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria-geral. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação-Geral do Instituto de Pesquisas em Transportes (IPR).

Avaliação das Condições de Interface entre as Camadas do Pavimento (Aderência Completa, Parcial ou Nula) e Indicação das Mudanças Realizadas no Programa MeDiNa – Brasília, DF, 2026.

30p. (Relatório de Pesquisa – IPR RP 013)

O conteúdo apresentado neste documento é de inteira responsabilidade dos autores.

A reprodução completa ou parcial desta publicação é permitida, sem alterar seu conteúdo, desde que não tenha fim comercial e que seja citada a referência bibliográfica completa.

RESUMO

Este documento relata o conjunto de atividades de pesquisa no escopo do projeto “Aprimoramento e consolidação do método mecanístico-empírico de dimensionamento para pavimentos rodoviários flexíveis (MeDiNa) e estudos complementares com geossintéticos e drenagem para pavimentos ferroviários”, financiado pelo DNIT por meio do Termo de Execução Descentralizada - 352/2020 TED /IPR/DPP/DNIT SEDE. A execução do projeto é liderada pela Universidade de Brasília, com início em maio de 2020. As atividades aqui apresentadas são referentes à Frente Rodoviária, especificamente inseridas na Meta III – “Protocolo para uso das diversas ferramentas do Programa”, com ênfase na entrega do Produto “Avaliação das condições de interface entre as camadas do pavimento (aderência completa, parcial ou nula) e indicação das mudanças realizadas no Programa MeDiNa”.

Palavras-chave: MeDiNa; Interface; Aderência; Pavimento flexível; Função de transferência.

ABSTRACT

This document reports the set of research activities within the scope of the project “Improvement and consolidation of the mechanistic-empirical design method for flexible road pavements (MeDiNa) and complementary studies with geosynthetics and drainage for railway pavements”, funded by DNIT through the Term of Decentralized Execution - 352/2020 TED /IPR/DPP/DNIT SEDE. The execution of the project is led by the University of Brasília, starting in May 2020. The activities presented here will refer to the Road Front, specifically inserted in Goal III - "Protocol for using the program's tools ", with emphasis on delivering the Product “Assessment of the interface conditions between the pavement layers (complete, partial, or null adhesion) and indication of the changes made in the MeDiNa program”.

Keywords: MeDiNa; interface; adherence; flexible pavement; transfer function.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEMC – Análise Elástica de Múltiplas Camadas

AT – Área Trincada

C₁ e C₂ – Coeficientes de ajuste

CR – Sentido Crescente

DE – Sentido Decrescente

DIR – Direito

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

D_{medio} – Dano Médio de Fadiga

ESQ – Esquerdo

FLEX – Flexível

GEPPASV – Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária

fS – Fator de Deslocamento

IMP - Implantação

INFRALAB – Laboratório de Infraestrutura

IPR – Instituto de Pesquisas em Transportes

Ks – Módulo de Rigidez Tangente da Interfase

/ – Parâmetro adimensional do MeDiNa

MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional

n, Z – Parâmetros de Calibração do Modelo de Fadiga

PD – Pista Dupla

PS – Pista Simples

REST – Restauração

RS – Rio Grande do Sul

UFSM – Universidade Federal de Santa Maria

UnB – Universidade de Brasília

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Gráfico da relação entre o dano médio de fadiga com o fator de deslocamento (fS)	13
Figura 2 – Correlação entre AT % observada e AT % estimada	14
Figura 3 – Erro padrão versus área trincada prevista	14
Figura 4 – Gráfico da relação entre o dano médio de fadiga com o fator de deslocamento (fS) para interfaces aderidas	16
Figura 5 – Correlação entre AT % observada e AT % estimada (interfaces aderidas)	16
Figura 6 – Erro padrão <i>versus</i> área trincada prevista (interfaces aderidas)	17
Figura 7 – Funções para o cálculo do fS na versão 1.1.9 do Programa	18
Figura 8 – Estimativa de área trincada	21
Figura 9 – Estimativa de afundamento de trilha de roda	22
Figura 10 – Estimativa de área trincada considerando o erro padrão nas hipóteses de (a) interfaces sem aderência e (b) interfaces aderidas	23
Figura 11 – N correspondente à 30% de área trincada considerando o erro padrão nas hipóteses de (a) interfaces sem aderência e (b) interfaces aderidas	24
Figura 12 – Estimativa de área trincada pelas versões 1.1.9 e 2.0.0	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Segmentos experimentais monitorados pelo GEPPASV/UFSM	11
Tabela 2 – Camadas e propriedades dos materiais	21
Tabela 3 – Variação anual da área trincada e afundamento de trilha de roda	23
Tabela 4 – N correspondente a 30 % de área trincada	24
Tabela 5 – Espessura da camada de revestimento para atender ao critério de 30 % de área trincada	25

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	ESTUDO DAS CONDIÇÕES DE INTERFACE	11
2.1	ATUALIZAÇÃO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA	11
2.2	FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA PARA INTERFACES ADERIDAS	15
2.3	ALTERAÇÕES NO PROGRAMA MeDiNa.....	17
2.4	ADERÊNCIA PARCIAL.....	19
2.5	AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE INTERFACE.....	20
3	MeDiNa 2.0.0.....	26
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	28
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

1 INTRODUÇÃO

Os pavimentos são definidos como estruturas de múltiplas camadas de espessuras finitas, com finalidade de resistir técnica e economicamente aos esforços decorrentes do tráfego de veículos e das intempéries, proporcionando aos usuários boas condições de rolamento com conforto, economia e segurança (Bernucci *et al.*, 2022).

As condições de interface entre as camadas impactam significativamente o dimensionamento de pavimentos. Para o cálculo das tensões, deformações e deslocamentos, a interface entre as camadas pode ser caracterizada por um módulo de rigidez tangente (K_s), que assume valor nulo para a condição sem aderência e tende ao infinito para a condição totalmente aderida (DNIT, 2020).

Na hipótese de interfaces totalmente aderidas, as camadas do pavimento trabalham de forma conjunta na distribuição dos esforços, com uma linha neutra comum, e quando não estão completamente aderidas, se deformam de maneira independente.

Quanto maior o módulo de rigidez tangente, menores os deslocamentos relativos sob um mesmo nível de tensão, resultando em maior vida útil para o pavimento. Por outro lado, quanto menor a aderência entre camadas, maior é a possibilidade de ocorrência de defeitos que podem diminuir a vida útil da estrutura (Romanoschi; Metcalf, 2001; Khweir; Fordyce, 2003; Santos; Assis; Fernandes Júnior, 2019; Attia, 2020).

O Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa) opera com um conjunto de programas computacionais que auxiliam na análise e no dimensionamento de pavimentos, a saber: a) o Programa MeDiNa, que realiza a verificação e o dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos; b) o Programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC), que calcula tensões, deformações e outras variáveis mecanísticas em sistemas multicamadas; c) o Programa BackMeDiNa que realiza a retroanálise dos módulos de resiliência das camadas de um pavimento com base em levantamentos deflectométricos.

