Instituto de Pesquisas em Transportes

Relatório de Pesquisa IPR RP – 035

SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS ESTRUTURAS DE PAVIMENTO SOB SOLICITAÇÃO DINÂMICA

BRASÍLIA

OUTUBRO/2026

DNIT DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES

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 – 035

SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS ESTRUTURAS DE PAVIMENTO SOB SOLICITAÇÃO DINÂMICA

Elaboração: Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Contrato: TED nº 702/2020

Processo: SEI nº 50600.008500/2026 - 46

DOI: 10.70859/IPR-RP-035/2026

Brasília/DF

OUTUBRO/2026

AUTORIA:

Eng.° Breno Salgado Barra, Dr. – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Eng.° Gustavo Garcia Otto, Dr. – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Eng.° João Victor Staub de Melo, Dr. – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Eng.ª Luciana Rohde, Dra. – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Eng.° Yader Alfonso Guerrero Pérez, Dr. – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Eng.° Wellington Longuini Repette, Dr. – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

REVISÃO:

Eng.° Luiz Heleno Albuquerque Filho – IPR/DPP/DNIT

Eng.° Galileu Silva Santos – IPR/DPP/DNIT

Eng.° Huri Alexandre Raimundo – IPR/DPP/DNIT

EDITORAÇÃO:

Eng.ª Simoneli Fernandes Mendonça – IPR/DPP/DNIT

Eng.º Marcos Felipe Veverka Faria – Consórcio Progen/HPT

Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.
Diretoria-geral. Diretoria de Planejamento e Pesquisa.
Instituto de Pesquisas em Transportes.

Simulação do comportamento mecânico das estruturas de pavimento sob solicitação dinâmica – Brasília/DF, 2026.

104p. (Relatório de Pesquisa – IPR RP 035)

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.

APRESENTAÇÃO

A partir do Termo de Execução Descentralizada (TED) nº 702/2020, firmado entre o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), foi acordado o desenvolvimento do projeto intitulado “Avaliação do Comportamento Viscoelástico Linear de Misturas Asfálticas no Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários Submetidos a Carregamento Dinâmico”, compreendendo a parceria técnico-executiva entre o Laboratório de Transportes e Logística (LabTrans), do campus de Florianópolis/SC, o Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav), do campus de Joinville/SC, e o Laboratório de Pavimentação (LabPav), do campus de Florianópolis/SC, todos integrados à UFSC.

Neste contexto, a realização dos estudos que perfazem o referido projeto considera, em seu escopo, o desenvolvimento de estudos quanto à influência do comportamento viscoelástico linear de misturas asfálticas no dimensionamento de estruturas de pavimento em regime dinâmico de solicitação, compreendendo as seguintes vertentes: temperatura crítica de dissipação de energia sob a forma de calor; frequência de aplicação do carregamento; habilidade de compactação; resistência à ação da água; deformação permanente; e módulo complexo e fadiga. Tais estudos têm o intuito de colaborar com o Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) na elaboração da nova metodologia de dimensionamento de pavimentos de concreto asfáltico para o Brasil.

Para tanto, as atividades previstas no Plano de Trabalho são elencadas a seguir:

- Atividade A – Compra de equipamentos e ações de adaptação dos laboratórios;
- Atividade B – Estudo do comportamento reológico e mecânico em misturas de concreto asfáltico;
- Atividade C – Avaliação de parâmetros influentes na formulação de misturas asfálticas e no dimensionamento de pavimento de concreto asfáltico;
- Atividade D – Aplicação da metodologia proposta nas rotinas numéricas de dimensionamento das estruturas de pavimento.

O andamento para cada uma das quatro atividades será apresentado em Relatórios Gerenciais quadrimestrais e os resultados serão consolidados nos produtos previstos no Plano de Trabalho do TED nº 702/2020. O presente documento corresponde ao Relatório de Pesquisa 035 (RP – 035) “Simulação do Comportamento Mecânico de Estruturas de Pavimento sob Solicitação Dinâmica”.

O conteúdo do RP – 035 abrange a aplicação dos resultados obtidos no escopo da campanha experimental pactuada entre as partes envolvidas na execução do referido TED, devidamente apresentados no RP – 033 e RP – 034, nas rotinas das simulações numéricas correspondentes à metodologia francesa e ao Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa).

No que diz respeito ao método francês, as premissas técnicas consideradas constam no conteúdo descrito no RP – 032, enquanto para o MeDiNa foram tomadas como base as instruções pertinentes ao Manual de Ajuda – Versão 1.1.9, obtido em plataforma do DNIT/IPR dedicada ao tema.

Além disso, são considerados cenários comparativos entre as metodologias supracitadas, a partir de simulações numéricas compreendendo análises elásticas lineares estacionárias, bem como viscoelásticas lineares sob carregamento dinâmico, com o uso das ferramentas computacionais *Viscoanalyse ver. Beta*, *Alizé*, *Viscoroute 2.0* e MeDiNa 1.1.9.0, esta última sendo a versão mais recente disponível na plataforma do IPR à época da elaboração deste RP – 035.

Cabe destacar também a proposição de um modelo simplificado preliminar para a determinação da temperatura equivalente, a abordagem sobre o impacto da não aderência entre as camadas subjacentes às asfálticas na vida útil das estruturas de pavimento, bem como o estudo do tráfego e do material de subleito da rodovia BR–280/SC, localizada em Santa Catarina, tomada como estudo de caso para a adaptação das simulações numéricas apresentadas. Logo, o RP – 035 foi produzido no contexto de uma ferramenta técnico consultiva, capaz de contribuir com o corpo técnico do DNIT na tomada de decisões quanto aos critérios a serem adotados para a implantação da nova metodologia de dimensionamento de pavimentos para o Brasil.

RESUMO

O objetivo principal do Relatório de Pesquisa 035 (RP – 035) é apresentar a aplicação dos resultados obtidos na campanha experimental desenvolvida e apresentada no escopo das metodologias francesa e MeDiNa (RP – 033 e RP – 034), nas rotinas das simulações numéricas para fins de dimensionamento das estruturas de pavimento de concreto asfáltico. Para tanto, foi considerado o estudo do tráfego e do solo pertinente ao subleito do projeto de duplicação da rodovia BR–280/SC, em Santa Catarina, devido à disponibilidade das informações e materiais pelo DNIT, visando dispor de um contexto real para análise dos cenários comparativos entre as soluções propostas em cada caso. No que diz respeito ao arcabouço técnico das metodologias de dimensionamento estudadas, tem-se que a francesa abrangeu o conteúdo apresentado no RP – 032, enquanto o MeDiNa as instruções pertinentes ao Manual de Ajuda – Versão 1.1.9, constante na plataforma do DNIT/IPR. Foram consideradas rotinas numéricas simulando cenários com base na elasticidade linear com aplicação de carregamento estacionário, e na viscoelasticidade linear com solicitação sob carga dinâmica, com o uso das ferramentas computacionais de cálculo *Viscoanalyse ver. Beta*, *Alizé*, *Viscoroute 2.0* e MeDiNa 1.1.9.0. Destaca-se também a proposição de um modelo simplificado preliminar para a determinação da temperatura equivalente, no âmbito da metodologia francesa, para fins de cálculo da deformação admissível das misturas asfálticas, bem como as análises do impacto na vida útil dos pavimentos em condições de não aderência interfacial entre as camadas. Os resultados obtidos indicaram que, para todos os casos simulados e comparados, a metodologia francesa fornece estruturas de pavimentos mais robustas que a MeDiNa, a qual também apresenta incongruências no princípio conceptivo da função de transferência. Além disso, as simulações com o uso da viscoelasticidade linear sob carga dinâmica mostraram que o efeito do fenômeno da fluência, associado à variação da temperatura, atua de forma não negligenciável no comportamento das misturas asfálticas. Ainda, a não aderência na interface das camadas acarretou na redução da vida útil das estruturas de pavimento.

Palavras-chave: aderência; dimensionamento; estrutura de pavimento; metodologia francesa; metodologia MeDiNa; simulação numérica.

ABSTRACT

The main aim of the research report (RP – 035) is to apply the results obtained from experimental campaign developed and presented in the scope of French and MeDiNa methodologies (RP – 033 and RP – 034), in numerical simulation routines for designing asphalt concrete pavement structures. Traffic and subgrade soil related to double sense lane project regarding route BR-280/SC, located in Santa Catarina, were taken into account, due to data availability and information provided by the DNIT, aiming to consider a real context for evaluating comparative scenarios between proposed solutions in each case. With regards to technical framework of the pavement design methodologies studied, the French one covered the content presented in Product II, while for MeDiNa it was taken the instructions supplied by Manual de Ajuda – Versão 1.1.9.0, extracted from DNIT/IPR online platform. Numerical simulation routines were carried out based on linear elastiticy with stationary loading application, and on linear viscoelasticity under dynamic loading, by using computerized tools such as *Viscoanalyse ver. Beta*, *Alizé*, *Viscoroute 2.0* e MeDiNa 1.1.9.0. It also must be highlighted the proposal of a preliminar simplified model for determining the equivalent temperature, in the scope of French methodology, aiming to calculate the admissible strain of the asphalt mixes, as well as the analyses correspondent to the impact in pavement lifespans when no interfacial adhesion between layers is taken into account. The results obtained indicate that, for all simulated and compared cases, French methodology designs pavement structures thicker than those from MeDiNa, which also presents inconsistencies in the transfer function conceived. Furthermore, linear viscoelastic numerical simulations demonstrated the effect of fluency phenomenon, associated to temperature variation, performs a non negligible role on the asphalt mix behavior. In addition, the lack of adhesion between the interface of the layers demonstrated a reduction of the asphalt pavement structure lifespans.

Keywords: adhesion; design; pavement structure; French methodology; MeDiNa methodology; numerical simulation.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

% V – Porcentagem de vazios

μ – Coeficiente de Poisson

μdef – Microdeformação (x 10^{-6})

$\Delta\varepsilon_6$ – Intervalo hiperbólico estatístico de ε_6

ε_6 – Deformação para 10^6 ciclos

ΔH – Deslocamento horizontal elástico

ε_p – Deformação plástica

$\sigma_{Rmédia}$ – Resistência à tração média

ε_t – Deformação específica resiliente de tração

σ_R – Resistência à tração, em Mpa

AASHTO – *American Association of State Highway Officials*

Abs. – Absorção

AFNOR – *Association Française de Normalisation*

b – Expoente da equação de fadiga

cm – centímetros

CP – Corpo de prova

D – Diâmetro do corpo de prova

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

E* – Módulo de rigidez complexo

|E*| – Norma do módulo de rigidez complexo

E_1 – Componente elástica do módulo de rigidez complexo

E_2 – Componente viscosa do módulo de rigidez complexo

EME – *Enrobé à Module Élevé*

EN – *European Norm*

ES – Especificação de serviço

F – Carga aplicada, em N

FFM – Fator de Fadiga da Mistura

FN – *Flow Number*

GB – *Grave-Bitume*

GDPPav – Grupo de Desenvolvimento e Pesquisa em Pavimentação

G_{mb} – Densidade aparente de projeto

H, t – Altura do corpo de prova

HiMA – *Highly Modified Asphalt*

Hz – Hertz

IPR – Instituto de Pesquisa em Transporte

k_1, k_2 – Parâmetros experimentais do modelo da curva de fadiga

km/h – Quilômetros por hora

kPa – Kilopascal

LabPav – Laboratório de Pavimentação da UFSC Campus Florianópolis

LDTPav – Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação

LVDT – *Linear Variable Differential Transformer*

ME – Método de ensaio

MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional

mm – Milímetros

mm/s – Milímetros por segundo

MPa – Megapascal

MR – Módulo de resiliência, em MPa

$MR_{médio}$ – Modulo de resiliência médio

M_{sss} – Massa submersa superfície seca

$Msss_{sub}$ – Massa submersa

N – Quantidade de solicitações dentro um determinado período

$N_{100;}$ N_{250} – Número de ciclos correspondentes ao nível de 100 e 250 microdeformações

NF – *Norme Française*

ºC – Graus Celsius

P – Carga cíclica

PCG – Prensa de compactação giratória

P_s – Peso seco

R^2 – Coeficiente de determinação

RTI – Resistência à tração indireta

s – Segundos

SBS – Estireno-Butadieno-Estireno

SN – Desvio-padrão dos resíduos

TED – Termo de Execução Descentralizada

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

φ – Ângulo de fase

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – FV ponderado da frota 24

Figura 2.2 – Dados do estudo de tráfego considerado 27

Figura 2.3 – Solo testado e prensa triaxial dinâmica 28

Figura 2.4 – Dados de entrada do solo de subleito no programa MeDiNa 29

Figura 2.5 – Camada de reforço do subleito em rocha detonada da BR-280/SC, ... 30

Figura 2.6 – BGS adotada como camada de reforço da estrutura do pavimento 31

Figura 2.7 – Curvas de evolução da ε_6 das misturas asfálticas GB e EME 33

Figura 2.8 – Ajuste do modelo de Huet-Sayegh (linha contínua) aos dados experimentais do $|\boldsymbol{E}^*|$ (esferas vazadas) das misturas asfálticas (a) GB e (b) EME 35

Figura 2.9 – Dados de entrada da mistura asfáltica GB na ferramenta computacional MeDiNa 1.1.9.0 37

Figura 2.10 – Dados de entrada da mistura asfáltica EME na ferramenta computacional MeDiNa 1.1.9.0 38

Figura 2.11 – Dados da série histórica (1931 a 1990) das estações meteorológicas situadas no entorno da BR-280/SC: Lotes 2.1 e 2.2 41

Figura 2.12 – Dados da série histórica (1991 a 2020) das estações meteorológicas situadas no entorno da BR-280/SC: Lotes 2.1 e 2.2 42

Figura 2.13 – Dados da série de 2024 das estações meteorológicas situadas no entorno da BR-280/SC: Lotes 2.1 e 2.2 43

Figura 2.14 – Dados das temperaturas altas, médias e baixas a 24,0 cm de profundidade, da estação meteorológica 1052 situada no entorno da BR-280/SC: Lotes 2.1 e 2.2 44

Figura 2.15 – Distribuição da temperatura, em função da variação horária de um dia 45

Figura 2.16 – Distribuição da temperatura, em função da variação percentual horária do tráfego para um dia 46

Figura 2.17 – Eixo-padrão axissimétrico adotado nas simulações numéricas 48

Figura 2.18 – Exemplo dos dados de entrada do eixo-padrão axissimétrico na interface da ferramenta computacional *Viscoroute* 3.1 48

Figura 2.19 – Plataforma de fundação (PF) das estruturas de pavimento utilizada nas simulações numéricas 49

Figura 2.20 – Estrutura de pavimento inicial utilizada nas simulações numéricas: elasticidade linear e carregamento estacionário 50

Figura 2.21 – Estrutura de pavimento inicial utilizada nas simulações numéricas: elasticidade linear e carregamento estacionário – *Viscoroute* 3.1 50

Figura 2.22 – Estrutura de pavimento inicial utilizada nas simulações numéricas: viscoelasticidade linear e carregamento dinâmico – Viscoroute 3.1 51

Figura 2.23 – Estrutura de pavimento na simulação numérica *Alizé* 2 53

Figura 2.24 – Estrutura de pavimento na simulação numérica Viscoroute 3.1 54

Figura 2.25 – Estrutura de pavimento na simulação numérica AEMC 54

Figura 2.26 – Deformações resultantes da simulação numérica com a ferramenta Alizé 2 55

Figura 2.27 – Deformações resultantes da simulação numérica com a ferramenta Viscoroute 3.1 55

Figura 2.28 – Deformações resultantes da simulação numérica com a ferramenta AEMC 56

Figura 2.29 – Comparação entre as deformações resultantes das simulações numéricas Alizé, Viscoroute e AEMC 57

Figura 5.1 – Estrutura de pavimento dimensionada pela metodologia MeDiNa, comparada à de outros países 86

Figura 5.2 – Comparativo dos resultados de ε_6 na fadiga entre os ensaios de tração/compressão (T/C), viga a dois (2PB) e quatro (4PB) pontos, e compressão diametral (ITT) 90

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Equações dos fatores de carga da USACE 23

Tabela 2.2 – Fatores de carga (FC) da frota 23

Tabela 2.3 – Fatores de eixo (FE) da frota 24

Tabela 2.4 – Tipos de veículos e quantificação da frota 25

Tabela 2.5 – Projeção do VMD da frota de 2017 a 2021 25

Tabela 2.6 – Projeção do VMD da frota de 2022 a 2026 26

Tabela 2.7 – Indicadores característicos do comportamento à fadiga das misturas asfálticas GB e EME 33

Tabela 2.8 – Valores do |E*| das misturas asfálticas GB e EME utilizados nos casos clássicos das simulações numéricas 35

Tabela 2.9 – Parâmetros do modelo reológico de Huet-Sayegh obtidos na ferramenta computacional *Viscoanalyse* para as misturas asfálticas GB e EME 36

Tabela 2.10 – Valores de MEA das misturas asfálticas GB e EME 37

Tabela 2.11 – Compilação dos resultados obtidos no âmbito da metodologia MeDiNa 37

Tabela 2.12 – Variação da temperatura equivalente com a profundidade 47

Tabela 2.13 – Configurações do eixo-padrão adotado nas simulações numéricas 47

Tabela 3.1 – Limites admissíveis de deformação permanente acumulada previstos para as estruturas de pavimento na metodologia MeDiNa 58

Tabela 3.2 – Tipos de cenários estabelecidos para a realização das simulações numéricas: metodologia MeDiNa 59

Tabela 3.3 – Tipos de cenários estabelecidos para a realização das simulações numéricas: metodologia francesa 60

Tabela 3.4 – Deformações admissíveis das misturas asfálticas GB e EME no contexto da metodologia francesa 61

Tabela 4.1 – Estruturas de pavimento ‘Avaliadas’: caso 1, hipótese 1 63

Tabela 4.2 – Estruturas de pavimento ‘Avaliadas’: caso 1, hipótese 2 64

Tabela 4.3 – Estruturas de pavimento ‘Avaliadas’: caso 1, hipótese 3 64

Tabela 4.4 – Estruturas de pavimento ‘Avaliadas’: caso 1, hipótese 4 64

Tabela 4.5 – Estruturas de pavimento ‘Avaliadas’: caso 2, hipótese variável 64

Tabela 4.6 – Estruturas de pavimento ‘Avaliadas’: caso 3, hipótese variável 65

Tabela 4.7 – Estruturas de pavimento ‘Dimensionadas’: caso 4, variável 65

Tabela 4.8 – Estruturas de pavimento ‘Dimensionadas’: caso 5, hipótese variável.....65

Tabela 4.9 – Estruturas de pavimento ‘Dimensionadas’: caso 6, hipótese variável.....65

Tabela 4.10 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 1, hipótese 1 – ESRD 8,2 t66

Tabela 4.11 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 1, hipótese 1 – ESRD 10,0 t 66

Tabela 4.12 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 1, hipótese 2 – ESRD 8,2 t66

Tabela 4.13 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 1, hipótese 2 – ESRD 10,0 t 66

Tabela 4.14 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 1, hipótese 3 – ESRD 8,2 t67

Tabela 4.15 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 1, hipótese 3 – ESRD 10,0 t 67

Tabela 4.16 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 1, hipótese 4 – ESRD 8,2 t67

Tabela 4.17 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 1, hipótese 4 – 10,0 t 67

Tabela 4.18 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 2, hipótese variável – ESRD 8,2 t.....68

Tabela 4.19 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 2, hipótese variável – ESRD 10,0 t.....68

Tabela 4.20 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 3, hipótese variável – ESRD 8,2 t.....68

Tabela 4.21 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 3, hipótese variável – ESRD 10,0 t.....68

Tabela 4.22 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 4, hipótese 1 – ESRD 8,2 t69

Tabela 4.23 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 4, hipótese 1 – ESRD 10,0 t 69

Tabela 4.24 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 4, hipótese 2 – ESRD 8,2 t69

Tabela 4.25 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 4, hipótese 2 – ESRD 10,0 t 69

Tabela 4.26 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 4, hipótese 3 – ESRD 8,2 t70

Tabela 4.27 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 4, hipótese 3 – ESRD 10,0 t 70

Tabela 4.28 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 4, hipótese 4 – ESRD 8,2 t70

Tabela 4.29 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 4, hipótese 4 – ESRD 10,0 t 70

Tabela 4.30 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 5, hipótese variável – ESRD 8,2 t.....71

Tabela 4.31 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 5, hipótese variável – ESRD 10,0 t.....71

Tabela 4.32 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 6, hipótese variável – ESRD 8,2 t.....71

Tabela 4.33 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 6, hipótese variável – ESRD 10,0 t.....71

Tabela 4.34 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 7, hipótese 1 – ESRD 8,2 t72

Tabela 4.35 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 7, hipótese 1 – ESRD 10,0 t 72

Tabela 4.36 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 7, hipótese 2 – ESRD 8,2 t72

Tabela 4.37 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 7, hipótese 2 – ESRD 10,0 t 72

Tabela 4.38 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 7, hipótese 3 – ESRD 8,2 t72

Tabela 4.39 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 7, hipótese 3 – ESRD 10,0 t 72

Tabela 4.40 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 7, hipótese 4 – ESRD 8,2 t73

Tabela 4.41 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 7, hipótese 4 – ESRD 10,0 t 73

Tabela 4.42 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 8, hipótese variável – ESRD 8,2 t.....73

Tabela 4.43 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 8, hipótese variável – ESRD 10,0 t.....73

Tabela 4.44 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 9, hipótese variável – ESRD 8,2 t.....73

Tabela 4.45 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 9, hipótese variável – ESRD 10,0 t.....73

Tabela 4.46 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 10, hipótese 1 – ESRD 8,2 t 74

Tabela 4.47 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 10, hipótese 1 – ESRD 10,0 t 74

Tabela 4.48 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 10, hipótese 2 – ESRD 8,2 t 74

Tabela 4.49 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 10, hipótese 2 – ESRD 10,0 t 74

Tabela 4.50 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 10, hipótese 3 – ESRD 8,2 t 74

Tabela 4.51 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 10, hipótese 3 – ESRD 10,0 t 74

Tabela 4.52 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 10, hipótese 4 – ESRD 8,2 t 75

Tabela 4.53 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 10, hipótese 4 – ESRD 10,0 t 75

Tabela 4.54 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 11, hipótese variável – ESRD 8,2 t 75

Tabela 4.55 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 11, hipótese variável – ESRD 10,0 t 75

Tabela 4.56 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 12, hipótese variável – ESRD 8,2 t 75

Tabela 4.57 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 12, hipótese variável – ESRD 10,0 t 75

Tabela 4.58 – Estruturas de pavimento ‘Avaliadas’: caso 1, hipóteses 1 a 4 76

Tabela 4.59 – Estruturas de pavimento ‘Avaliadas’: caso 2, hipótese variável 76

Tabela 4.60 – Estruturas de pavimento ‘Avaliadas’: caso 2, hipótese variável 76

Tabela 4.61 – Estruturas de pavimento ‘Dimensionadas’: caso 4 a 6, hipótese variável ... 77

Tabela 4.62 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 1, hipóteses 1 a 4; casos 2 e 3, hipótese variável – ESRD 8,2 t, ... 77

Tabela 4.63 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 1, hipóteses 1 a 4; casos 2 e 3, hipótese variável – ESRD 10,0 t 78

Tabela 4.64 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 4, hipóteses 1 a 4; casos 5 e 6, hipótese variável – ESRD 8,2 t 78

Tabela 4.65 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 4, hipóteses 1 a 4; casos 5 e 6, hipótese variável – ESRD 10,0 t 78

Tabela 4.66 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 7, hipóteses 1 a 4; casos 8 e 9, hipótese variável – ESRD 8,2 t 79

Tabela 4.67 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 7, hipóteses 1 a 4; casos 8 e 9, hipótese variável – ESRD 10,0 t 79

Tabela 4.68 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 10, hipóteses 1 a 4; casos 11 e 12, hipótese variável – ESRD 8,2 t 79

Tabela 4.69 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 10, hipóteses 1 a 4; casos 11 e 12, hipótese variável – ESRD 10,0 t 80

Tabela 5.1 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: elasticidade linear e carregamento estacionário (MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 8,2 t) 81

Tabela 5.2 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: elasticidade linear e carregamento estacionário (MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 10,0 t) 81

Tabela 5.3 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: elasticidade linear e carregamento estacionário (MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 8,2 t) 81

Tabela 5.4 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: elasticidade linear e carregamento estacionário (MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 10,0 t) 82

Tabela 5.5 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 8,2 t (viscoelasticidade linear e carregamento dinâmico) 82

Tabela 5.6 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 10,0 t (viscoelasticidade linear e carregamento dinâmico) 82

Tabela 5.7 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 8,2 t (viscoelasticidade linear e carregamento dinâmico) 83

Tabela 5.8 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 10,0 t (viscoelasticidade linear e carregamento dinâmico) 83

Tabela 5.9 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: elasticidade linear e carregamento estacionário (MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 8,2 t) 83

Tabela 5.10 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: elasticidade linear e carregamento estacionário (MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 10,0 t) 84

Tabela 5.11 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: elasticidade linear e carregamento estacionário (MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 8,2 t) 84

Tabela 5.12 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: elasticidade linear e carregamento estacionário (MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 10,0 t) 84

Tabela 5.13 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 8,2 t (viscoelasticidade linear e carregamento dinâmico) 85

Tabela 5.14 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 10,0 t (viscoelasticidade linear e carregamento dinâmico) 85

Tabela 5.15 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 8,2 t (viscoelasticidade linear e carregamento dinâmico) 85

Tabela 5.16 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 8,2 t (viscoelasticidade linear e carregamento dinâmico) 86

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1 – Legendas padrão de avaliação das soluções simuladas numericamente ..63

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 19
2 CONSIDERAÇÕES GERAIS 22
2.1 ESTUDO DO TRÁFEGO 22
2.2 SUBLEITO 27
2.3 REFORÇO DO SUBLEITO E PLATAFORMA DE FUNDAÇÃO 30
2.4 MISTURAS ASFÁLTICAS 32
2.4.1 ESCOPO DA METODOLOGIA FRANCESA 32
2.4.2 ESCOPO DA METODOLOGIA MEDINA 37
2.5 TEMPERATURA EQUIVALENTE 38
2.6 EIXO-PADRÃO 47
2.7 ESTRUTURAS DE PARTIDA 49
2.7.1 PLATAFORMA DE FUNDAÇÃO 49
2.7.2 CAMADAS ASFÁLTICAS 49
2.8 COMPARAÇÃO ENTRE AS FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA 52
3 CENÁRIOS SIMULADOS 58
3.1 VALORES ADMISSÍVEIS 58
3.2 TIPOS DE CENÁRIOS 59
4 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS 63
4.1 METODOLOGIA MEDINA 63
4.2 METODOLOGIA FRANCESA 65
4.3 COMPILAÇÃO DAS ESTRUTURAS APROVADAS 76
4.3.1 METODOLOGIA MEDINA 76
4.3.2 METODOLOGIA FRANCESA 77
5 DISCUSSÕES SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS 81
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 93
APÊNDICE A – FADIGA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS GB E EME 97
APÊNDICE B – MÉDIAS HISTÓRICAS CLIMÁTICAS DAS ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO 99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 100

1 INTRODUÇÃO

As solicitações contínuas pelas cargas do tráfego conduzem gradativamente à diminuição da resistência dos materiais presentes nas estruturas do pavimento, contribuindo para a potencialização dos danos observados ao longo da vida útil de serviço, podendo ser destacados os seguintes: majoração dos níveis deflectométricos, surgimento das deformações permanentes, e o colapso por fadiga das camadas asfálticas (Xu *et al.*, 2025; Bai *et al.*, 2020; Hussan *et al.*, 2018; Sybilski e Bańkowski, 2011).

Entretanto, o maior desafio na execução das modelizações pertinentes ao comportamento mecânico das estruturas de pavimento, é o de procedê-las na tentativa de reproduzir as aplicações das solicitações do tráfego da maneira mais próxima possível como ocorrem no campo, isto é, sob um carregamento cíclico, também conhecido como dinâmico. Ainda, aplicar e iterar simultaneamente diferentes modelos matemáticos desenvolvidos especificamente para descrever o comportamento particular de cada material, como a viscoelasticidade linear dos materiais betuminosos e a elasticidade não linear anisotrópica dos materiais granulares não tratados, por exemplo (Wang *et al.*, 2024; Cheng *et al.*, 2021; Dong e Ma, 2017; Hornych, Kazai e Piau, 1998).

A concepção da modelização e, consequentemente, da análise correspondente aos limites associados ao cálculo de uma estrutura de pavimento solicitada sob carregamento cíclico, é baseada nos seguintes aspectos: geometria estrutural, propriedades dos materiais constituintes e, solicitação uniforme na direção da passagem do carregamento. A ausência de pontos singulares no pavimento (considerando uma estrutura estanque) e a velocidade constante da carga solicitante, geram um regime denominado de pseudopermanente, que permite estudar o comportamento das estruturas de pavimento em relação às cargas dinâmicas, abordado no tópico 3.3 do RP – 032 – Diretrizes para Aplicação do Método Francês para Dimensionamento de Pavimentos de Concreto Asfáltico.

Neste contexto, a dependência temporal do comportamento viscoelástico desaparece, em função do desencadeamento de uma relação não local entre as tensões e deformações, sob a forma de convolução espacial, possibilitando levar em conta o comportamento reversível dos materiais constituintes das estruturas de pavimento ao longo do trajeto percorrido pela carga solicitante, sobretudo no estudo das deformações (Dong, Yuan e Cao, 2024; Zofka, Błażejowski e Ostrowski, 2021; Bodin, Chupin e Denneman, 2017; Hornych *et al.*, 2008).

No que diz respeito às modelizações clássicas, tem-se que são baseadas na Lei da Elasticidade Linear de Hooke, com aplicação de carregamento em condição estacionária. Logo, ainda que em alguns casos possam ser concebidas por modelos analíticos e abastecidas com dados provenientes de testes dinâmicos acurados quanto à descrição do comportamento viscoelástico dos materiais, possuem cunho simplificador às condições reais de aplicação do carregamento e propagação dos esforços ao longo das estruturas

dos pavimentos. A ausência no modelo considerado da componente viscosa, a qual é associada à variação de temperatura e ao efeito da fluência, além da não consideração da aplicação de carregamento dinâmico e transiente, tornam este tipo de análise incompleto e distante do que, de fato, ocorre no campo.

Dado o exposto, a motivação principal deste RP – 035 consiste em aplicar os resultados da campanha experimental pactuada no âmbito do TED nº 702/2020, apresentados no RP – 033 e 034, nas rotinas de simulações numéricas compreendendo análises elásticas lineares com aplicação de carregamento estacionário e, viscoelásticas lineares com solicitação por carregamento dinâmico, considerando o escopo das metodologias francesa (Catalogue LCPC/SETRA, 1998; Guide Technique, 1994) e MeDiNa (DNIT, 2023a), com o uso das ferramentas computacionais Viscoanalyse ver. Beta (Chailleux, 2007), Alizé (IFSTTAR, 2016, Viscoroute 2.0[1] (Chabot *et al.*, 2010) e MeDiNa 1.1.9.0 (DNIT, 2023b).

Intenta-se, com a elaboração do RP – 035, abordar aspectos conceptivos importantes a serem considerados para o dimensionamento das estruturas de pavimento de concreto asfáltico, a partir de cenários comparativos entre as metodologias supracitadas, permitindo verificar o impacto das soluções propostas tanto no que diz respeito à configuração das estruturas finalmente projetadas, quanto em relação à vida útil dos pavimentos.

Conforme vem sendo a tônica dos produtos apresentados no Termo de Execução Descentralizada (TED) nº 702/2020, reitera-se que a abordagem discorrida nos tópicos seguintes não visa relacionar as metodologias francesa e MeDiNa a outras existentes, tampouco esgota a gama de contextos e de aplicabilidades que as concernem. Ao invés disso, espera-se contribuir com o balizamento do novo método de dimensionamento dos pavimentos de concreto asfáltico para o Brasil, ora em desenvolvimento.

Para tanto, este quarto produto, previsto no Plano de Trabalho do TED nº 702/2020, propõe tratar sobre a aplicação dos resultados da campanha experimental realizada no dimensionamento das estruturas de pavimento de concreto asfáltico, tendo sido organizado da seguinte forma:

- Capítulo 1: introduz o tema ao leitor, deixando-o ao par das considerações gerais do estudo.
- Capítulo 2: trata das considerações gerais acerca das premissas adotadas para a concepção das rotinas numéricas aplicadas ao dimensionamento das estruturas de pavimento de concreto asfáltico, considerando dados relacionados ao estudo de tráfego, materiais e à campanha experimental desenvolvida na pesquisa.

[1] Atualmente, existe uma versão web do Viscoroute (versão 3.1), disponível em https://viscoroute.univ-eiffel.fr/, que permite realizar cálculos considerando o comportamento viscoelástico e termossuscetível das misturas asfálticas, segundo o modelo de Huet-Sayegh, bem como o carregamento dinâmico. Apesar de essa versão ser mais recente, os cálculos das simulações numéricas utilizados na comparação com o MeDiNa foram realizados com a versão 2.0.

- Capítulo 3: aborda os cenários analisados no contexto das simulações numéricas propostas, as ferramentas computacionais utilizadas, respeitando os contextos particulares das metodologias francesa e MeDiNa.
- Capítulo 4: apresenta os resultados acerca das simulações numéricas realizadas.
- Capítulo 5: trata das discussões técnicas sobre os resultados obtidos nas simulações numéricas, de forma comparativa entre as metodologias francesa e MeDiNa.
- Capítulo 6: apresenta as conclusões das análises efetuadas, para fins de dimensionamento das estruturas de pavimento de concreto asfáltico, bem como recomendações para o prosseguimento dos trabalhos.

Por fim, são informadas as referências utilizadas para a elaboração do presente documento.

2 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo, serão apresentadas as considerações gerais acerca das premissas adotadas para a concepção e dimensionamento das estruturas de pavimento, compreendendo dados relacionados ao estudo do tráfego, material do subleito, constituição da plataforma de fundação (PF), misturas asfálticas, configuração de eixo-padrão, temperatura equivalente, aderência entre as camadas, e afins.