Para simular a aderência entre camadas, o Programa AEMC, utiliza um parâmetro adimensional (l) que se relaciona com o módulo de rigidez tangente da interface (K_s). Esse parâmetro pode variar entre 0 (zero) e 1 (um), sendo a condição não aderida correspondente ao valor de $l = 0$ (zero), e, a condição totalmente aderida, correspondente ao valor de $l = 1$ (um). Apesar da possibilidade de simular condições intermediárias de aderência, Toffoli (2021) demonstrou que o módulo de rigidez tangente (K_s) é pouco sensível ao parâmetro l , apresentando variações em relação à condição de interface sem aderência a partir do valor de $l = 0,99$.

No presente relatório são apresentadas as modificações implementadas no Programa MeDiNa, bem como avaliação do efeito das condições de aderência entre camadas nas respostas do Programa em termos de área trincada e afundamento de trilha de roda. Dessa forma, busca-se contribuir para a compreensão dos efeitos das condições de aderência sobre as respostas mecanístico-empíricas e fornecer elementos que apoiem futuras revisões e calibrações das funções de transferência do MeDiNa.

2 ESTUDO DAS CONDIÇÕES DE INTERFACE

Neste tópico do relatório de pesquisa é apresentado um estudo sobre os efeitos das condições de interface nas respostas do MeDiNa, em termos de previsão de área trincada e afundamento de trilha de roda. As alterações implementadas no Programa para realização desse estudo são descritas a seguir.

2.1 ATUALIZAÇÃO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

No âmbito do TED firmado entre o IPR e o INFRALAB/UnB, em outubro de 2024 foi realizada a atualização da base de dados utilizada por Fritzen (2016), com a inclusão de dados de segmentos experimentais do estado do Rio Grande do Sul, monitorados pelo GEPPASV/UFSM. Na Tabela 1 são apresentados os segmentos adicionados.

Tabela 1 – Segmentos experimentais monitorados pelo GEPPASV/UFSM

Identificação	Rodovia/Avenida	Cidade	Estado
UFSM 2.1	Av. Hólvio Basso	Santa Maria	Rio Grande do Sul
UFSM 2.2*	Av. Hólvio Basso	Santa Maria	Rio Grande do Sul
UFSM 6.1	BR-116	Pelotas	Rio Grande do Sul
UFSM 6.2	BR-116	Pelotas	Rio Grande do Sul
UFSM 7.2	BR-116	Pelotas	Rio Grande do Sul
UFSM 8.1	BR-116	Pelotas	Rio Grande do Sul
UFSM 8.2	BR-116	Pelotas	Rio Grande do Sul
UFSM 18.2	BR-116	Barra do Ribeiro	Rio Grande do Sul
UFSM 19.2	BR-116	Barra do Ribeiro	Rio Grande do Sul
UFSM 20.2	BR-116	Barra do Ribeiro	Rio Grande do Sul

* segmento SMARIA, considerado na atualização da função de transferência feita por Fritzen et al. (2019), atualizado e renomeado

Os segmentos incorporados ao banco de dados correspondem a trechos com camada de revestimento composta por misturas densas de concreto asfáltico, sobre base granular, identificados conforme o padrão adotado por Bueno (2019). Descrições detalhadas dos segmentos experimentais da rodovia BR-116/RS podem ser encontradas nos trabalhos de Vestena (2021) e Santos (2025).

A atualização do banco de dados do MeDiNa compreende a incorporação das medições de área trincada pelo procedimento descrito na norma DNIT 433/2021-PRO, além de outras informações fundamentais para a calibração das funções de transferência, como os parâmetros de fadiga das misturas asfálticas, as espessuras das camadas e os respectivos módulos de deformabilidade elástica.

A seleção dos trechos empregados na calibração obedeceu aos seguintes critérios:

- Disponibilidade de séries temporais de trincamento compatíveis com os métodos DNIT 007/2003-PRO e DNIT 433/2021-PRO;
- Ocorrência de trincamentos efetivos no período de monitoramento;
- Histórico construtivo conhecido ou documentado;
- Confiabilidade dos registros de deflexão, tráfego e condições estruturais;
- Compatibilidade geométrica e funcional entre os trechos analisados.

A aplicação desses critérios assegurou a representatividade estatística da amostra utilizada no processo de calibração.

A função de transferência destinada à estimativa da vida de fadiga em termos de área trincada foi atualizada com base nos seguintes pressupostos:

- Manutenção das hipóteses adotadas por Fritzen (2016);
- Replicação da abordagem metodológica empregada por Fritzen *et al.* (2019);
- Utilização da mesma função sigmoideal padrão, definida pelos parâmetros:
 - $Z = 0,25$;
 - $n = 5,00$.

A preservação desses parâmetros garante a coerência entre os modelos e a comparabilidade com calibrações anteriores.

A função de transferência atualizada é apresentada no gráfico da Figura 1 e expressa pela equação 1:

$$fS = C_1 \times (D_{\text{médio}})^{C_2} \quad (1)$$

onde fS é o fator de deslocamento; $D_{\text{médio}}$ é o dano médio de fadiga; e C_1 e C_2 são os coeficientes de ajuste da curva.

Os cálculos detalhados para calibração da função de transferência encontram-se descritos no documento “Roteiro de Instruções para Calibração da Função de Transferência do MeDiNa com a Inclusão de Novos Pontos”.

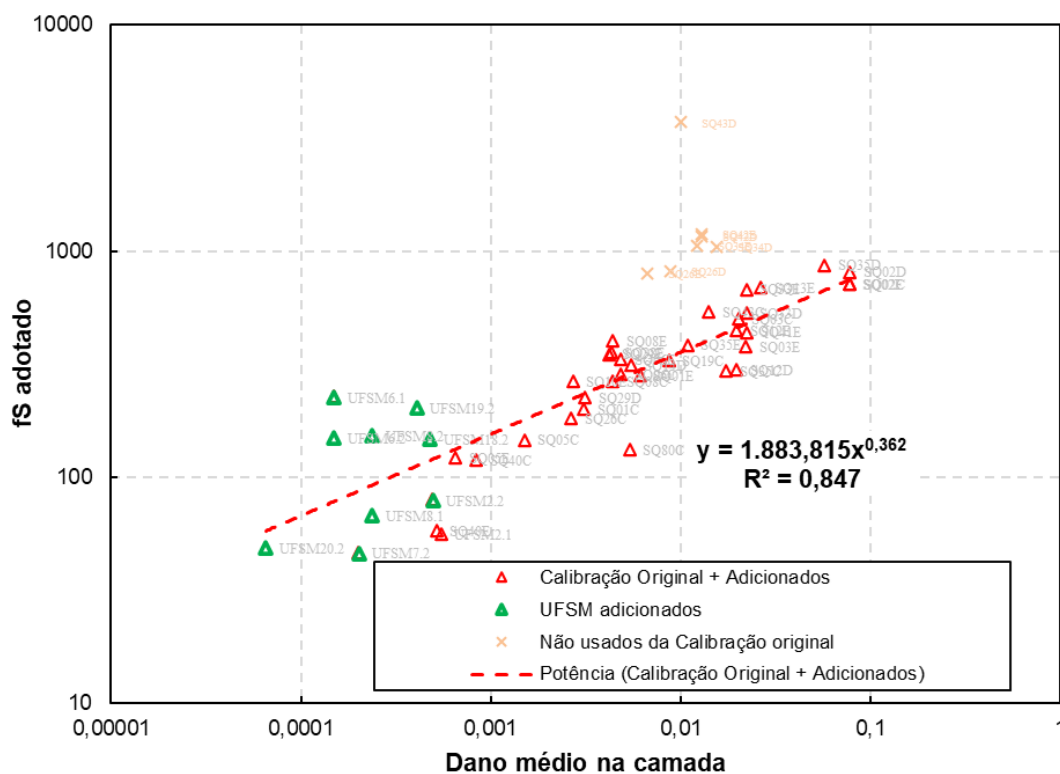


Figura 1 – Gráfico da relação entre o dano médio de fadiga com o fator de deslocamento (fS)

Na Figura 2 é apresentada a correlação entre a área trincada medida em campo e a área trincada estimada com a função de transferência atualizada.