Cabe esclarecer que, visando aplicar as soluções propostas nas simulações numéricas em um contexto mais próximo da realidade, foram utilizados parte dos dados oriundos do projeto de duplicação da rodovia BR-280/SC (DNIT, 2012), localizada em Santa Catarina, capitaneado pelo DNIT, abrangendo os Lotes 2.1 e 2.2, correspondentes ao trecho de São Francisco do Sul à divisa dos Estados de Santa Catarina (SC) e Paraná (PR), perfazendo mais especificamente o subtrecho entre o entroncamento da BR-101 à cidade de Jaraguá do Sul.

É importante ressaltar que algumas adaptações foram necessárias em relação ao projeto original quanto ao estudo de tráfego, principalmente em relação ao fator de veículo (FV) ponderado, à tolerância das cargas legais por eixo e, ao fator de pista (F_p), devido ao lapso temporal dos estudos realizados ou por não estarem devidamente demonstrados em detalhes na memória de cálculo disponibilizada.

O mesmo se aplica às camadas utilizadas na estrutura do pavimento, pois com exceção do solo de subleito, todas as demais camadas utilizadas no projeto original da BR-280/SC foram substituídas por materiais que permitissem a aplicação dos princípios conceptivos das metodologias francesa e MeDiNa, em que maiores explanações a respeito serão fornecidas ao longo dos tópicos subsequentes.

Entretanto, estas considerações mencionadas não implicam de forma alguma em prejuízos quanto ao objetivo da análise proposta no escopo do TED nº 702/2020, que é verificar o efeito da variação do comportamento viscoelástico linear das misturas asfálticas no dimensionamento de estruturas de pavimento sob carregamento dinâmico.

Ainda, os dados de entrada necessários ao abastecimento das ferramentas computacionais são apresentados nas próprias telas padrão operacionais, para fins de melhor visualização e eventual replicação de rotinas aos leitores.

2.1 ESTUDO DO TRÁFEGO

O estudo do tráfego da obra supracitada da BR-280/SC, Lotes 2.1 e 2.2, considerado neste Relatório de pesquisa 035, foi contabilizado para um período de 10 anos, com início em 2017, a partir do acúmulo da projeção do tráfego oriunda da contagem realizada originalmente em 2010, conforme consta em DNIT (2012).

Para efeito de cálculo, foi determinado um fator regional e de pista igual a 1,0 e 0,50, respectivamente, bem como a taxa de crescimento anual do tráfego em 3,0 %. O eixo-padrão foi o Simples de Roda Dupla (ESRD), considerando a carga legal de 10,0 t acrescida da tolerância de 7,5 %. Os fatores de carga utilizados provêm do *United States Army Corps of Engineers* (USACE) (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Equações dos fatores de carga da USACE

Tipos de Eixo	Faixas de Cargas (t)	Equações (P* em tf)
Dianteiro simples e traseiro simples	0 – 8	$FC = 2{,}0872 \times 10^{-4} \times P^{4{,}0175}$
	≥ 8	$FC = 1{,}8320 \times 10^{-6} \times P^{6{,}2542}$
Tandem duplo	0 – 11	$FC = 1{,}5920 \times 10^{-4} \times P^{3{,}472}$
	≥ 11	$FC = 1{,}5280 \times 10^{-6} \times P^{5{,}484}$
Tandem triplo	0 – 18	$FC = 8{,}0359 \times 10^{-5} \times P^{3{,}3549}$
	≥ 18	$FC = 1{,}3229 \times 10^{-7} \times P^{5{,}5789}$
*P = peso bruto total sobre o eixo		

Fonte: Adaptado de DNIT (2006)

A partir das equações apresentadas na Tabela 2.1 e, dos tipos de eixos classificados no processo de contagem do tráfego, foi possível calcular os fatores de carga (FC) para cada configuração, acrescendo a tolerância estabelecida de 7,5 % sobre a carga normativa de partida dos eixos, denominada de carga original (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 – Fatores de carga (FC) da frota

Tipo de Eixo	Cargas (tf)		FC USACE	FC USACE
	Carga original	Carga original + 7,5 % de tolerância	Carga original	Tolerância de 7,5 %
Simples (roda simples)	6,0	6,45	0,28	0,37
Simples (roda dupla)	10,0	10,75	3,29	5,17
Tandem duplo (roda dupla)	17,0	18,28	8,55	12,71
Tandem triplo (roda dupla)	25,5	27,41	9,30	13,92

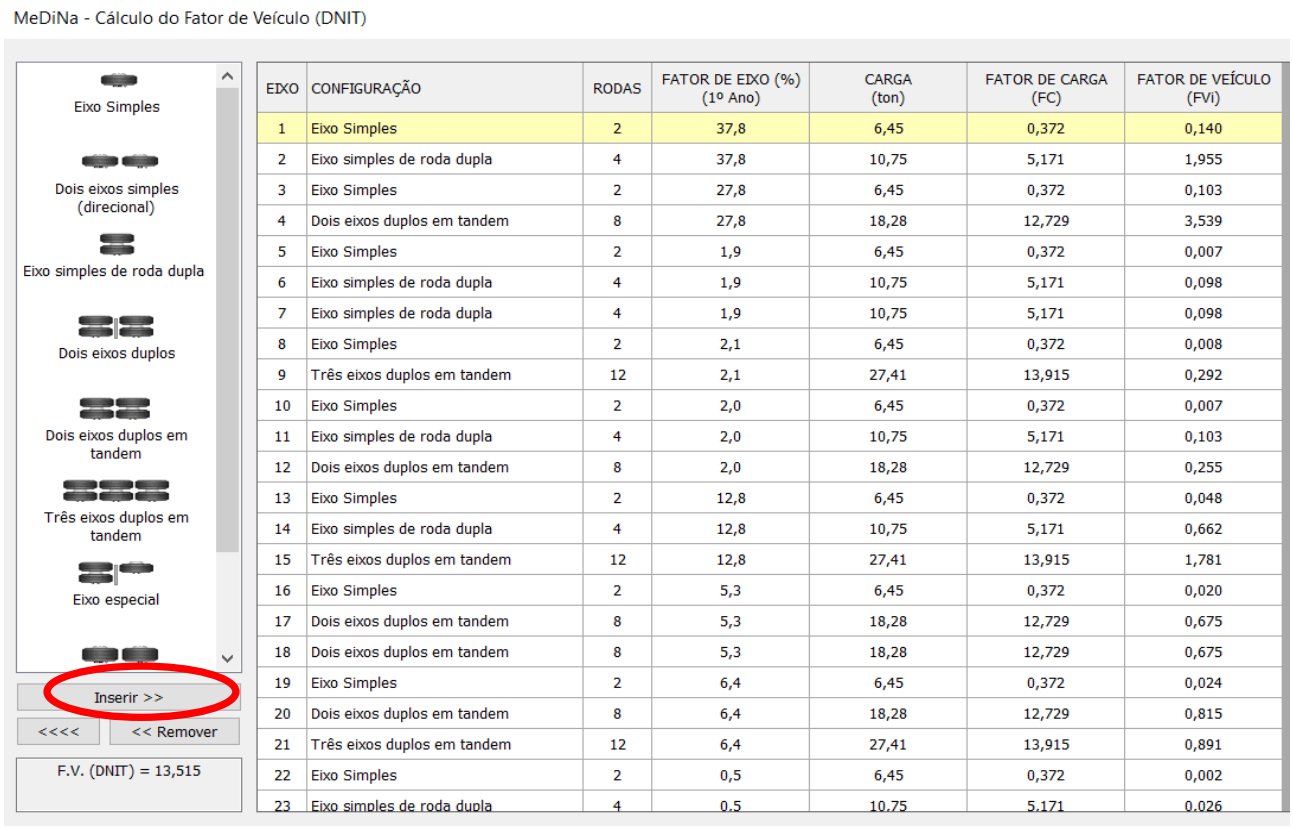
Fonte: Clara (2026) *apud* DNIT (2012)

Dispondo-se então dos FC individuais por tipo de eixo, foi possível determinar os fatores de eixo (FE) correspondentes à composição da frota classificada (Tabela 2.3), culminando em um fator de veículo (FV) ponderado global de 13,515 (Figura 2.1). Automóveis foram desconsiderados, por apresentarem peso bruto total (PBT) inferior às cargas por eixo tomadas em conta (Tabela 2.2) para o cálculo de danos às estruturas do pavimento. Os ônibus estão compreendidos na contagem dos veículos 2C.

Tabela 2.3 – Fatores de eixo (FE) da frota

Tipo de Veículo	Fator de Eixo
Automóveis	-
2C	37,8
3C	27,8
4C	2,1
2S1	1,9
2S2	2,0
2S3	12,8
3S2	5,3
3S3	6,4
2C2	0,5
2C3	0,4
3C2	0,4
3C3	0,4
3D4 (Bitrem)	2,4

Fonte: Clara *apud* DNIT (2012)



EIXO	CONFIGURAÇÃO	RODAS	FATOR DE EIXO (%) (1º Ano)	CARGA (ton)	FATOR DE CARGA (FC)	FATOR DE VEÍCULO (FVi)
1	Eixo Simples	2	37,8	6,45	0,372	0,140
2	Eixo simples de roda dupla	4	37,8	10,75	5,171	1,955
3	Eixo Simples	2	27,8	6,45	0,372	0,103
4	Dois eixos duplos em tandem	8	27,8	18,28	12,729	3,539
5	Eixo Simples	2	1,9	6,45	0,372	0,007
6	Eixo simples de roda dupla	4	1,9	10,75	5,171	0,098
7	Eixo simples de roda dupla	4	1,9	10,75	5,171	0,098
8	Eixo Simples	2	2,1	6,45	0,372	0,008
9	Três eixos duplos em tandem	12	2,1	27,41	13,915	0,292
10	Eixo Simples	2	2,0	6,45	0,372	0,007
11	Eixo simples de roda dupla	4	2,0	10,75	5,171	0,103
12	Dois eixos duplos em tandem	8	2,0	18,28	12,729	0,255
13	Eixo Simples	2	12,8	6,45	0,372	0,048
14	Eixo simples de roda dupla	4	12,8	10,75	5,171	0,662
15	Três eixos duplos em tandem	12	12,8	27,41	13,915	1,781
16	Eixo Simples	2	5,3	6,45	0,372	0,020
17	Dois eixos duplos em tandem	8	5,3	18,28	12,729	0,675
18	Dois eixos duplos em tandem	8	5,3	18,28	12,729	0,675
19	Eixo Simples	2	6,4	6,45	0,372	0,024
20	Dois eixos duplos em tandem	8	6,4	18,28	12,729	0,815
21	Três eixos duplos em tandem	12	6,4	27,41	13,915	0,891
22	Eixo Simples	2	0,5	6,45	0,372	0,002
23	Eixo simples de roda dupla	4	0,5	10,75	5,171	0,026

Figura 2.1 – FV ponderado da frota

Fonte: Clara (2026)

Tomando como início o ano de 2017, conforme já mencionado, tem-se que o Volume Médio Diário (VMD) contabilizado no subtrecho em estudo foi de 16093 automóveis e 9021 caminhões/ônibus, conforme apresentado na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Tipos de veículos e quantificação da frota

Tipos de Veículos	Volume (Unidade)
Automóveis	16093
2C	3408
3C	2511
4C	187
2S1	173
2S2	180
2S3	1151
3S2	474
3S3	575
2C2	43
2C3	33
3C2	38
3C3	36
3D4 (Bitrem)	212

Fonte: Clara (2026) *apud* DNIT (2012)

Considerando a taxa anual de crescimento do tráfego em 3,0 %, e o período de 10 anos, obteve-se a projeção do VMD para a frota contabilizada (Tabela 2.5 e Tabela 2.6).

Tabela 2.5 – Projeção do VMD da frota de 2017 a 2021

Tipo de Veículo	Ano				
	2017	2018	2019	2020	2021
Automóveis	16093	16576	17073	17585	18113
2C	3408	3510	3616	3724	3836
3C	2511	2586	2664	2744	2826
4C	187	193	198	204	210
2S1	173	178	184	189	195
2S2	180	185	191	197	203
2S3	1151	1186	1221	1258	1295
3S2	474	488	503	518	533
3S3	575	592	610	628	647
2C2	43	44	46	47	48
2C3	33	34	35	36	37
3C2	38	39	40	42	43
3C3	36	37	38	39	41
3D4 (Bitrem)	212	218	225	232	239

Fonte: Clara (2026) *apud* DNIT (2012)

Tabela 2.6 – Projeção do VMD da frota de 2022 a 2026

Tipo de Veículo	Ano				
	2022	2023	2024	2025	2026
Automóveis	18656	19216	19792	20386	20998
2C	3951	4069	4191	4317	4447
3C	2911	2998	3088	3181	3276
4C	217	223	230	237	244
2S1	201	207	213	219	226
2S2	209	215	221	228	235
2S3	1334	1374	1416	1458	1502
3S2	549	566	583	600	618
3S3	667	687	707	728	750
2C2	50	51	53	54	56
2C3	38	39	41	42	43
3C2	44	45	47	48	50
3C3	42	43	44	46	47
3D4 (Bitrem)	246	253	261	269	277

Fonte: Clara (2026) *apud* DNIT (2012)

A determinação do número de operações do eixo-padrão (N) foi realizada a partir da Equação 2.1.

$$\mathrm{N} = 365.\mathrm{F_p}.\mathrm{FR}.\sum(\mathrm{VMD}.\mathrm{FV}) \qquad (2.1)$$

Em que:

FP é o fator de pista;

FR é o fator regional;

VMD é o volume médio diário; e

FV é o fator de veículo.

Considerando então o produto entre o número de dias do ano (365), Fp (0,5) e FR (1,0), obteve-se o valor de 182,50. Ato contínuo, calculou-se a soma dos produtos entre os valores de FV e da projeção do VMD (Tabela 2.5 e Tabela 2.6), sendo atingido um valor acumulado ao final de 2026 em 1,39 x 10^6. Logo, os valores dos produtos de ambos os fatores mencionados resultaram em um número de operação de eixo-padrão (N) igual a 2,55 x 10^8.

A Figura 2.2 apresenta de forma resumida os dados de entrada utilizados na ferramenta computacional MeDiNa 1.1.9.0 (DNIT, 2023b), em relação ao estudo do tráfego considerado.

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO	
DADOS DO TRÁFEGO	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Principal
VMD (1º ano):	9021
FV:	13,515
N anual (1º ano):	4,45e+07
% Veículos na faixa de projeto:	50
N Anual da faixa:	2,23e+07
Taxa de crescimento (%):	3,0
Período de projeto (anos):	10
N Total:	2,55e+08

Figura 2.2 – Dados do estudo de tráfego considerado
Fonte: LDTPav, (2025)

O sistema arterial principal foi escolhido, pois é a categoria que corresponde às rodovias federais para fins de projeto geométrico, a partir da classificação funcional, ou seja, que prioriza mobilidade e controle parcial de acessos.

No que diz respeito à metodologia francesa, a maneira de calcular o número N distingue-se da aplicada pelo DNIT, pois não considera a premissa de equivalência de eixos, mas a equivalência de danos, a partir da determinação do coeficiente de agressividade média (CAM) do tráfego, conforme abordado no Apêndice A do RP – 032 – Diretrizes para Aplicação do Método Francês para Dimensionamento de Pavimentos de Concreto Asfáltico.

Todavia, como o Brasil não dispõe de estudos desta natureza para a realidade do país e executá-lo demandaria infraestrutura e tempo não quantificados no escopo deste TED nº 702/2020, tem-se que o mesmo valor de 2,55 x 10^8 foi adotado em todos os casos, a fim de uniformizar os critérios utilizados quanto ao estudo do tráfego, e eliminar esta variável de divergência entre as metodologias, não impactando nos objetivos pretendidos com as simulações numéricas realizadas.

2.2 SUBLEITO

As amostras de solo coletadas do subleito da BR-280/SC, Lotes 2.1 e 2.2, foram testadas no Laboratório de Mecânica dos Solos (LMS) da UFSC/Joinville, em que os ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação (ABNT NBR 7181:2025), massa específica seca máxima ($\gamma s máx$) e umidade ótima (hot) no ensaio Proctor (ABNT NBR 7182:2025), módulo de rigidez (MR) (DNIT-ME 134, 2018) e deformação permanente (DP) (DNIT-IE 179, 2018) foram executados, com o uso de prensa triaxial dinâmica (Figura 2.3).

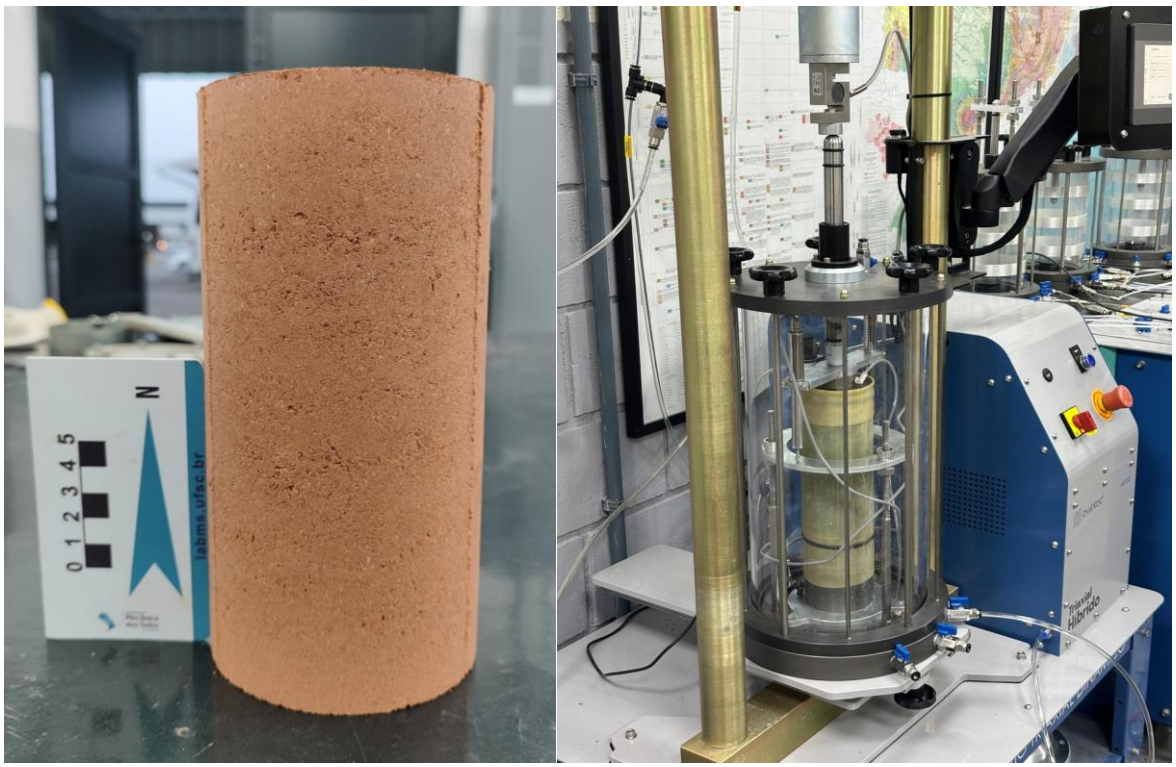


Figura 2.3 – Solo testado e prensa triaxial dinâmica

Fonte: LDTPav, (2025)

O solo foi classificado como Arenoso Fino Laterítico (SAFL). Desta forma, foi verificado durante os testes que os modelos compostos (Equação 2; Macêdo, 1996) e o de Guimarães (2009) (Equação 2.3) são os que melhor se adequam à descrição do comportamento mecânico do material ensaiado, para fins de determinação do MR e da DP, respectivamente.

$$MR = k_1.(\sigma_3)^{k_2}.(\sigma_d)^{k_3} \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_p = \psi_1.\left(\sigma_3^{\psi_2}\right).\left(\sigma_d^{\psi_3}\right).(N^{\psi_4}) \quad (2.3)$$

Em que:

σ_3 é a tensão de confinamento, em kgf/cm2;

σ_d é a tensão-desvio, em kgf/cm2;

N é o número de ciclos de aplicação de carga;

$k1$, $k2$, $k3$ são as constantes determinadas experimentalmente; e

$\psi 1$, $\psi 2$, $\psi 3$, $\psi 4$ são as constantes determinadas experimentalmente.

Cabe esclarecer que a realização de estudos sobre ocorrências de solos não faz parte do escopo estabelecido para o TED nº 702/2020. Por esta razão e para tornar mais sucinta a dissertação deste Relatório, serão apresentados, de forma resumida, os indicadores necessários aos dados de entrada na ferramenta computacional MeDiNa 1.1.9.0 (DNIT, 2023b) (Figura 2.4).

SUBLEITO	
Material	Subleito BR-280 (Amostra de campo) - So...
Parâmetros	
Espessura (cm)	0,0
Coeficiente de Poisson	0,45
Contato	-
Módulo (MPa)	
Modelo Constituinte	Resiliente Não Linear
Coeficiente de Regressão (k1):	1341,08
Coeficiente de Regressão (k2):	0,620
Coeficiente de Regressão (k3):	0,080
Coeficiente de Regressão (k4):	0,000
Características	
Descrição do Material	Solo Arenoso Fino Laterítico (SAFL)
Grupo MCT	...
MCT - Coeficiente c'	
MCT - Índice e'	
Massa específica (g/cm³)	1,98
Umidade Ótima (%)	9,6
Energia Compactação	100% do Proctor Normal
Norma ou Especificação	ABNT NBR 7182 (2016)
Deformação Permanente	
Modelo:	ep = psi1.(s3^psi2).(sd ^psi3).(N^psi4)
Coeficiente de Regressão (k1 ou p...	4,207633448
Coeficiente de Regressão (k2 ou p...	-1,644465605
Coeficiente de Regressão (k3 ou p...	3,623061546
Coeficiente de Regressão (k4 ou p...	0,047776025

Figura 2.4 – Dados de entrada do solo de subleito no programa MeDiNa

Fonte: LDTPav (2025)

2.3 REFORÇO DO SUBLEITO E PLATAFORMA DE FUNDAÇÃO

Para a camada de reforço do subleito, tem-se que foi aplicada na estrutura de pavimento da BR-280/SC, Lotes 2.1 e 2.2, 60,0 cm de partículas oriundas de rocha detonada, sem classificação definida e com diâmetro máximo acima de 100,0 mm (Figura 2.5).



Figura 2.5 – Camada de reforço do subleito em rocha detonada da BR-280/SC, Lotes 2.1 e 2.2

Fonte: LDTPav (2025)

Logo, esta característica amostral mencionada impede a realização de ensaios destinados à determinação dos indicadores de compactação Proctor, bem como MR e DP, tal como foram realizados para o solo do subleito da mesma rodovia, pois os documentos normativos mencionados no tópico 2.2 preveem granulometria apta à realização dos testes com partículas passantes na peneira 38,1 mm, para materiais pedregulhosos.

Ainda, adotar valores literários ou excluir partículas do material original, apenas para o atendimento forçoso de condições metodológicas, faria com que não fossem adequadamente aferidas as suas características, além de consumir verba e tempo de testes sem a devida acurácia.

Como este fator impeditivo não comprometia os objetivos pactuados no escopo do TED nº 702/2020, foi escolhida na biblioteca de materiais da ferramenta computacional MeDiNa 1.1.9.0 (DNIT, 2023b) uma amostra de brita graduada simples (BGS), denominada Brita Graduada – Gnaisse C4 (Figura 2.6), que dispusesse de todos os dados de entrada necessários à realização das simulações numéricas.

MATERIAL GRANULAR	
Material	Brita Graduada - Gnaisse C4
Parâmetros	
Espessura (cm)	25,0
Coeficiente de Poisson	0,35
Contato	Não Aderido
Módulo (MPa)	
Modelo Constituinte	Resiliente Linear
Módulo (MPa)	311
Características	
Descrição do Material	Brita Graduada
Massa específica (g/cm³)	2,296
Umidade Ótima (%)	5,4
Energia Compactação	Modificada
Abrasão Los Angeles (%)	41,0
Norma ou Especificação	DNIT ES 141
Deformação Permanente	
Modelo:	ep = psi1.(s3^psi2).(sd ^psi3).(N^psi4)
Coeficiente de Regressão (k1 ou p...	0,1010
Coeficiente de Regressão (k2 ou p...	-0,1825
Coeficiente de Regressão (k3 ou p...	0,9091
Coeficiente de Regressão (k4 ou p...	0,0753

Figura 2.6 – BGS adotada como camada de reforço da estrutura do pavimento

Fonte: LDTPav (2025)

Importante esclarecer que a escolha deste material não se deu de forma aleatória, pois a partir de simulação realizada na interface AEMC da ferramenta computacional MeDiNa 1.1.9.0 (DNIT, 2023b), considerando as estruturas tanto 'Avaliadas' quanto 'Dimensionadas', modalidades que serão mais bem esclarecidas no tópico 3, tem-se que o valor do MR do solo do subleito foi estimado em torno de 100 MPa.

Portanto, tomando em conta a regra de progressão modular das camadas granulares não tratadas (*Grave non Traitée*, GNT) prevista na metodologia francesa, abordada no tópico 4.3.1.1 do Relatório de pesquisa 032, tem-se que ao considerar uma GNT de categoria 1, aplica-se o coeficiente multiplicador de 3,0, em relação ao MR da camada subjacente, limitada ao valor máximo de 360 MPa para estruturas de pavimento espessas, que são os casos considerados nas simulações numéricas deste Relatório de pesquisa 035, o que resultaria no valor de 300 MPa, a partir do MR do subleito.

Importante também destacar que esta progressão modular se aplica a cada 25,0 cm de GNT, pois de acordo com o Guide Technique (1994), acima desta espessura, ocorrem mudanças não negligenciáveis no comportamento elástico não linear destes materiais,

em relação às distribuições das tensões propagadas na estrutura do pavimento. Por esta razão, verifica-se a espessura supracitada nos dados de entrada ilustrados na Figura 2.6, situação que se encontra dentro dos requisitos especificados pela metodologia MeDiNa (DNIT, 2023a) que estabelece a faixa de 15,0 cm a 40,0 cm para a previsão de camadas granulares não tratadas nas estruturas de pavimento.

Desta forma, é possível atender tanto ao critério previsto na metodologia francesa para aplicação de camadas granulares, quanto prever uma plataforma de fundação (PF), que é o conjunto do subleito e da camada de reforço, comum às duas metodologias, eliminando também esta variável da composição das estruturas de pavimento.

Além disso, para tráfegos muito pesados de classe TEX (TC8) com VMD acima de 5000 caminhões, como o estudado para o caso da BR-280/SC, Lotes 2.1 e 2.2, a metodologia francesa prevê a necessidade de utilização, no mínimo, de uma PF com categoria 3, ou seja, com MR $\geq$ 120 MPa (vide tópico 4.3 do RP – 032).

2.4 MISTURAS ASFÁLTICAS

As misturas asfálticas consideradas nas simulações numéricas foram as mesmas utilizadas em toda a campanha experimental do TED nº 702/2020, isto é, as formulações Grave-Bitume (GB) e Enrobé à Module Élevé (EME), ambas de graduação 0/20 mm, as quais tiveram os seus escopos de aplicação e resultados apresentados no RP – 033 e RP – 034 – Resultados da Campanha Experimental em Laboratório sobre o Comportamento Viscoelástico dos Materiais em Concreto Asfáltico - 1ª e 2ª Partes.

2.4.1 Escopo da metodologia francesa

Neste tópico, serão discorridas as considerações acerca dos dados utilizados em relação aos ensaios de fadiga e módulo complexo, além dos parâmetros reológicos pertinentes ao modelo de Huet-Sayegh.

2.4.1.1 Fadiga

No âmbito da metodologia francesa, tem-se que a compilação dos resultados dos ensaios de fadiga se encontra na Tabela 2.1, bem como no Apêndice B, constantes do RP – 034. A única exceção foram os resultados das curvas de fadiga realizados à temperatura de 0 ºC e 25 Hz (Apêndice A), concluídos após o prazo final de entrega previsto à época para o Produto mencionado. Assim, tem-se que todos os resultados finalmente consolidados quanto à resistência à fadiga são apresentados na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Indicadores característicos do comportamento à fadiga das misturas asfálticas GB e EME

Mistura Asfáltica	Teor de Ligante (%)	Condição de Teste	$\varepsilon 6$ $(x\ 10-6)\ \mu def$	$\Delta\varepsilon 6$ $(x\ 10-6)\ \mu def$	b	SN
GB	4,54	0 ºC e 25 Hz	126,51	6,06	5,6091	0,2671
		10 ºC e 25 Hz	117,37	6,39	7,3220	0,4326
		20 ºC e 25 Hz	124,57	9,77	5,9776	0,4983
		25 ºC e 25 Hz	138,74	8,18	6,9357	0,4254
EME	5,50	0 ºC e 25 Hz	156,32	8,05	7,4532	0,3535
		10 ºC e 25 Hz	137,95	5,24	6,8322	0,2391
		15 ºC e 25 Hz	153,74	10,10	4,5800	0,2921
		20 ºC e 25 Hz	185,06	6,42	7,4625	0,2514

Fonte: Clara (2026)

A partir dos resultados experimentais, foi possível obter a curva de tendência das deformações para 10^6 ciclos ($\varepsilon 6$) de todas as variações de temperatura testadas, com o intuito de verificar qual a condição mais crítica para aplicabilidade nas rotinas numéricas de dimensionamento (Figura 2.7).

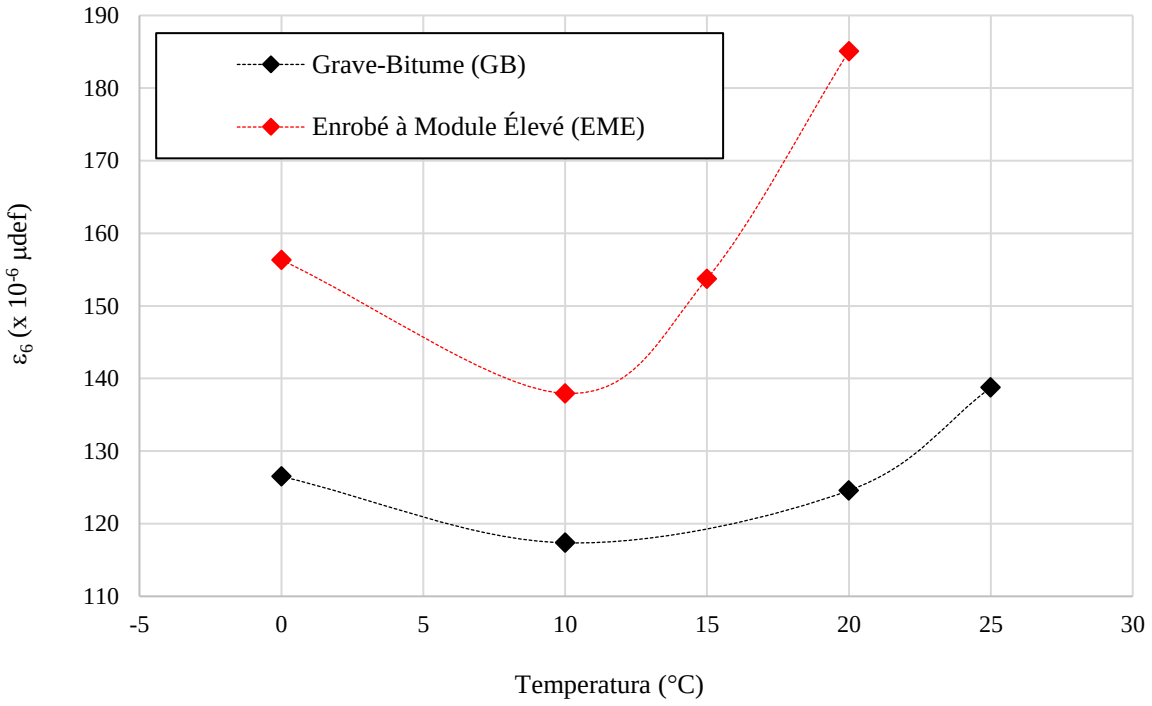


Figura 2.7 – Curvas de evolução da ε_6 das misturas asfálticas GB e EME

Fonte: Clara (2026)

Conforme já discutido no tópico 3.1 do RP – 034, em razão do comportamento reológico mais favorável do ligante betuminoso HiMA, oriundo do aporte do polímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) com cadeia molecular mais estruturada que o da matriz 60/85 E, percebe-se que os resultados da ε_6 correspondentes à mistura asfáltica EME são mais elevados em relação à GB, ratificando a coerência das análises realizadas durante a campanha experimental.

Contudo, para ambas as formulações, foi verificado que a temperatura mais crítica da $\varepsilon 6$ foi a de 10 ºC, indicando que ao contrário da premissa originalmente considerada no tópico 4.5 do RP – 032, quanto ao fato de haver correspondência direta entre a temperatura crítica de dissipação da energia sob a forma de calor no Plano Cole-Cole e a condição mais desfavorável do comportamento mecânico quanto à resistência à fadiga das misturas asfálticas, não se aplica a todos os casos.

O cenário da premissa inicialmente considerado tem-se mostrado válido para misturas asfálticas formuladas com ligantes betuminosos sem qualquer incorporação de agente modificador, ou seja, classificados por penetração. Porém, devido às modificações do comportamento reológico das matrizes originais pela inserção das cadeias do polímero SBS estudadas, verificou-se uma mudança de correspondência entre as condições críticas do plano complexo e do comportamento à fadiga das misturas asfálticas, ensejando a realização de estudos a cada caso.

Logo, para as simulações numéricas deste RP – 035, foram adotados os resultados das curvas de fadiga testadas a 10 ºC e 25 Hz, por representarem as situações mais críticas do comportamento mecânico das formulações testadas na campanha experimental.

2.4.1.2 Módulo Complexo

No que diz respeito aos ensaios de módulo complexo, a compilação dos resultados se encontra no tópico 2 e no Apêndice A do RP – 034. Neste contexto, é importante esclarecer alguns pontos de análise. A equação da metodologia francesa utilizada para o cálculo da deformação admissível das misturas asfálticas [$\varepsilon\,(NE,\ \theta eq,\ f)$; vide Equação 4.8 do RP – 032, estabelece como dados de entrada tanto o módulo de rigidez complexo ($|E*|$) de referência, obtido a 10 ºC e 10 Hz, quanto o $|E*|$ correspondente à temperatura equivalente (θeq) adotada na França, de 15 ºC e também a 10 Hz.

Para o caso do $|E*|$ de referência a 10 ºC, tem-se que esta condição foi mantida, pois a temperatura em voga é coincidente com a situação mais crítica da ε_6 na fadiga para ambas as formulações testadas (Figura 2.7), e como este é o principal dano que conduz as misturas asfálticas ao colapso estrutural no campo, é dominante na análise das estruturas de pavimento.