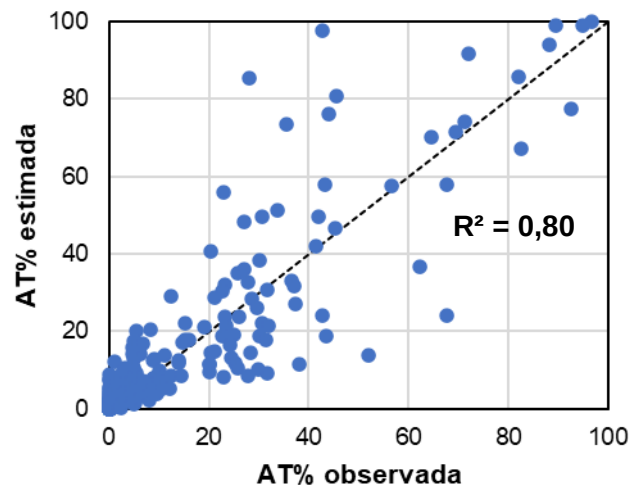


Figura 2 – Correlação entre AT % observada e AT % estimada

Levando em conta o mesmo método empregado por Fritzen *et al.* (2019) também foi obtida uma função para o cálculo do erro padrão, apresentada no gráfico da Figura 3.

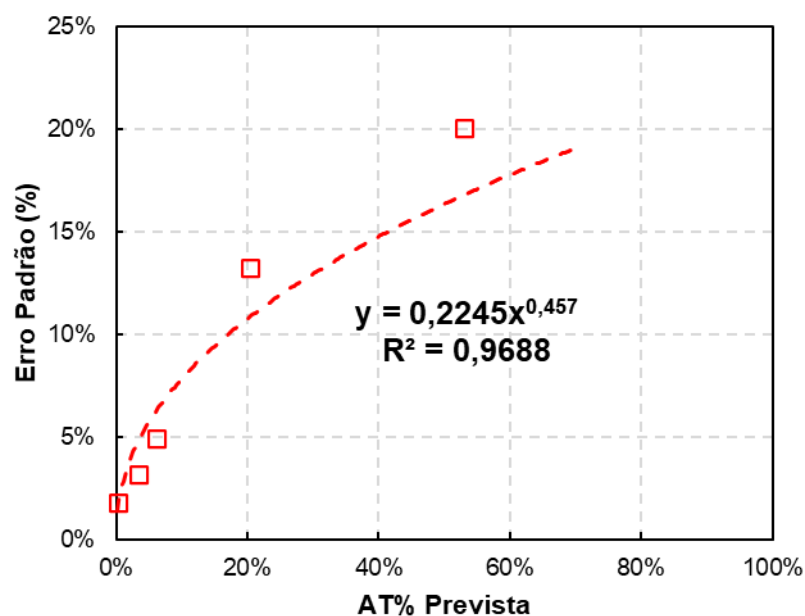


Figura 3 – Erro padrão versus área trincada prevista

2.2 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA PARA INTERFACES ADERIDAS

O cálculo do dano médio utilizado na calibração da função de transferência seguiu as mesmas hipóteses adotadas por Fritzen (2016), particularmente no que se refere à condição de aderência entre camadas. Assim como na função de transferência apresentada por Fritzen *et al.* (2019), admitiu-se que, para a maior parte dos segmentos avaliados, as interfaces comportam-se como não aderidas.

As mesmas hipóteses foram aplicadas à retroanálise dos módulos de resiliência, utilizada para caracterização estrutural dos trechos integrantes da base de dados. Dessa forma, o conjunto de parâmetros mecânicos obtidos permanece coerente com o estado de aderência considerado nas calibrações anteriores.

Com objetivo de propor uma função de transferência aplicável à hipótese de interfaces totalmente aderidas, foi necessário estabelecer procedimento em duas etapas:

- a) Cálculo das bacias de deslocamentos verticais recuperáveis, utilizando os módulos previamente retroanalizados sob a hipótese de interfaces não aderidas;
- b) Retroanálise complementar dos módulos de resiliência, assumindo agora a hipótese de interfaces totalmente aderidas entre as camadas.

Esse procedimento permitiu a obtenção de um novo conjunto de módulos de resiliência condizente com o estado de aderência pleno, garantindo a consistência entre a caracterização estrutural e o modelo empírico-mecânico a ser calibrado.

A partir dos módulos retroanalizados assumindo interfaces totalmente aderidas, ocorreu a calibração da função de transferência para essa condição, mantendo-se:

- a mesma metodologia geral descrita por Fritzen *et al.* (2019);
- o mesmo formato de função sigmoideal padrão, definido pelos parâmetros:
 - $Z = 0,25$;
 - $n = 5,00$.

A adoção desses parâmetros garante a comparabilidade entre as funções propostas para condições aderidas e não aderidas, permitindo a avaliação das diferenças estruturais resultantes do estado de aderência adotado no processo de modelagem.

A função de transferência para interfaces aderidas é apresentada na Figura 4. Na Figura 5 é apresentada a correlação entre a área trincada medida em campo e a área trincada estimada, e na Figura 6 a função para o cálculo do erro padrão.