Porém, no tocante ao $|E*|$ da θeq, somam-se às análises já realizadas nos tópicos 4.4 e 4.5 do RP – 032, o fato da não correspondência direta entre a condição mais crítica de dissipação de energia do plano complexo Cole-Cole com o comportamento mais suscetível à fadiga das misturas asfálticas testadas na campanha experimental, conforme abordado anteriormente.

Para tanto, foi desenvolvida uma metodologia preliminar para estabelecer um modelo de cálculo, com a colaboração da equipe técnica da *Université Gustave Eiffel* (UGE), de Nantes, na França, a fim de determinar a θeq no cálculo da [$\varepsilon\,(NE,\ \theta eq,\ f)$], a ser explanada em detalhes no tópico 2.5, que resultou em 28 ºC.

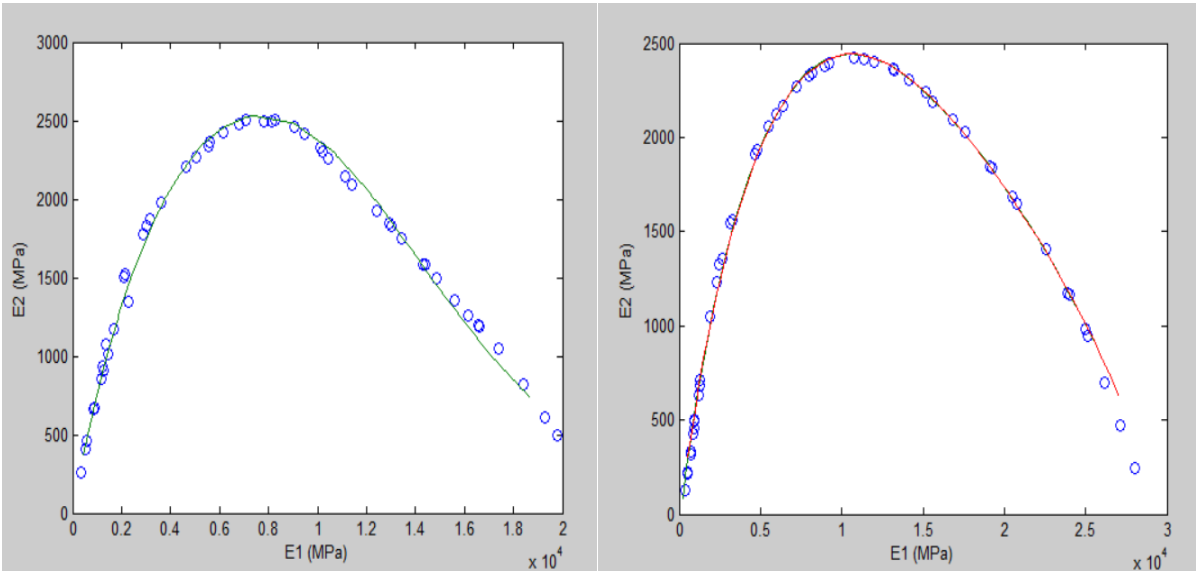
Assim, para as rotinas das simulações numéricas, considerando as premissas clássicas de dimensionamento da metodologia francesa, ou seja, elasticidade linear e carregamento estacionário, os valores do $|E*|$ para a condição referência a 10 ºC e 10 Hz foram extraídos diretamente do Apêndice A (Tabelas A.1 e A.2) do RP – 034, ocorrendo o mesmo para o $|E*|$ à θeq de 15 ºC e 10 Hz. No caso do $|E*|$ à θeq de 28 ºC e 10 Hz, tem-se que os valores foram determinados a partir de interpolação linear, com base nos resultados do Apêndice mencionado (Tabela 2.8).

Tabela 2.8 – Valores do |E*| das misturas asfálticas GB e EME utilizados nos casos clássicos das simulações numéricas

Mistura Asfáltica	Teor de Ligante (%)	Condição de Teste	$\|E*\|$ (MPa)
GB	4,54	10 ºC e 10 Hz	13134
		15 ºC e 10 Hz	11348
		28 ºC e 10 Hz	5920
EME	5,50	10 ºC e 10 Hz	17737
		15 ºC e 10 Hz	14316
		28 ºC e 10 Hz	5872

Fonte: Clara (2026)

Para o desenvolvimento das simulações numéricas no escopo das solicitações sob carregamento dinâmico, foi necessário determinar os parâmetros do modelo reológico de Huet-Sayegh (1965), conforme descrito no tópico 3.2 do RP – 032, a partir do uso da ferramenta computacional Viscoanalyse Ver. Beta (Chailleux, 2007) (Figura 2.8 e Tabela 2.9).



(a) (b)

Figura 2.8 – Ajuste do modelo de Huet-Sayegh (linha contínua) aos dados experimentais do $|E*|$ (esferas vazadas) das misturas asfálticas (a) GB e (b) EME

Fonte: Clara (2026)

Tabela 2.9 – Parâmetros do modelo reológico de Huet-Sayegh obtidos na ferramenta computacional *Viscoanalyse* para as misturas asfálticas GB e EME

Mistura Asfáltica	Parâmetros								
	$E0$ (MPa)	$E\infty$ (MPa)	δ	k	h	τ	$A0$	$A1$	$A2$
GB	3,43307	23000	0,93	0,125	0,47	1,10	2,20476	-0,285329	0,0013460
EME	104,56	29950	1,67	0,150	0,42	1,27	4,83410	-0,466009	0,0025442

Fonte: Clara (2026)

Cabe destacar que para a obtenção dos parâmetros do modelo de Huet-Sayegh (1965) apresentados na Tabela 2.9, são utilizados os valores obtidos na análise reológica das misturas asfálticas nos ensaios de módulo complexo ($|E*|$), conforme já mencionado. Logo, são oriundos de ensaios mecânicos, sujeitos a variáveis como fatores de massa e de forma. Para estabelecer a melhor representatividade dos dados experimentais ao modelo reológico supracitado (Figura 2.8), às vezes se faz necessário ajustes finos nos valores determinados nas iterações de partida com o auxílio da ferramenta *Viscoanalyse* ver. Beta (Chailleux, 2007). Todavia, respeitando os intervalos de confiança estatísticos indicados para cada parâmetro, a fim de preservar as características reológicas dos materiais.

Ainda, em que pese a metodologia francesa (Guide Technique, 1994) recomendar a adoção do coeficiente de Poisson (ν) 0,35 para todas as camadas da estrutura do pavimento, na ausência de dados experimentais, tem-se que com a finalidade de eliminar esta variável das simulações numéricas, em comparação às realizadas pela metodologia MeDiNa, foi utilizado o valor de 0,30 para as misturas asfálticas.

A razão para esta escolha foi devido à norma DNIT-ME 135 (2018), que trata dos ensaios de módulo de rigidez das misturas asfálticas à compressão diametral, estabelecer em nota prevista no item 7.3, que o banco de dados brasileiro está calibrado para um ν de 0,30 nos ensaios realizados a 25 ºC.

Logo, como não há restrição ao uso de outros valores de ν pela metodologia francesa, e tendo-se que o valor de 0,35 parte de uma recomendação em seu escopo, foi adotado 0,30 para as misturas asfálticas testadas em todas as simulações deste RP – 035.

Quanto às massas específicas aparentes (MEA) das misturas asfálticas, foram determinadas considerando a média dos corpos de prova testados durante a campanha experimental, tendo sido considerada a série de corpos de prova testada nos ensaios de módulo de rigidez e de Duriez, para as metodologias MeDiNa e francesa, respectivamente (Tabela 2.10).

Tabela 2.10 – Valores de MEA das misturas asfálticas GB e EME

Mistura Asfáltica	Teor de Ligante (%)	Metodologia	MEA (kg/cm³)
GB	4,54	MeDiNa	2,515
		Francesa	2,457
EME	5,50	MeDiNa	2,471
		Francesa	2,420

Fonte: Clara (2026) e LDTPav (2025)

2.4.2 Escopo da Metodologia MeDiNa

Os dados de entrada necessários para as misturas asfálticas na ferramenta computacional MeDiNa 1.1.9.0 (DNIT, 2023b) foram apresentados de forma compilada na tabela 4.4 do RP – 34, e reeditados na Tabela 2.11 deste RP – 035.

Tabela 2.11 – Compilação dos resultados obtidos no âmbito da metodologia MeDiNa

Mistura Asfáltica	Tração Indireta (MPa)	Módulo Resiliente (MPa)	Fadiga				Flow Number	
			FFM	Classe	$k1$	$k2$	FN	Classe
GB	2,00	7707	0,90	2	8E-26	-7,198	2446	5
EME	1,95	6030	1,19	4	1E-23	-6,836	7200	5

Fonte: LDTPav (2025)

As Figuras 2.9 e 2.10 ilustram a disposição dos dados informados na Tabela 2.11, bem como informações complementares, com o intuito de tornar mais fácil a identificação visual da operação da ferramenta computacional, assim como já procedido para os demais materiais abordados anteriormente.

CONCRETO ASFÁLTICO	
Material	Grave-Bitume (GB 4) 0/20 mm
Parâmetros	
Espessura (cm)	11,3
Coeficiente de Poisson	0,30
Contato	Aderido
Módulo (MPa)	
Modelo Constituinte	Resiliente Linear
Módulo (MPa)	7707
Características	
Tipo de CAP	POLIFLEX 60/85 E (CBB ASFALTOS)
Massa específica (g/cm³)	2,515
Resistência à tração CD (MPa)	2,0
Teor de asfalto (%)	4,54
Volume de vazios (%)	4,02
Faixa Granulométrica	GB 0/20 mm (MANUEL LPC, 2007)
Abrasão Los Angeles (%)	15,5
Norma ou Especificação	DNIT ES 031
Curva de Fadiga	
Modelo:	k1 .(et ^ k2)
Coeficiente de Regressão (k1):	8e-26
Coeficiente de Regressão (k2):	-7,198
Classe de Fadiga:	2
FFM (100µ a 250µ):	0,90

Figura 2.9 – Dados de entrada da mistura asfáltica GB na ferramenta computacional MeDiNa 1.1.9.0

Fonte: LDTPav (2025)

CONCRETO ASFÁLTICO	
Material	Enrobé à Module Élevé (EME 2) 0/20 mm
Parâmetros	
Espessura (cm)	12,0
Coeficiente de Poisson	0,30
Contato	Não Aderido
Módulo (MPa)	
Modelo Constituinte	Resiliente Linear
Módulo (MPa)	6030
Características	
Tipo de CAP	HiMA (CBB ASFALTOS)
Massa específica (g/cm³)	2,471
Resistência à tração CD (MPa)	1,95
Teor de asfalto (%)	5,50
Volume de vazios (%)	4,0
Faixa Granulométrica	EME 0/20 mm (MANUEL LPC, 2007)
Abrasão Los Angeles (%)	15,5
Norma ou Especificação	DNIT ES 31
Curva de Fadiga	
Modelo:	k1 .(et ^ k2)
Coeficiente de Regressão (k1):	1e-23
Coeficiente de Regressão (k2):	-6,836
Classe de Fadiga:	4
FFM (100µ a 250µ):	1,19

Figura 2.10 – Dados de entrada da mistura asfáltica EME na ferramenta computacional MeDiNa 1.1.9.0

Fonte: Clara (2026)

Importante esclarecer que as espessuras que constam nas Figuras 2.9 e 2.10 são referentes a alguns valores utilizados durante as simulações numéricas, não representando a totalidade dos casos analisados, situação que será melhor discorrida no tópico 2.7.

2.5 TEMPERATURA EQUIVALENTE

A temperatura equivalente, conforme já explanado no tópico 4.4 do RP – 032, não se trata de considerar a temperatura ambiente, ou seja, a temperatura do ar em que a estrutura de pavimento está submetida a um determinado momento da solicitação pelo tráfego, mas aquela correspondente ao dano acumulado sofrido pelo pavimento ao longo do ano ou de um período que abranja as quatro estações climáticas, quando as condições do local de estudo disponham destas características.

Na prática, seriam as condições mais críticas de deformação medidas na estrutura do pavimento ao ser solicitado pelo tráfego, ao longo do período supracitado, em relação a uma dada temperatura também monitorada, em que caso ocorresse de forma contínua e constante, conduziria a estrutura ao colapso de forma precoce.

Ainda, é importante esclarecer que o monitoramento das deformações e temperaturas para fins de determinação da temperatura equivalente, deve ser realizado na região em que se situa a fibra inferior da camada asfáltica mais profunda da estrutura de pavimento que se pretende estudar, pois é a que estará sujeita ao esforço mais crítico de tração a partir da solicitação pelo tráfego, e que desencadeará o progresso gradual do dano por fadiga da estrutura com o avanço da vida útil projetada.

Logo, medidas tomadas em superfície ou em outras posições ao longo da profundidade das camadas asfálticas não são válidas para este fim.

Na França, a temperatura equivalente é considerada como sendo 15 ºC, em razão de estudos conduzidos à época da elaboração do Guide Technique (1994) apontarem séries históricas climáticas no período considerado de 1951 a 1980, convergentes na maior parte dos casos para esta escala de valor (Hornych *et al.*, 2013). Entretanto, a mesma publicação indica pontos importantes a serem considerados, como:

- Mesmo dispondo de dados climáticos do país como um todo, no caso a França, estudos realizados a partir de temperaturas reais medidas em diferentes regiões, conduziram a diferenças significativas nos valores de temperatura equivalente calculados e, portanto, alterando de forma importante a vida de serviço em cada caso;
- Análises estatísticas de sensibilidade demonstraram que o uso de dados experimentais reais de módulo de rigidez e fadiga, obtidos a diferentes temperaturas, é o ponto-chave para se determinar corretamente a temperatura equivalente, situação que pode resultar em uma vida útil até cinco vezes maior, se comparados aos resultados obtidos com a lei de fadiga empírica clássica do método francês $\varepsilon 6(\theta).(E(\theta))^{0,5}$ (vide Equação 4.8 do RP – 032);
- A utilização de uma única temperatura equivalente para todos os casos de dimensionamento de estruturas de pavimento é uma simplificação muito incipiente, e que não expressa a condição particular de cada local a ser analisado em projeto. O objetivo final deve ser propor uma abordagem mais adequada, que considere variações de temperatura com a profundidade em cada condição particular, permitindo assim adaptar o método para outras condições climáticas.

Na mesma linha de raciocínio, diversas pesquisas identificaram valores distintos de temperatura equivalente no transcurso dos experimentos realizados em escala global, a saber:

- Senegal (Bourdon e Brosseaud, 2019): 34 ºC;
- Argélia (CTTP, 2001): 20 ºC a 30 ºC;
- Marrocos (Sarroukh *et al.*, 2020): 19 ºC a 25 ºC;
- Guiana Francesa (DGAC, 2014): 25 ºC; e
- México (Martinez, Balay e Brosseaud, 2011): 20 ºC.

Logo, fica evidente que a determinação da temperatura equivalente da forma clássica como é calculada, depende do monitoramento constante de estruturas de pavimento. E mesmo que a tecnologia atual permita a captação de dados à distância, ainda assim enseja grande cobertura territorial, programação contínua de manutenção dos equipamentos medidores, riscos de defeitos, dificuldade de reposição de sensores na estrutura do pavimento em profundidade, sensibilidade ao intemperismo ou falhas de medição e, vida útil limitada dos sensores.

Há ainda o aspecto da sazonalidade, pois as variações climáticas ocorrem a todo momento e, sobretudo nas duas últimas décadas, tem-se verificado uma forte mudança nas escalas de temperaturas registradas em âmbito mundial, situação que afeta significativamente o comportamento viscoelástico linear das estruturas de pavimento de concreto asfáltico. Desta forma, assim como não é adequado considerar uma única temperatura equivalente para todos os casos de dimensionamento, da mesma forma negligenciar a variação da temperatura com o passar do tempo não é uma conduta racional no contexto de uma dada metodologia.

Com base nestas premissas e tomando em conta o escopo da terceira recomendação proposta por Hornych *et al.* (2013), discorrida anteriormente, propôs-se determinar a temperatura equivalente para o dimensionamento das estruturas de pavimento nesta pesquisa, a partir de dados climatológicos e de tráfego reais, que pudessem ser tratados e analisados em conjunto, culminando na aplicação de um modelo capaz de fornecer o valor de θeq para diferentes profundidades do pavimento, compreendendo uma abordagem prática, acessível aos projetistas de diferentes níveis e, cientificamente robusta.

Neste contexto, modelos consolidados no meio científico e bastante difundidos acerca do tema foram consultados, como o de Barber (1957), *Module Gel-Dégel* 1D do programa *Alizé* 2 (Lièvre, Morvan e Piau, 2021) e do *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (MEPDG; AASHTO, 2015), que permitem o cálculo de temperaturas de superfície e multiprofundidades de pavimentos.

Entretanto, os modelos citados necessitam de dados de entrada que não são acessíveis de forma prática aos projetistas e que muitas vezes não se encontram disponíveis em algumas regiões, sobretudo mais remotas, pois dependem da realização de pesquisas científicas prévias, como: incidência e taxa de refletância solar; condutividade e coeficiente de dilatação superficial, e; taxa de difusão térmica dos materiais, entre outros.