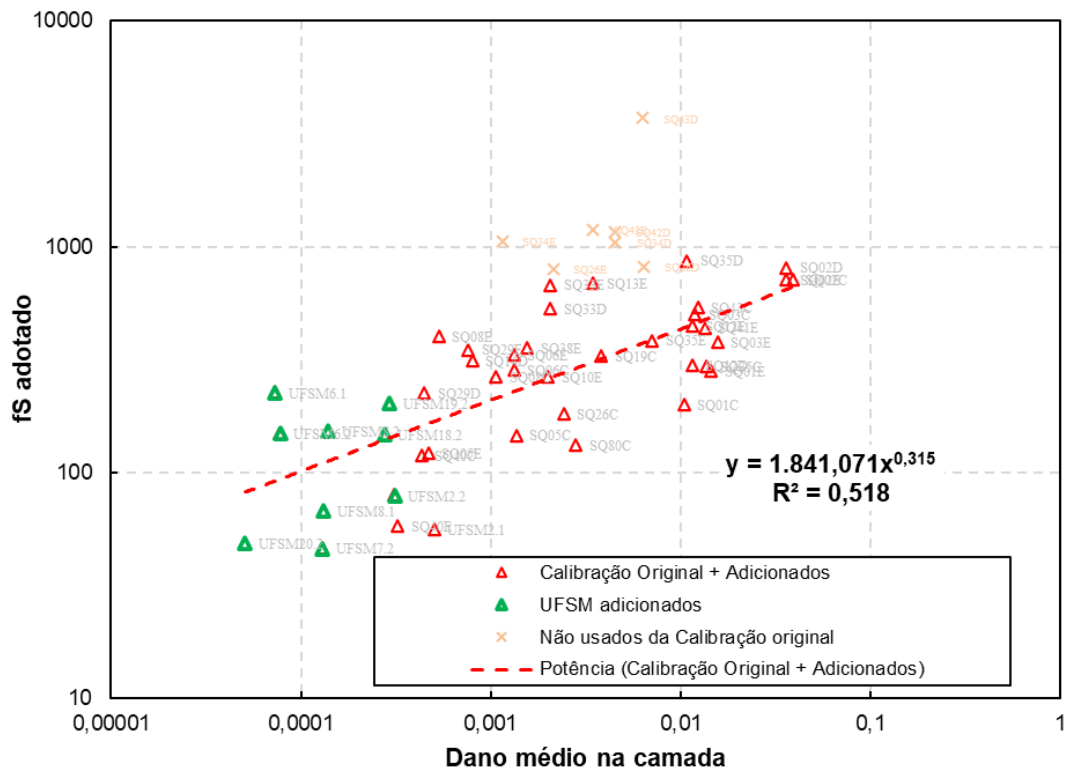


Figura 4 – Gráfico da relação entre o dano médio de fadiga com o fator de deslocamento (fS) para interfaces aderidas

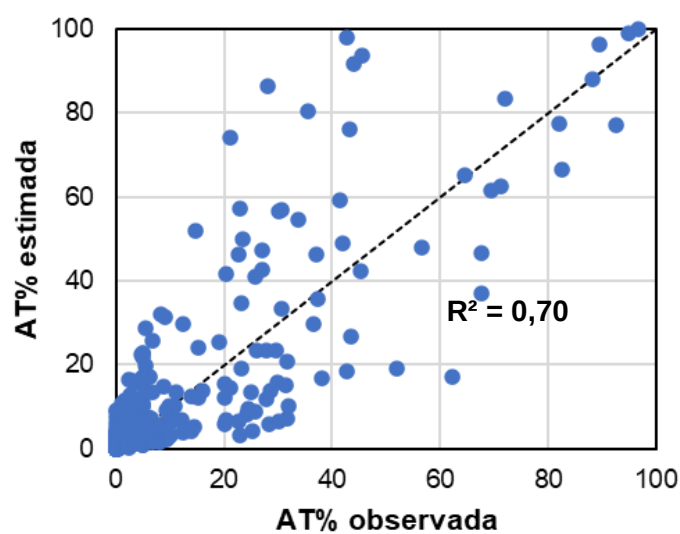


Figura 5 – Correlação entre AT % observada e AT % estimada (interfaces aderidas)

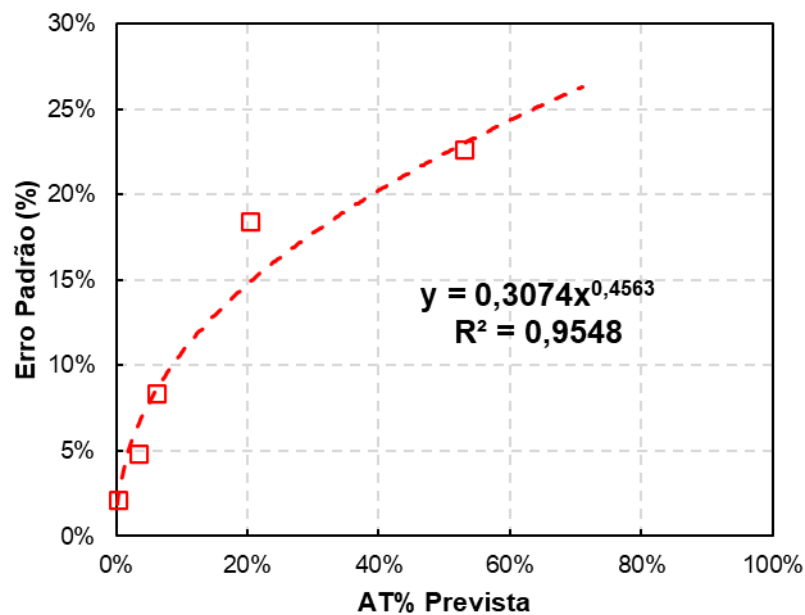


Figura 6 – Erro padrão *versus* área trincada prevista (interfaces aderidas)

2.3 ALTERAÇÕES NO PROGRAMA MeDiNa

A versão 1.1.9 do Programa MeDiNa foi modificada, no âmbito do TED firmado entre o IPR e o INFRALAB/UnB, exclusivamente para fins de pesquisa, não constituindo necessariamente uma versão destinada ao uso geral. As alterações no código permitiram obter estimativas de área trincada e de afundamentos de trilha de roda sob diferentes condições de aderência e funções de transferência.

As modificações possibilitaram a inserção do coeficiente l , dos parâmetros da curva sigmoide (Z e n), dos coeficientes de ajuste da função de transferência (C_1 e C_2), bem como dos coeficientes da função de cálculo do erro padrão.

Essas alterações foram feitas de modo que os valores inseridos passaram a ser associados diretamente às variáveis internas correspondentes na rotina de cálculos do Programa. Na versão original (1.1.9), esses parâmetros permanecem fixos, definidos segundo as hipóteses de aderência entre camadas propostas por Fritzen (2016) e a calibração de Fritzen *et al.* (2019).

A rotina de cálculo do Programa MeDiNa também foi modificada. Na versão 1.1.9, a função de transferência calibrada por Fritzen *et al.* (2019) é utilizada no cálculo do fator de deslocamento (fS) para os casos em que o dano médio é maior ou igual a 1×10^{-3} . Para valores inferiores a esse limite, C_1 e C_2 são fixados em 150000 e 1, respectivamente, como representado na Figura 7.

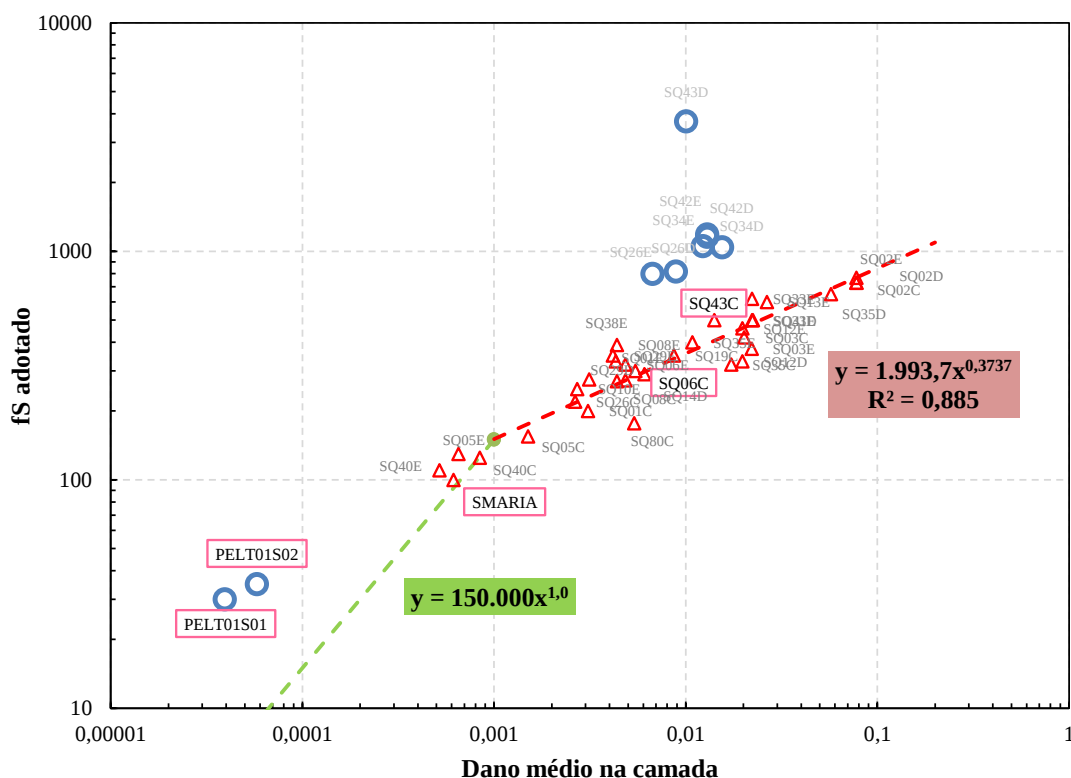


Figura 7 – Funções para o cálculo do fS na versão 1.1.9 do Programa

No presente estudo, esse critério foi removido, permitindo que o fator de deslocamento (fS) fosse calculado com os valores de C_1 e C_2 estipulados nos diferentes cenários avaliados, independentemente do dano médio.

A acurácia das modificações foi verificada pela comparação entre as estimativas de área trincada obtidas na versão modificada do Programa MeDiNa e aquelas calculadas manualmente em planilha eletrônica, observando-se resultados consistentes que confirmam a correta implementação das alterações no código.

2.4 ADERÊNCIA PARCIAL

Embora o Programa MeDiNa modificado permita atribuir valores intermediários ao coeficiente de aderência (I , variando entre 0 e 1), o presente relatório apresenta funções de transferência apenas para as condições extremas de aderência:

- sem aderência;
- totalmente aderido.

Essa delimitação metodológica decorre das restrições associadas ao processo de caracterização estrutural dos segmentos utilizados na calibração.

As misturas asfálticas dos trechos avaliados foram caracterizadas por meio de ensaios laboratoriais, enquanto os módulos de resiliência das demais camadas foram obtidos por retroanálise. Dessa forma, a consistência entre as hipóteses de aderência e os parâmetros estruturais depende diretamente das limitações impostas pelas ferramentas de retroanálise disponíveis.

A calibração de uma função de transferência que considere estados intermediários de aderência, de forma análoga às funções apresentadas nos itens anteriores, exigiria que essa condição também fosse incorporada ao processo de retroanálise. Entretanto, verifica-se que o Programa BackMeDiNa, ferramenta oficial para retroanálise no âmbito do MeDiNa, admite apenas duas condições de interface entre as camadas, ou seja, as condições aderida e não aderida. Assim, a representação de valores intermediários de aderência ($0 < I < 1$) não pode ser implementada na etapa de retroanálise, inviabilizando, no estado atual da ferramenta, a determinação coerente dos módulos correspondentes a esses níveis de aderência.

Uma alternativa metodológica para a calibração de funções de transferência em condição de aderência parcial consistiria na utilização de segmentos cujos módulos de resiliência de todas as camadas (revestimento, base, sub-base e subleito) fossem determinados experimentalmente, dispensando qualquer hipótese de retroanálise.

Nessa abordagem, o nível de aderência parcial seria especificado diretamente no cálculo das deformações, o coeficiente de aderência I poderia assumir valores intermediários ($0 < I < 1$), as deformações resultantes seriam compatíveis com o estado real de contato entre camadas e a função de transferência poderia ser calibrada sem a necessidade de ajuste prévio por retroanálise.

Essa solução, embora teoricamente adequada, demanda bases experimentais altamente especializadas e está condicionada à disponibilidade de segmentos instrumentados e caracterizados integralmente em laboratório e campo.

Ressalta-se que condições frequentes em diversas regiões do Brasil, tais como subleitos rochosos, formações lateríticas muito rígidas ou camadas granulares executadas com macadame hidráulico ou técnicas afins, dificultam ou inviabilizam a determinação experimental completa dos módulos de todas as camadas da estrutura.

Essas particularidades geológicas e construtivas limitam a viabilidade da abordagem experimental em âmbito nacional, reforçando a necessidade de que futuras metodologias considerem as restrições operacionais das ferramentas de retroanálise e a heterogeneidade dos materiais empregados nas obras rodoviárias brasileiras.

2.5 AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE INTERFACE

Para avaliar o comportamento das funções de transferência apresentadas nos itens 2.1 e 2.2, especialmente quanto ao efeito das condições de aderência nas estimativas de área trincada e afundamento de trilha de roda obtidas no Programa MeDiNa, foi proposta uma estrutura de pavimento flexível, cujas propriedades são apresentadas na Tabela 2. Admitiu-se comportamento elástico linear para todas as camadas, e os materiais pertencem ao banco de dados pré-configurado no Programa MeDiNa.

As estimativas mensais de área trincada e de afundamento de trilha de roda foram obtidas considerando um período de projeto de 10 anos, N anual (1º ano) igual a 1×10^6 , e N Total igual a 1×10^7 . Na Figura 8 é apresentado o comparativo entre as estimativas de área trincada (desconsiderando o erro padrão) e na Figura 9 as estimativas de afundamento de trilha de roda.

Tabela 2 – Camadas e propriedades dos materiais

Camada	Descrição	Módulo de Resiliência	Coefficiente de Poisson	Espessura
Revestimento	RJ - CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba	9.000 MPa	0,30	10,0 cm
Base	Brita graduada de gnaiss C5	381 MPa	0,35	20,0 cm
Sub-base	Solo argiloso LG'(1)	250 MPa	0,45	20,0 cm
Subleito	Solo siltoso NS'	189 MPa	0,45	-