Como as simulações numéricas desta pesquisa consideraram a BR-280/SC, Lotes 2.1 e 2.2, como estudo de caso, foram levantadas as estações meteorológicas no entorno do trecho citado, a fim de verificar a distribuição histórica das temperaturas médias na região a cada mês, como dados de partida, compreendendo séries históricas do período de 1931 a 1990 e de 1991 a 2020 (Apêndice B), medidos a 5,0 cm de altura da superfície, fornecidos

pelo sistema AGROCONNECT da EPAGRI/CIRAM (2025) (Figura 2.11 e Figura 2.12), tendo sido mapeadas as seguintes estações:

- 1052: Jaraguá do Sul – Barra do Rio Cerro;
- 2388: Massaranduba – Aproban;
- 2389: Schroeder – Rancho Bom; e
- 2434: São João do Itaperiú – Santa Luzia.

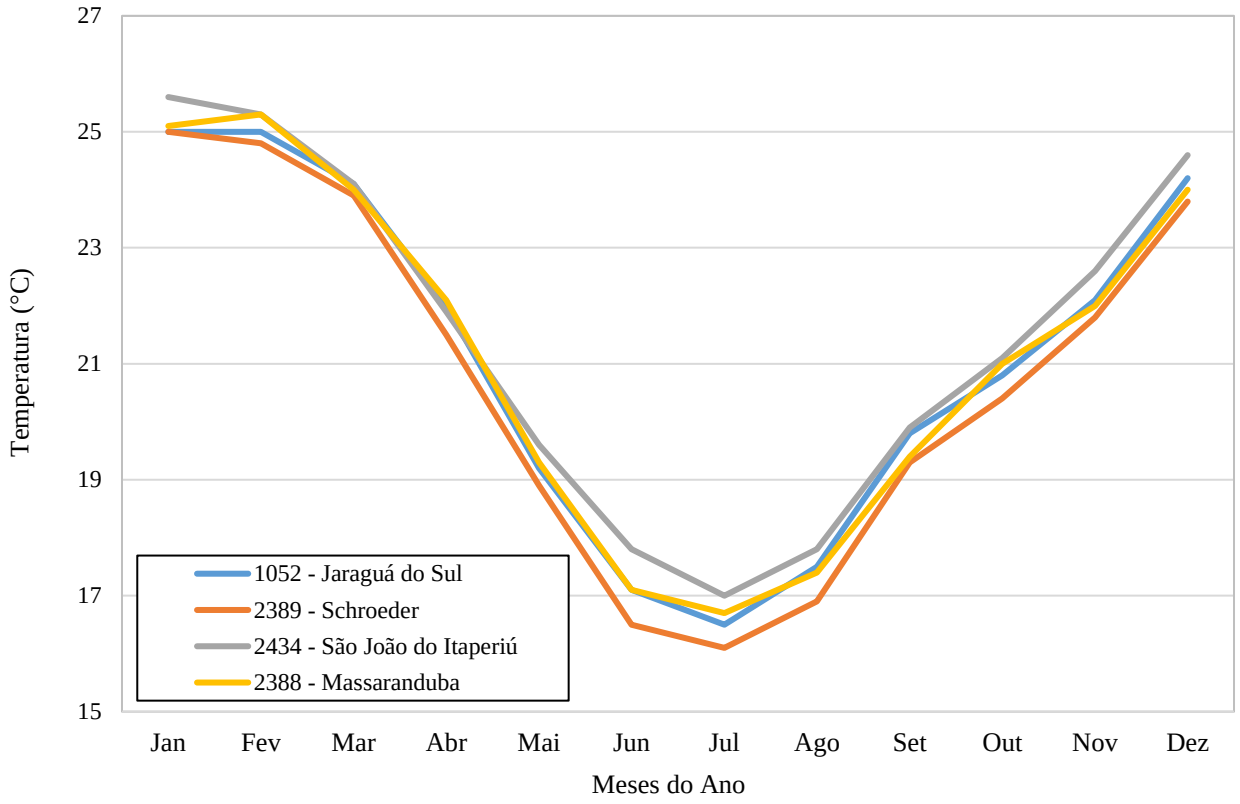


Figura 2.11 – Dados da série histórica (1931 a 1990) das estações meteorológicas situadas no entorno da BR-280/SC: Lotes 2.1 e 2.2

Fonte: EPAGRI/CIRAM (2025)

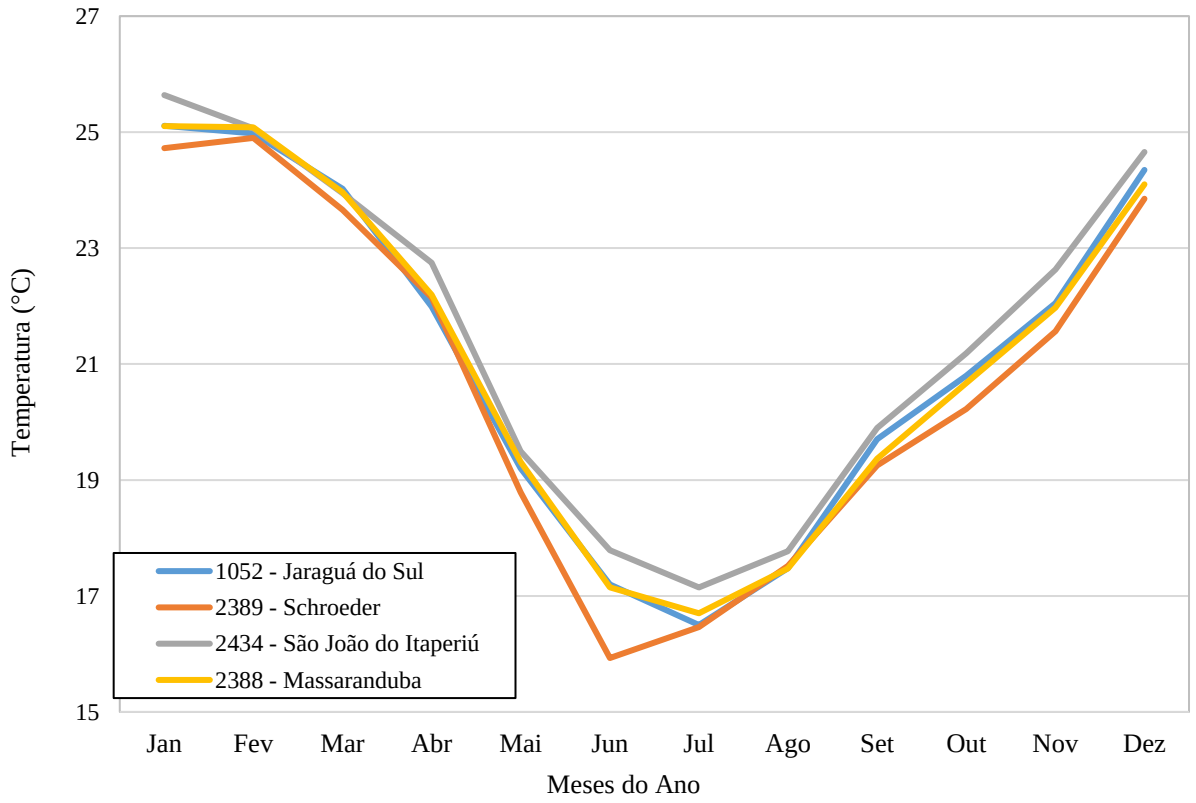


Figura 2.12 – Dados da série histórica (1991 a 2020) das estações meteorológicas situadas no entorno da BR-280/SC: Lotes 2.1 e 2.2

Fonte: EPAGRI/CIRAM (2025)

Observando os dados obtidos nas estações meteorológicas, verifica-se que a evolução climatológica histórica é muito similar em todos os casos, indicando homogeneidade do clima na região do estudo. Como a última série histórica apurada teve fim em 2020, há um intervalo de 5 anos até 2025, em que outra série histórica vem se formando, porém, ainda incipiente.

Neste caso, optou-se por tratar os dados relativos apenas ao ano de 2024, devido ser o mais recente e com a apuração dos dados já realizada para todos os meses e a cada hora (Figura 2.13), conforme recomendado para fins de determinação da temperatura equivalente.

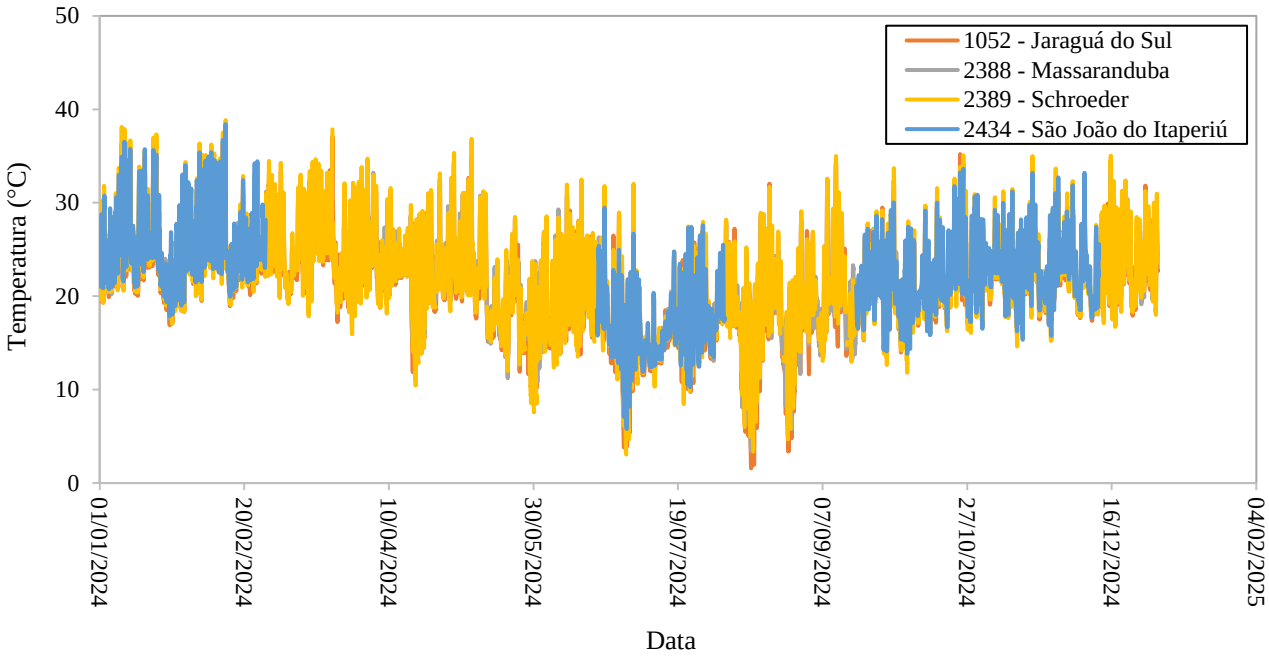


Figura 2.13 – Dados da série de 2024 das estações meteorológicas situadas no entorno da BR-280/SC: Lotes 2.1 e 2.2

Fonte: EPAGRI/CIRAM (2025)

Ainda, por razões de impraticabilidade e fim pouco eficiente em tabular os dados unitários utilizados nestas análises sob a forma de anexos, devido à vasta quantidade da ordem de milhares de dados brutos obtidos nas estações meteorológicas, tem-se que apenas as médias mensais históricas são fornecidas no Apêndice B.

A partir do exame dos dados fornecidos pela EPAGRI/CIRAM (2025), constatou-se que das quatro estações monitoradas, apenas a 1052: Jaraguá do Sul – Barra do Rio Cerro possuía os valores de temperatura completos para o ano de 2024, sem lacunas ou falhas no preenchimento. Portanto, como as duas séries históricas avaliadas previamente (Figura 2.11 e Figura 2.12) indicaram boa homogeneidade de dados para todas as estações, apenas a supracitada foi considerada doravante nas análises.

Confirmando a proposta de utilizar uma metodologia que permita a aplicação prática do cálculo da temperatura equivalente nesta pesquisa, sem a utilização dos meios tradicionais de medidas diretas nas estruturas dos pavimentos, tem-se que as Equações 2.4 e 2.5 (Mohseni, 1998) foram utilizadas para a determinação das temperaturas máximas e mínimas na profundidade de 24,0 cm, considerando a temperatura horária diária da estação meteorológica 1052, bem com a sua latitude (26º55’06’’).

$$T = 54{,}32 + 0{,}78.T_{ar} - 0{,}025(Lat^2) - 15{,}14.log(H + 25) \quad (2.4)$$

$$T = -1{,}56 + 0{,}72.T_{ar} - 0{,}004(Lat^2) + 6{,}26.log(H + 25) \quad (2.5)$$

Em que:

T é a temperatura superficial ou a uma dada profundidade, em ºC;

Tar é a temperatura do ar, em ºC;

Lat é a latitude do local em estudo, em (º) decimal; e

H é a cota de análise, em mm.

A profundidade de 24,0 cm foi escolhida como cota de análise, pois conforme será verificado nas simulações numéricas no tópico 4, consistiu na profundidade representativa da fibra inferior correspondente à camada asfáltica mais profunda das estruturas de pavimentos avaliadas com base nas rotinas de cálculo da metodologia francesa.

Aplicando-se os valores correspondentes às Equações 2.4 e 2.5, obteve-se o perfil das temperaturas altas, médias e baixas para a estação meteorológica 1052, a 24,0 cm de profundidade, em comparação ao seu próprio perfil global. As temperaturas médias foram calculadas com base no centro do intervalo determinado entre os picos de máximo e mínimo em cada dia (Figura 2.14).

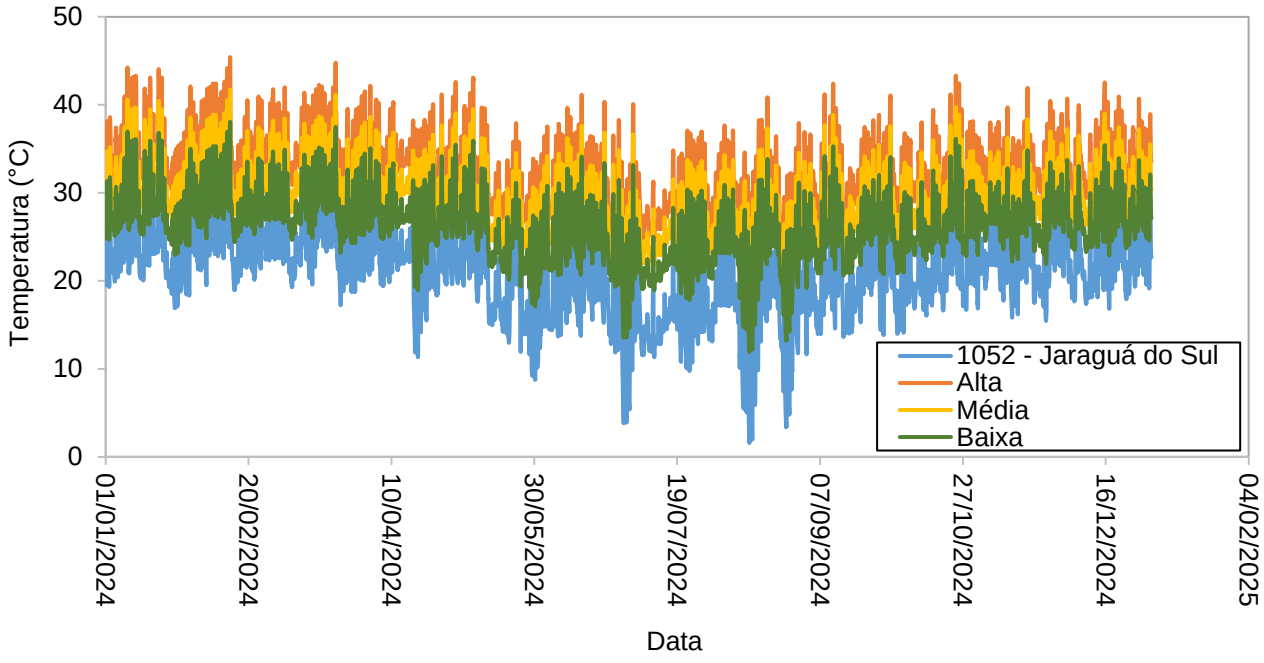


Figura 2.14 – Dados das temperaturas altas, médias e baixas a 24,0 cm de profundidade, da estação meteorológica 1052 situada no entorno da BR-280/SC: Lotes 2.1 e 2.2

Fonte: EPAGRI/CIRAM (2025)

Todavia, como os dados das temperaturas do ar foram obtidos para uma condição de monitoramento anual da estação 1052, a cada hora, sem que se dispusesse de temperaturas reais medidas nas profundidades próximas a 24,0 cm, apenas estimadas

pelas Equações 2.4 e 2.5, foi necessário estabelecer um comparativo de referência com a distribuição horária de um sítio experimental real.

Para tanto, foram analisados extratos diários de temperaturas do ar, oriundos de medições realizadas pelo período de um ano na estrutura de pavimento do carrossel de fadiga da *Université Gustave Eiffel* (UGE), que tivessem tendência próxima à obtida para estação 1052. Desta forma, foi possível decupar o extrato do mesmo dia para a profundidade de 25,0 cm (Figura 2.15).