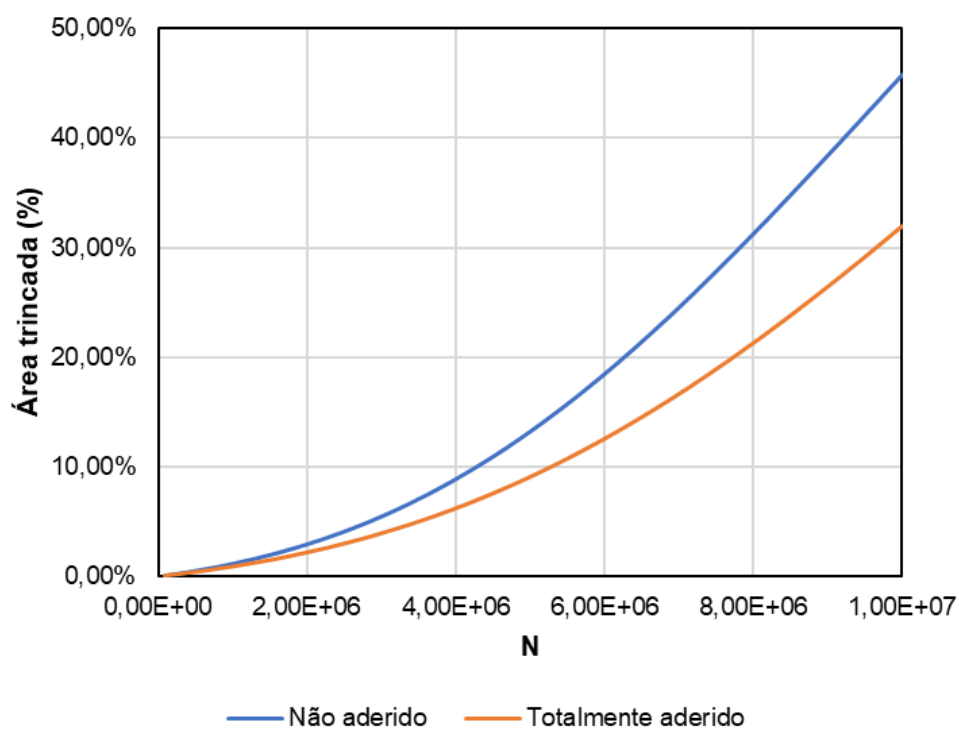


Figura 8 – Estimativa de área trincada

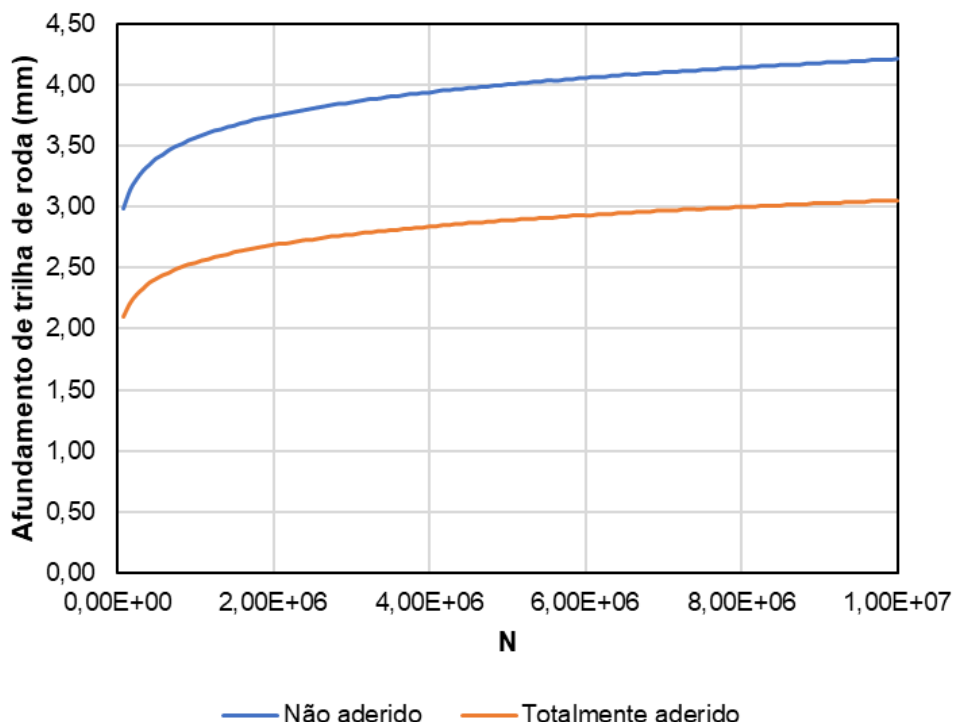


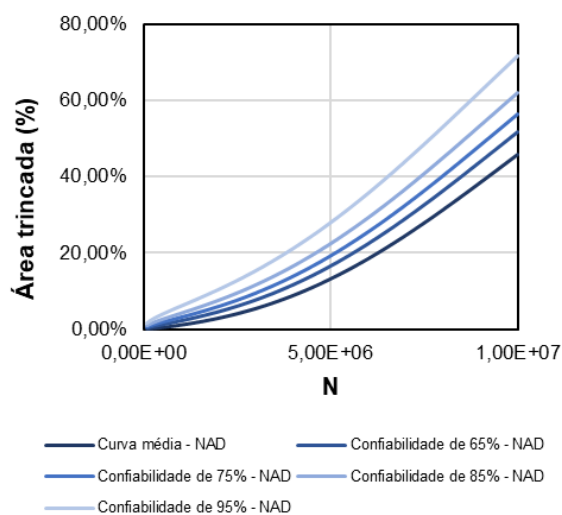
Figura 9 – Estimativa de afundamento de trilha de roda

Observa-se que, para o tráfego e a estrutura de pavimento propostos, as estimativas de área trincada e de afundamento de trilha de roda considerando a hipótese de interfaces totalmente aderidas são menores que para a hipótese de interfaces sem aderência. Na Tabela 3 é apresentada a variação das estimativas anuais de área trincada e de afundamento de trilha de roda.

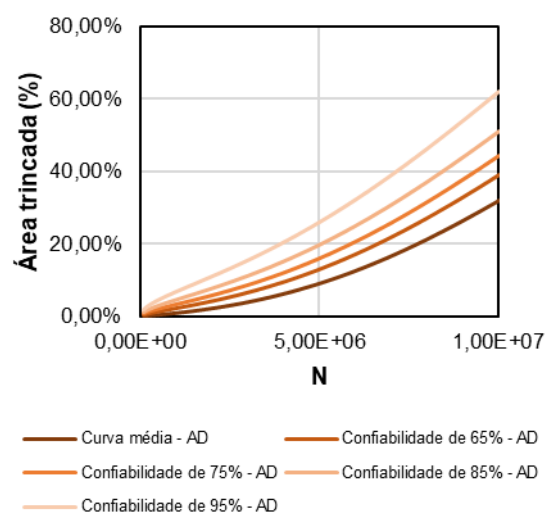
Com base nos resultados apresentados, nota-se que, no exemplo proposto, a área trincada prevista para a hipótese de interfaces aderidas, é cerca de 20 % a 30 % menor que a estimativa para a hipótese de interfaces sem aderência. Em relação aos afundamentos de trilha de roda, nota-se uma variação média da ordem de 28 %. Na Figura 10 são apresentadas as estimativas mensais de área trincada considerando os níveis de confiabilidade predefinidos no Programa MeDiNa.

Tabela 3 – Variação anual da área trincada e afundamento de trilha de roda

Ano	Área trincada (%)			Afundamento de trilha de roda (mm)		
	Não aderido (1)	Aderido (2)	Variação (%) $[(2)-(1)]/(1)$	Não aderido (1)	Aderido (2)	Variação (%) $[(2)-(1)]/(1)$
1	1,17 %	0,90 %	-23,08 %	3,57	2,54	-28,85 %
2	2,95 %	2,19 %	-25,76 %	3,75	2,69	-28,27 %
3	5,48 %	3,94 %	-28,10 %	3,86	2,77	-28,24 %
4	8,90 %	6,23 %	-30,00 %	3,94	2,84	-27,92 %
5	13,24 %	9,10 %	-31,27 %	4,01	2,89	-27,93 %
6	18,50 %	12,59 %	-31,95 %	4,06	2,93	-27,83 %
7	24,57 %	16,69 %	-32,07 %	4,11	2,97	-27,74 %
8	31,29 %	21,34 %	-31,80 %	4,15	3,00	-27,71 %
9	38,45 %	26,49 %	-31,11 %	4,18	3,03	-27,51 %
10	45,79 %	32,02 %	-30,07 %	4,22	3,05	-27,73 %



(a)



(b)

Figura 10 – Estimativa de área trincada considerando o erro padrão nas hipóteses de (a) interfaces sem aderência e (b) interfaces aderidas

Em uma análise qualitativa inicial observa-se que ao final do período de projeto considerado, a estimativa de área trincada considerando a hipótese de interfaces totalmente aderidas é menor para todos os níveis de confiabilidade. A versão 1.1.9 do Programa MeDiNa define como um dos critérios de parada de dimensionamento, o limite máximo de 30% de área trincada, para todos os níveis de confiabilidade.