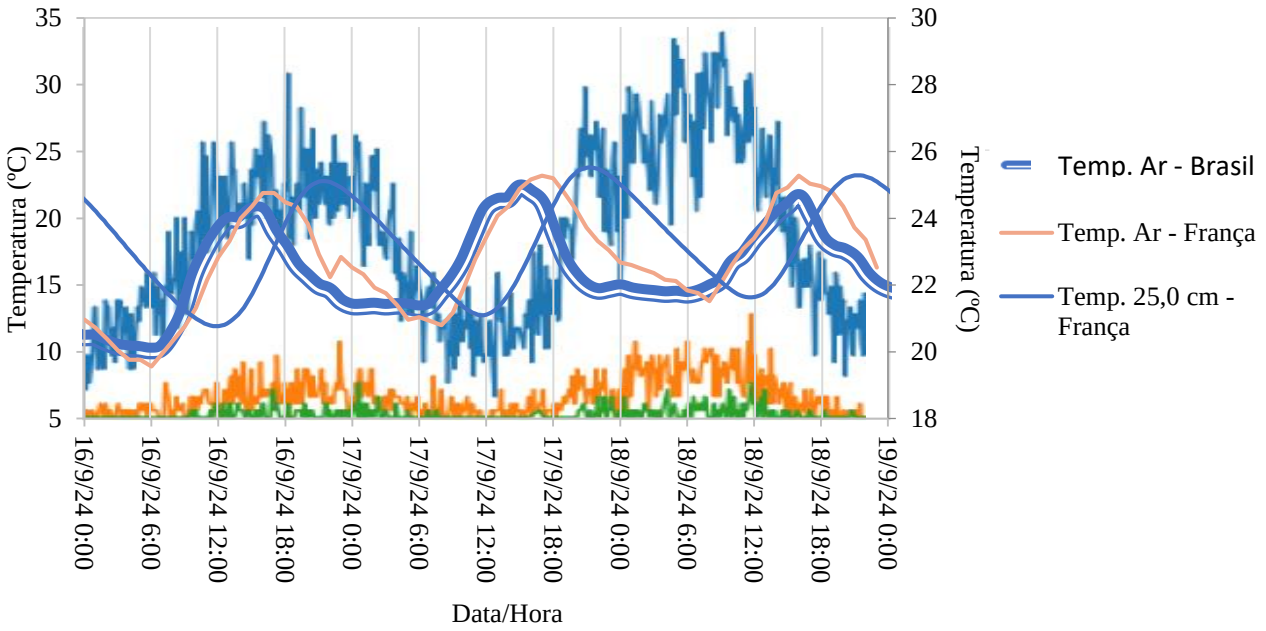


Figura 2.15 – Distribuição da temperatura, em função da variação horária de um dia

Fonte: EPAGRI/CIRAM (2025)

Observando a Figura 2.15, atesta-se a validação dos dados de distribuição horária tanto da temperatura do ar como a 25,0 cm de profundidade para as condições similares à estação 1052. Logo, como a contagem do tráfego realizada no trecho em estudo da BR-280/SC também compreendeu apenas um dia de trabalho, foi possível sobrepor a distribuição percentual horária, por turno, da volumetria apurada na contagem do tráfego apresentada na Figura 2.16, a saber: 40,0 % das 8h00 às 12h00; 44,0 % das 12h00 às 18h00, e; 16,0 % das 18h00 às 20h00, conforme depurado das informações em DNIT (2012).

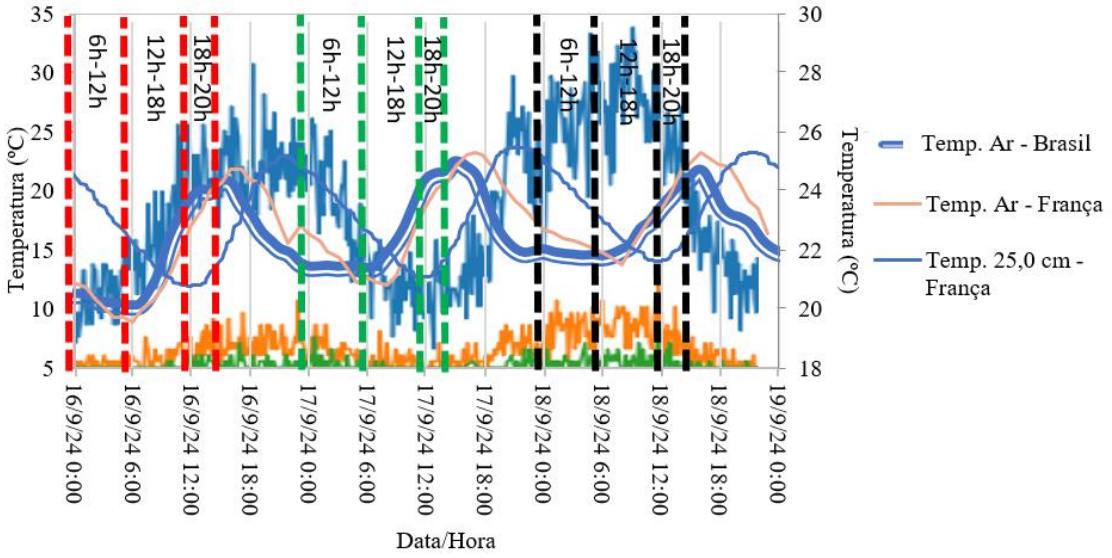


Figura 2.16 – Distribuição da temperatura, em função da variação percentual horária do tráfego para um dia

Fonte: EPAGRI/CIRAM (2025) e UGE (2024)

Do recorte selecionado, verificou-se que 40,0 % do volume de tráfego (06h00 e 12h00) solicita o pavimento na faixa mais baixa de temperaturas, enquanto 44,0 % (12h00 às 18h00) na faixa média, e 16,0 % (18h00 às 20h00) na faixa mais alta.

Neste contexto, cabe ressaltar que a escala das temperaturas a 25,0 cm observadas em cada intervalo horário descrito se mostra coerente, pois pela manhã a estrutura do pavimento ainda está em estágio inicial de absorção do calor advindo da radiação solar, posto que passou o período noturno sem esta contribuição direta. No turno vespertino ocorre um aumento gradual do calor acumulado do turno matutino, aliado à continuidade da incidência da radiação solar sobre a estrutura.

Das 18h00 às 20h00 percebe-se o pico máximo das temperaturas registradas, em razão de que nesta faixa horária há um acúmulo de toda a incidência de radiação solar ocorrida no dia, resultando no maior armazenamento de calor pelo pavimento. Em sequência, a partir das 20h00, é possível observar que há o decréscimo gradual da temperatura, devido à troca de calor com o ambiente externo, que no período noturno não conta com o calor proporcionado pela radiação solar.

Portanto, a partir dos dados estimados na Figura 2.14 a 24,0 cm de profundidade, com o uso das Equações 2.4 e 2.5, e tendo sido validada a similaridade da distribuição diária das temperaturas em sítio real, foi possível determinar o valor médio das temperaturas altas, baixas e médias, resultando em 32,26 ºC, 25,92 ºC e 29,09 ºC, respectivamente. Ainda, tendo-se a distribuição percentual do tráfego por faixa horária, a temperatura equivalente foi determinada pela soma dos produtos entre o percentual de tráfego e a temperatura correspondente à faixa considerada, ou seja, baixa, alta e média, resultando no valor de θ_{eq} em 28,33 ºC.

Ato contínuo, para verificar o efeito da variação da temperatura equivalente com a profundidade, a mesma lógica foi aplicada considerando cotas de 17,0 cm a 25,0 cm (Tabela 2.12).

Tabela 2.12 – Variação da temperatura equivalente com a profundidade

Profundidade (cm)	16,0	17,0	18,0	19,0	20,0	23,0	24,0	25,0	26,0
θeq **(ºC)**	28,62	28,58	28,54	28,50	28,46	28,36	28,33	28,30	28,27

Fonte: Clara (2026)

Os dados apresentados na Tabela 2.12 resultam em uma θeq média de 28,44 ºC, com desvio-padrão de 0,13 ºC, ou seja, uma variação muito irrisória, indicando que a θeq é pouco influenciada pela variação da profundidade nas cotas analisadas. Por esta razão, a θeq considerada nas simulações numéricas foi de 28,0 ºC.

2.6 EIXO-PADRÃO

Embora o eixo-padrão adotado pelas metodologias francesa e MeDiNa sejam distintos em suas configurações, tem-se que não há restrições da primeira quanto ao uso de outras configurações à prevista em suas especificações nas rotinas de cálculo para o dimensionamento das estruturas de pavimento, dado que a primeira não considera o princípio de equivalência de eixos na avaliação dos danos às estruturas de pavimento como a segunda, mas o dano real por tipo de eixo solicitante.

Para tanto, duas abordagens foram procedidas nas simulações numéricas, ou seja, considerando o eixo-padrão simples de roda dupla (ESRD) com a carga de 8,2 t, a fim de respeitar o princípio da equivalência adotada na metodologia brasileira, e com 10,0 t, visando avaliar os efeitos da aplicação da carga legal autorizada a circular em campo pela legislação brasileira para o ESRD (Tabela 2.13). Portanto, respeitando a concepção particular de cada metodologia, tem-se que as análises com ESRD de 10,0 t foram realizadas apenas no contexto da metodologia francesa[2], além das simulações com 8,2 t, para fins de confrontação com os resultados obtidos pela metodologia MeDiNa.

Tabela 2.13 – Configurações do eixo-padrão adotado nas simulações numéricas

Parâmetro	**Valor**		**Unidade**
Carga do eixo	8,2	10,0	t
Carga da roda	2,05	2,50	t
Distância longitudinal (Ty)	0,00	0,00	cm
Distância entre rodas (Tx)	32,40	32,40	cm

Fonte: LDTPav (2025)

Tomando como base o princípio da axissimetria (Figura 2.17), tem-se que cada semi-eixo comporta as mesmas condições de carregamento. E, como a ferramenta computacional Viscoroute 2.0 (Chabot *et al.*, 2010) considera esta situação para os dados de entrada, a

[2] Na França, o peso do eixo-padrão legal é de 13 t, limite máximo para um eixo simples de roda dupla, conforme previsto no documento Code de la Route, Capítulo II – Pesos e dimensões, Artigo R312-5 (de 1º de agosto de 2021).

distância entre rodas foi estabelecida em 16,20 cm para cada ponto de contato da roda com a superfície do pavimento, em relação à origem na coordenada (x = 0,0; y = 0,0).

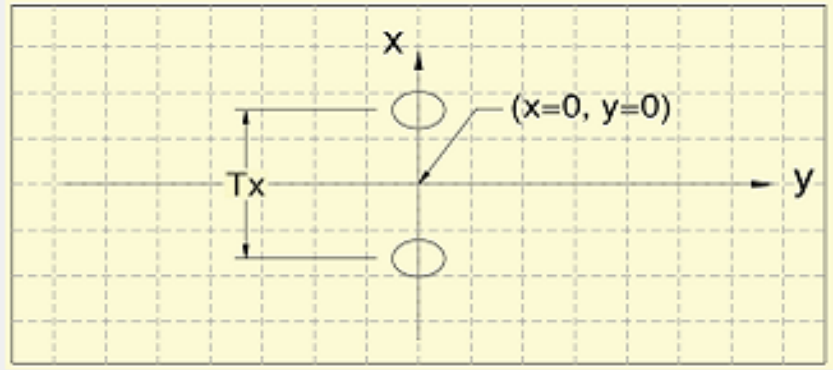


Figura 2.17 – Eixo-padrão axissimétrico adotado nas simulações numéricas

Fonte: Adaptado de MeDiNa 1.1.9.0 (DNIT, 2023b)

É importante destacar que a orientação dos eixos cartesianos considerada pelas ferramentas computacionais MeDiNa 1.1.9.0 (DNIT, 2023b) e Viscoroute (Chabot *et al.*, 2010) são diferentes, devendo-se inverter as posições entre as letras x e y ao que se lê na Figura 2.17 para a segunda (Figura 2.18).

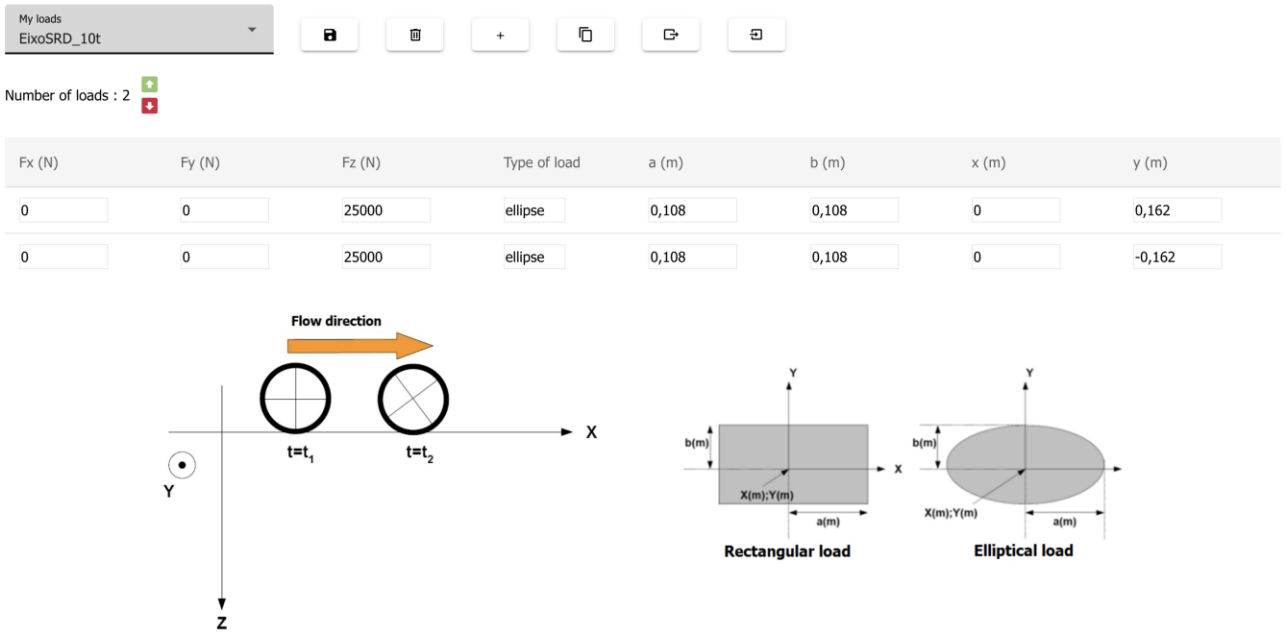


Figura 2.18 – Exemplo dos dados de entrada do eixo-padrão axissimétrico na interface da ferramenta computacional *Viscoroute* 3.1

Fonte: Adaptado de Clara (2026)

Outro ponto a ser esclarecido diz respeito à utilização da área de contato circular das cargas solicitantes, pois em que pese as pesquisas realizadas com dados reais de campo já terem indicado a geometria retangular como a que melhor representa as condições práticas de serviço, conforme abordado no tópico 5.3 do RP – 032, tem-se que o programa MeDiNa

1.1.9.0 (DNIT, 2023b) não permite tal configuração. Portanto, para que também não houvesse influência desta variável entre as ferramentas computacionais, a geometria circular foi a adotada para todos os casos simulados.

2.7 ESTRUTURAS DE PARTIDA

Considerando as prerrogativas particulares das metodologias francesa e MeDiNa, conforme já discorrido nos tópicos anteriores, a concepção das estruturas de partida utilizada nas simulações numéricas tomou em conta duas vertentes, a saber:

- Constituir a mesma plataforma de fundação (PF) para todos os casos, isto é, o conjunto da parte superior do solo do subleito e a respectiva camada de reforço, e;
- Considerar as espessuras iniciais das camadas asfálticas respeitando os valores mínimos recomendados pela metodologia francesa, em razão da constituição granulométrica das formulações estudadas, e dos procedimentos de compactação em campo.

2.7.1 Plataforma de Fundação

A partir dos dados de entrada informados nas Figuras 2.4 e 2.6, para o solo do subleito SAFL e para a camada de reforço em BGS, respectivamente, constituiu-se a PF da estrutura de pavimento considerada nas simulações numéricas (Figura 2.19).



Figura 2.19 – Plataforma de fundação (PF) das estruturas de pavimento utilizada nas simulações numéricas

Fonte: Clara (2026)

Reitera-se a espessura de 25,0 cm adotada para a camada de BGS, o MR de 100 MPa e de 300 MPa do solo do subleito e para a camada de BGS, nesta ordem, pelas razões já explanadas no tópico 2.3.

2.7.2 Camadas Asfálticas

As misturas asfálticas utilizadas nas simulações numéricas foram as mesmas mencionadas ao longo do tópico 2.4, e testadas durante a campanha experimental do TED nº 702/2020, *Grave-Bitume* (GB) e *Enrobé à Module Élevé* (EME), ambas de graduação 0/20 mm.

Cabe esclarecer que, de acordo com a metodologia francesa (Manuel LPC, 2007), as misturas asfálticas GB e EME foram concebidas para utilização em camadas de base e sub-base, não sendo recomendada a utilização em camadas de rolamento ou de ligação. A GB pode ser dimensionada com espessuras compreendidas entre 8,0 cm e 16,0 cm,

independentemente da classe. No caso da EME, as espessuras a serem adotadas dependem da granulometria utilizada na formulação, logo, como a graduação concebida para esta pesquisa foi a 0/20 mm, as espessuras adotadas devem atender ao intervalo entre 9,0 cm e 15,0 cm.