Na Figura 11 e na Tabela 4 são respectivamente apresentados os valores de N correspondentes a esse limite, nas duas condições de aderência avaliadas, considerando os níveis de confiabilidade predefinidos.

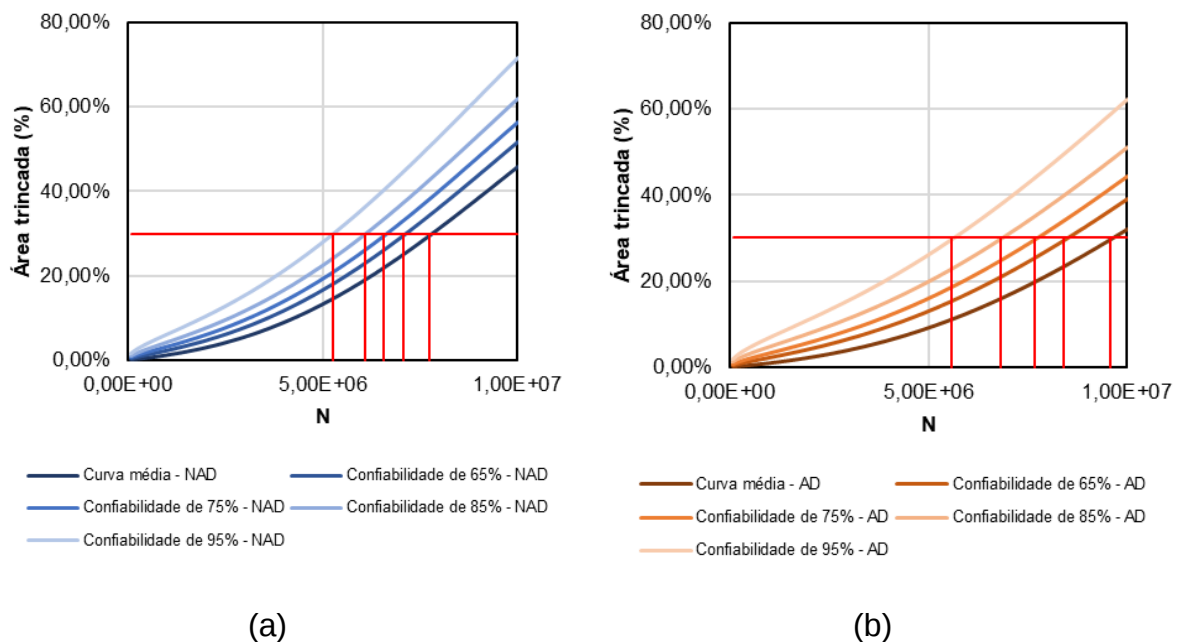


Figura 11 – N correspondente à 30 % de área trincada considerando o erro padrão nas hipóteses de (a) interfaces sem aderência e (b) interfaces aderidas

Tabela 4 – N correspondente a 30% de área trincada

Confiabilidade	Interfaces sem aderência	Interfaces aderidas
Curva média	7,75E+6	9,58E+6
65 %	7,08E+6	8,42E+6
75 %	6,58E+6	7,67E+6
85 %	6,08E+6	6,83E+6
95 %	5,25E+6	5,58E+6

Os valores apresentados permitem inferir que no dimensionamento de uma estrutura considerando a combinação de materiais e tráfego propostos (Tabela 1), e mantendo fixas as espessuras das camadas de base e sub-base, para atender ao critério de máxima área trincada admissível (30 %), a espessura de revestimento asfáltico seria menor para a condição de interfaces aderidas, em todos os níveis de confiabilidade. Essa verificação foi realizada a partir do dimensionamento da estrutura no Programa MeDiNa modificado, os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Espessura da camada de revestimento necessária para atender ao critério de 30 % de área trincada

Confiabilidade	Interfaces sem aderência	Interfaces aderidas
Curva média	12,0 cm	5,0 cm
65 %	13,0 cm	5,0 cm
75 %	13,5 cm	5,5 cm
85 %	14,5 cm	7,0 cm
95 %	15,5 cm	9,0 cm

Para a combinação de materiais e o tráfego proposto, a espessura de revestimento necessária para atender ao critério de 30 % de área trincada é menor para a condição de interfaces aderidas, em todos os níveis de confiabilidade. Excetuando-se o caso de 95 % de confiabilidade, a espessura de revestimento asfáltico requerida para a condição de interfaces aderidas é inferior à metade daquela necessária considerando interfaces sem aderência.

3 MeDiNa 2.0.0

A versão 2.0.0 do Programa MeDiNa, lançada em outubro de 2025, incorpora alterações na função sigmoide utilizada na estimativa de área trincada, fundamentadas na metodologia proposta por Almeida *et al.* (2024). Com base nessa metodologia, nos dados contidos no Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP) e em dados parciais dos segmentos experimentais PRO-MeDiNa, o parâmetro Z da curva sigmoide foi alterado para 0,45, mantendo-se n igual a 5. Nessa versão, os coeficientes C_1 e C_2 , a função para o cálculo do erro padrão e as condições de aderência pré-definidas foram mantidos fixos, sem possibilidade de edição pelo usuário. Sendo assim, as estimativas de afundamento de trilha de roda apresentadas pela versão 2.0.0 não diferem das apresentadas pela versão 1.1.9.

Para ilustrar o efeito desse ajuste, foram obtidas as estimativas mensais de área trincada para a estrutura apresentada na Tabela 2, considerando o mesmo tráfego e período de projeto avaliados no item 2.5. Na Figura 12 é apresentado o comparativo entre as estimativas de área trincada obtidas pelas versões 1.1.9 e 2.0.0, desconsiderando o erro padrão.

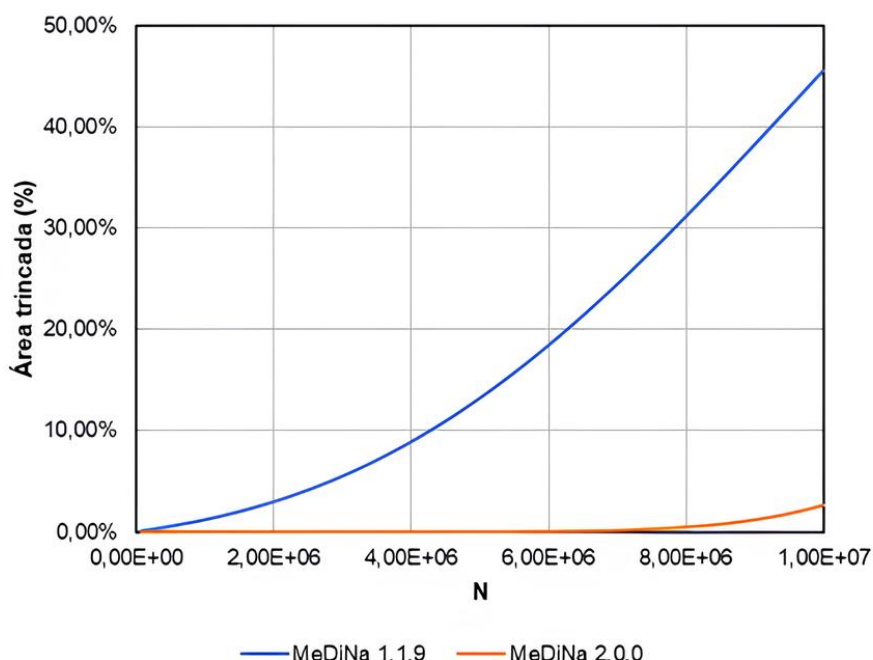


Figura 12 – Estimativa de área trincada pelas versões 1.1.9 e 2.0.0

A diferença observada entre as estimativas de área trincada apresentadas pelas versões 1.1.9 e 2.0.0. pode ser atribuída ao fato de que o ajuste proposto por Almeida *et al.* (2024) considera, de forma indireta, tanto a metodologia de medição de área trincada quanto as condições de aderência.

A nova curva sigmoide foi definida avaliando os dados da calibração convertidos de frequência de ocorrência, conforme procedimento descrito na norma DNIT 433/2021-PRO, para porcentagem de área trincada, segundo metodologia semelhante à da norma DNIT 007/2003-PRO. Esses dados foram comparados com registros do SGP e as curvas sigmoides idealizadas como possíveis ajustes foram definidas observando resultados parciais dos segmentos experimentais PRO-MeDiNa. Os resultados apresentados por Almeida *et al.* (2024) demonstram que as áreas trincadas quantificadas pela norma DNIT 433/2021-PRO são significativamente maiores do que aquelas obtidas pela norma DNIT 007/2003-PRO, o que explica as diferenças observadas entre as versões do Programa.

A definição da nova curva sigmoide também considerou comparações entre estruturas dimensionadas segundo o método MeDiNa, considerando as curvas sigmoides idealizadas como possíveis ajustes, e dimensionamentos de referência, que consistiram em uma avaliação mecanística considerando modelos preditivos fechados disponíveis na literatura. Nessa avaliação, as variáveis mecanísticas foram calculadas considerando interfaces totalmente aderidas.

Além da alteração da curva sigmoide, a versão 2.0.0 apresenta uma base de dados padrão ampliada em relação à versão anterior, incorporando resultados de ensaios de novos materiais. A rotina de cálculo também foi modificada, de modo que o fator de deslocamento passou a ser calculado em função de C_1 e C_2 , independentemente do dano médio.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No estudo das condições de interface, o Programa MeDiNa foi modificado para permitir a consideração de hipóteses diferentes das estabelecidas na versão 1.1.9, possibilitando a alteração dos parâmetros de calibração e diferentes condições de aderência. Sendo válido ressaltar a importância da compatibilidade entre essas variáveis.

A função de transferência, considerando as mesmas hipóteses adotadas por Fritzen *et al.* (2019), foi atualizada com a inserção de pontos em uma faixa de dano médio pouco contemplada na versão anterior. Além disso, uma função de transferência foi calibrada adotando a hipótese de interfaces totalmente aderidas.

Em todas as análises, a hipótese de interfaces sem aderência se mostrou mais conservadora com a previsão de maiores afundamentos de trilha de roda e maior porcentagem de área trincada. Apesar de favorável à integridade da estrutura, a hipótese de interfaces sem aderência pode gerar impactos econômicos significativos em termos de custo de implantação da rodovia.

A diferença nos resultados ao considerar ou desconsiderar aderência nas interfaces, ressalta a importância do estudo desse assunto. A decisão quanto à hipótese a ser considerada deve ser embasada na validação do estudo apresentado nesse relatório, comparando as estimativas obtidas pelas funções de transferência propostas, com dados de medições em segmentos monitorados, distintos daqueles que compõem a base de dados atualizada.

As estimativas de área trincada obtidas pela versão 2.0.0 do Programa MeDiNa são consideravelmente menores que aquelas obtidas pela versão anterior (1.1.9). Isso pode ser atribuído ao fato de que a proposta de ajuste apresentada por Almeida *et al.* (2024) considera de forma indireta, não apenas, as condições de interface, mas também, a metodologia de medição de área trincada. No entanto, vale ressaltar que as estimativas de afundamento de trilha de roda obtidas pela nova versão não diferem das apresentadas pela versão anterior.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- a) ALMEIDA, M. S. de S.; COSTA, W. G. S.; BRESSANIN, H. W.; WARGHA FILHO, N.; MELLO, L. G. R. Proposta de ajuste da função sigmoideal e área trincada do MeDiNa usando dados da gerência de pavimentos e de segmentos experimentais. ENINFRA, 3(3): 35-52, 2024.
- b) ATTIA, T. Interfaces between pavement layers in bituminous mixtures. 2020. 350 f. PhD Thesis, Université de Lyon, Lyon, France.
- c) BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2022. 756 p.
- d) BUENO, L. D. Contribuição para a previsão empírico-mecanicista da irregularidade longitudinal e seus desdobramentos econômicos em pavimentos asfálticos. 370 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS, 2019.
- e) DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 007/2003 – PRO. Levantamento para avaliação da condição de superfície de subtrecho homogêneo de rodovias de pavimentos flexíveis e semi-rígidos para gerência de pavimentos e estudos e projetos – Procedimento. Rio de Janeiro. 2003. 11 p.
- f) DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método de análise mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos. Rio de Janeiro. 2020. 78 p.
- g) DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 433/2021 – PRO. Pavimentação – Levantamento do percentual de área trincada e de afundamento de trilha de roda de pavimento asfáltico em trechos experimentais, monitorados ou trechos homogêneos de curta extensão – Procedimento. Brasília. 2021. 9 p.

- h) FRITZEN, M. A. Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão do dano por fadiga em pavimentos asfálticos. 2016. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 262 p.
- i) FRITZEN, M.A.; FRANCO, F.A.C.P.; MOTTA, L.M.G.; UBALDO, M.O. Atualização da Função de Transferência do Dano de Fadiga para a Área Trincado do Programa Medina. In: Congresso Rodoviário Português, 9., 2019, Lisboa, Portugal. Anais [...]. Lisboa, Portugal: Centro Rodoviário Português, 2019.
- j) KHWEIR, K.; FORDYCE, D. Influence of layer bonding on the prediction of pavement life. *Transport*, v. 156, n. 2, p. 73-83, 2003.
- k) ROMANOSCHI, S. A.; METCALF, J. B. Characterization of Asphalt Concrete Layer Interfaces. *Transportation Research Record*, v. 1778, n. 1, p. 132-139, 2001.
- l) SANTOS, A. G.; ASSIS, R. K. M.; FERNANDES JÚNIOR, J. L. Efeito da aderência entre camadas na previsão de desempenho de pavimentos asfálticos. *Transportes*, v. 27, n. 2, p. 89-101, 2019.
- m) SANTOS, M. S. Análise do Desempenho à Fadiga de Pavimentos Asfálticos com Ligante Convencional e Modificado em Trechos Monitorados no Rio Grande do Sul. 2025. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS, 237 p.
- n) TOFFOLI, C. M. Dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos: influência da condição de aderência na interface. 2021. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 80 p.
- o) VESTENA, P. M. Segmentos experimentais na BR 116/RS empregando TLAFLEX, HIMA e 55/75-E (SBS): caracterização avançada e monitoramento. 2021. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS, 273 p.