A faixa de espessuras das camadas asfálticas especificadas pela metodologia francesa para as misturas GB e EME, também satisfazem as premissas da metodologia MeDiNa (DNIT, 2023a), pois prevê a possibilidade de utilizar o intervalo entre 5,0 cm e 15,0 cm, com exceção da mistura asfáltica GB, que pode atingir até 16,0 cm. A estrutura de partida concebida para as simulações numéricas é ilustrada na Figura 2.20.

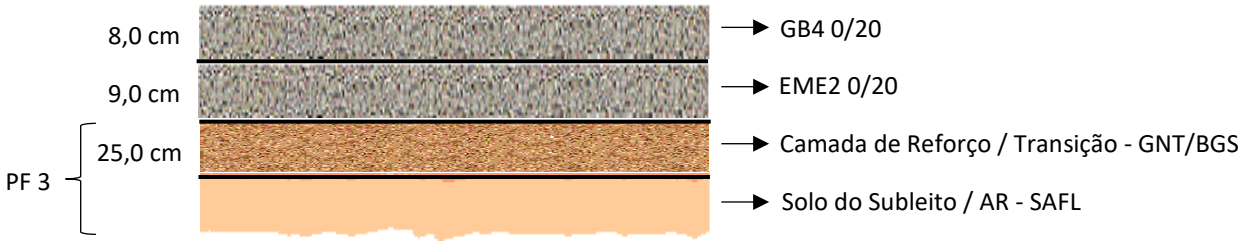


Figura 2.20 – Estrutura de pavimento inicial utilizada nas simulações numéricas: elasticidade linear e carregamento estacionário

Fonte: Clara (2026) e LDTPav (2025)

Para as simulações realizadas com o programa MeDiNa 1.1.9.0 (DNIT, 2023b), foram utilizados os dados de entrada ilustrados nas Figuras 2.4, 2.6, 2.9 e 2.10. No contexto da metodologia francesa, foram utilizados os valores de $|E*|$ apresentados na Tabela 2.8 para as simulações elásticas lineares (Figura 2.21).

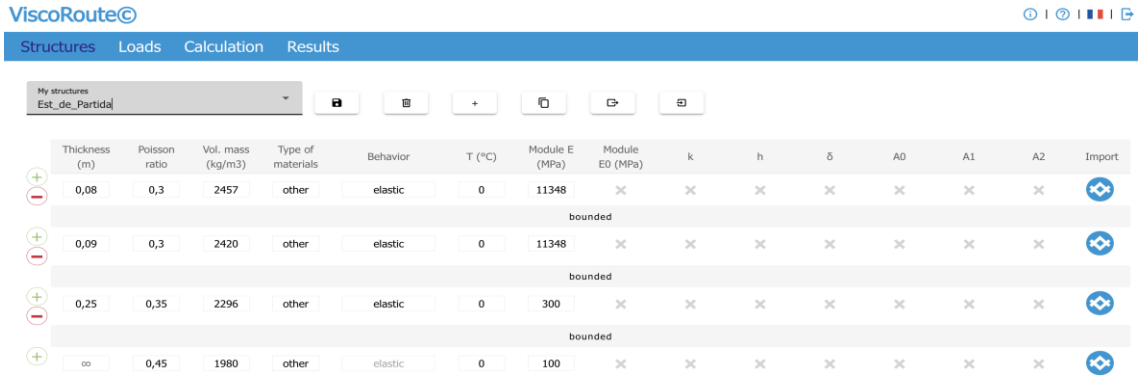


Figura 2.21 – Estrutura de pavimento inicial utilizada nas simulações numéricas: elasticidade linear e carregamento estacionário – *Viscoroute* 3.1[3]

Fonte: Adaptado de LDTPav, 2025a

[3] A título de apresentação dos dados no Viscoroute, usaremos as telas de entrada da estrutura de pavimento a ser analisada, utilizando a versão 3.1.

No caso das simulações viscoelásticas lineares (Figura 2.22), com aplicação de carregamento dinâmico, tem-se que foram utilizados os parâmetros do modelo de Huet-Sayegh (1965) (Tabela 2.9).

Neste âmbito, a solicitação foi considerada a uma velocidade de 20 m/s (72 km/h), em todas as variações desta modalidade, pois de acordo com o Guide Technique (1994), tem-se que trafegando nesta velocidade a uma θeq de 15 ºC, adotada na França, considera-se a frequência dos sinais de deformação obtidos na ordem de 10 Hz. Ainda, que a transposição de 10 Hz para 25 Hz é negligenciável para fins de dimensionamento nas temperaturas intermediárias, situação em que foi compreendida a θeq de 28 ºC determinada no tópico 2.5.

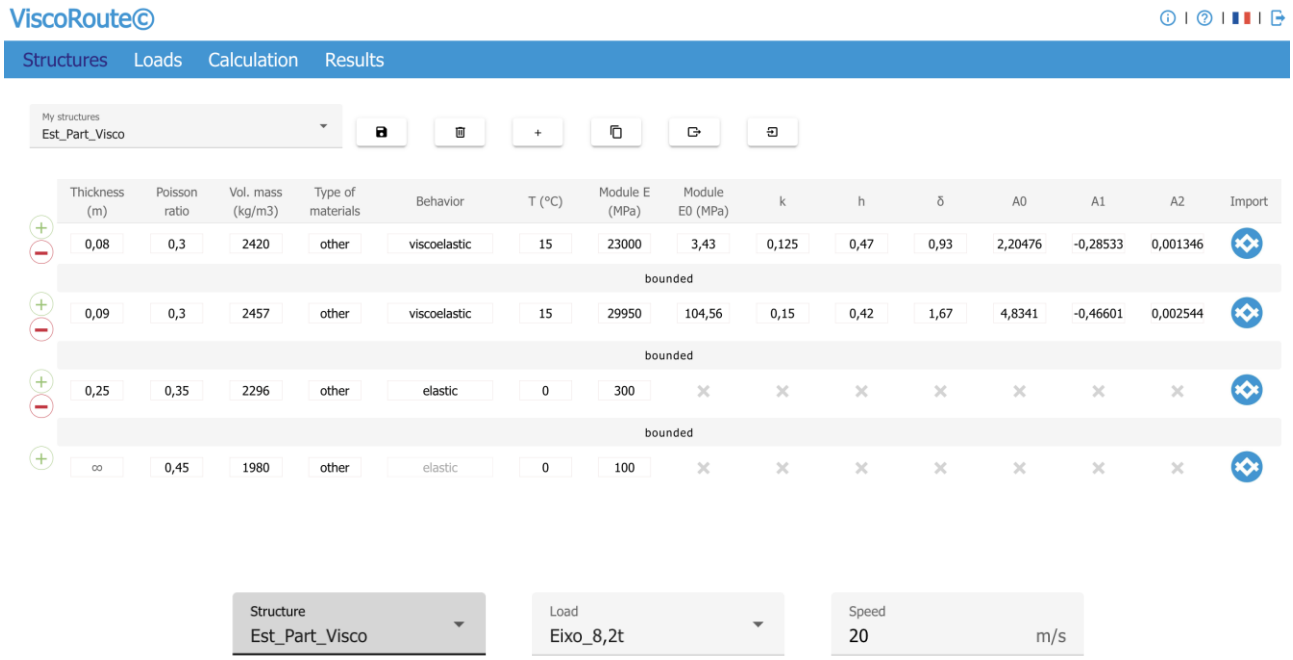


Figura 2.22 – Estrutura de pavimento inicial utilizada nas simulações numéricas: viscoelasticidade linear e carregamento dinâmico – Viscoroute 3.1[4]

Fonte: Adaptado de LDTPav, 2025a

Ressalta-se que esta pesquisa não teve como escopo de suas atividades analisar o impacto da variação da frequência no dimensionamento das estruturas de pavimento, pois necessitaria de uma campanha experimental duplicada ao que foi previsto na pactuação do TED nº 702/2020, não havendo tempo hábil para a sua execução. Portanto, foi avaliado apenas o impacto da variação de temperatura para os cenários simulados.

Ademais, mesmo as estruturas de partida consideradas não possuindo camada de rolamento em sua concepção, foram conduzidas às rotinas de simulações numéricas sem

[4] A título de apresentação dos dados no Viscoroute, usaremos as telas de entrada da estrutura de pavimento a ser analisada, utilizando a versão 3.1.

qualquer problema, pois de acordo com os critérios estabelecidos pela metodologia francesa, são responsáveis apenas pelo comportamento funcional da estrutura de pavimento, ou seja, não possuem característica estrutural. Desta forma, não há obrigatoriedade de prever a sua inserção nas rotinas de dimensionamento, podendo ser especificadas após estas análises, desde que atendam aos critérios de formulação estabelecidos pelo Manuel LPC (2007).

Desta forma, as simulações numéricas deste RP – 035 destinaram-se a avaliar o desempenho apenas das camadas estruturais dos pavimentos concebidos.

2.8 COMPARAÇÃO ENTRE AS FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Considerando as premissas gerais apresentadas ao longo deste capítulo, faz-se necessária uma breve comparação entre as ferramentas de cálculo mecanístico empregadas nas simulações numéricas deste RP – 035, em especial o *Alizé* 2 (IFSTTAR, 2016), o *Viscoroute* 3.1[5] e o núcleo AEMC incorporado à ferramenta MeDiNa 1.1.9.0 (DNIT, 2023b). O objetivo desta comparação é evidenciar que, quando alimentadas com os mesmos dados de entrada, tais ferramentas entregam resultados equivalentes em termos de campos de tensão e deformação, de modo que as diferenças de dimensionamento observadas entre a metodologia francesa e o MeDiNa decorrem essencialmente das premissas de cada método (critérios de ruptura, funções de transferência, modelos de dano, valores admissíveis etc.), e não do núcleo de cálculo em si.

De forma geral, as três ferramentas baseiam-se na formulação clássica de camadas múltiplas, em regime de elasticidade linear, assumindo materiais homogêneos e isotrópicos por camada e carregamento aplicado na superfície do pavimento por meio de um eixo-padrão. Não obstante as diferenças de interface e de implementação numérica, o problema matemático subjacente às rotinas de cálculo é o mesmo: a partir de uma estrutura de pavimento definida (espessuras e propriedades dos materiais) e de um carregamento especificado (tipo de eixo, nível de carga e condições de contato pneu–pavimento), determinam-se as tensões, deformações e deslocamentos ao longo da profundidade do sistema, em pontos considerados críticos para o dimensionamento.

Para comprovar essa equivalência mecanística, foi adotado um cenário de referência, no qual se considerou:

- Uma mesma estrutura de pavimento, em termos de sequência de camadas e espessuras (camadas coladas), sendo a espessura de 9 cm para a camada GB4, 10 cm para a camada EME2 e 25 cm para a plataforma do pavimento, coerente com as estruturas de partida apresentadas no tópico 2.7 (Figura 2.20 a Figura 2.22);

[5] A título de exemplo de aplicação, exclusivamente neste capítulo, os cálculos da simulação numérica em regime de elasticidade linear serão realizados com a ferramenta Viscoroute, versão 3.1.

- As mesmas propriedades mecânicas dos materiais (módulos de elasticidade e coeficientes de Poisson), tanto para os casos em que se utilizaram os parâmetros da metodologia francesa (módulos de referência a 15 °C e 10 Hz), quanto para aqueles em que se adotaram os módulos obtidos no âmbito da metodologia MeDiNa;
- O mesmo carregamento por eixo, correspondente a um Eixo Simples de Roda Dupla (ESRD) com carga total de 8,2 t, já caracterizado nos tópicos anteriores, mantendo-se idênticas as condições de distribuição de pressão na área de contato pneu–pavimento.

Neste primeiro momento, a comparação restringe-se às análises em regime puramente elástico, ainda que o *Viscoroute* 3.1 disponha de formulação viscoelástica. Assim, para fins de equivalência, foram utilizados módulos elásticos equivalentes para as camadas asfálticas, em temperatura e frequência representativas, tanto no contexto da metodologia francesa quanto no MeDiNa. Dessa forma, eliminam-se, nesta etapa, os efeitos específicos da viscoelasticidade dependente do tempo e da temperatura, permitindo uma comparação direta entre os núcleos de cálculo.

Os resultados analisados correspondem, principalmente, às deformações horizontais de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico, tradicionalmente associadas à verificação da fadiga das misturas asfálticas. As Figura 2.23, 2.24 e 2.25 apresentam as janelas de entrada para cada ferramenta de simulação numérica, *Alizé*, *Viscoroute* e AEMC, respectivamente.

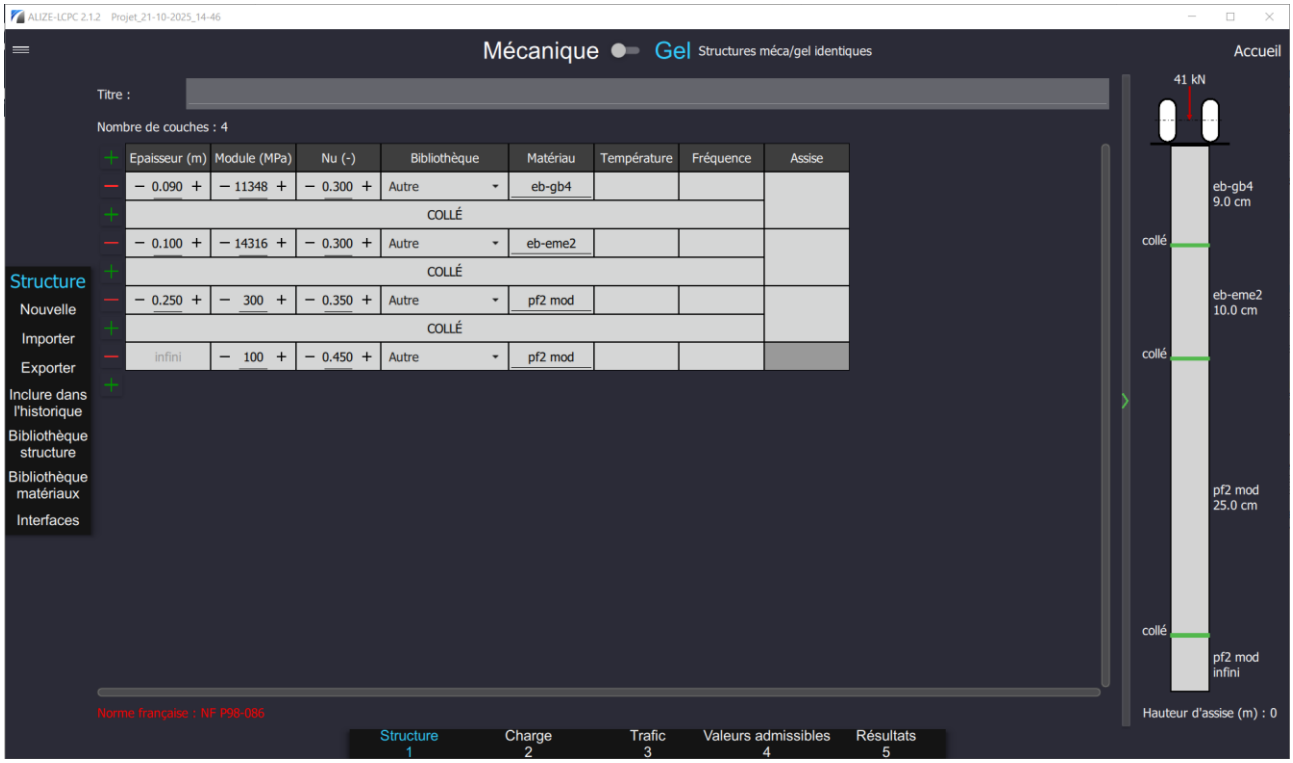


Figura 2.23 – Estrutura de pavimento na simulação numérica *Alizé* 2

Fonte: LabTrans (2025)

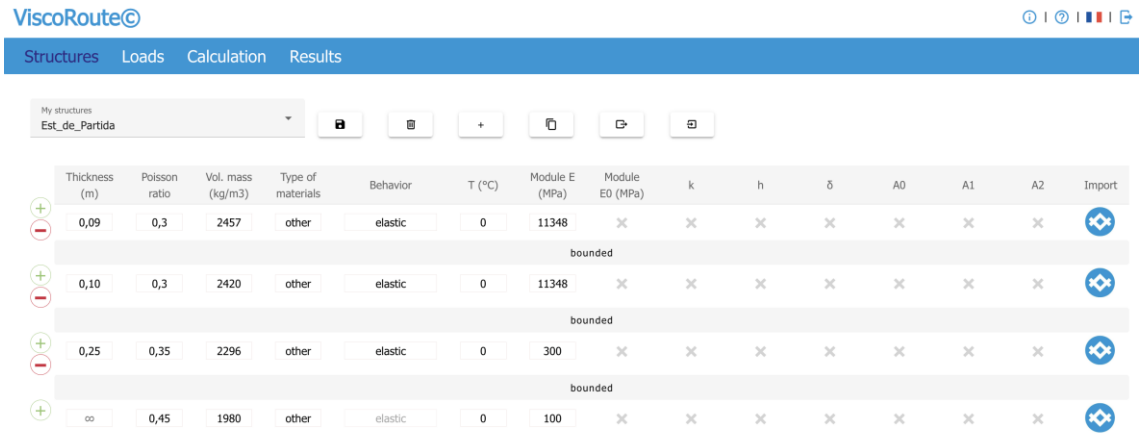


Figura 2.24 – Estrutura de pavimento na simulação numérica Viscoroute 3.1

Fonte: LabTrans (2025)

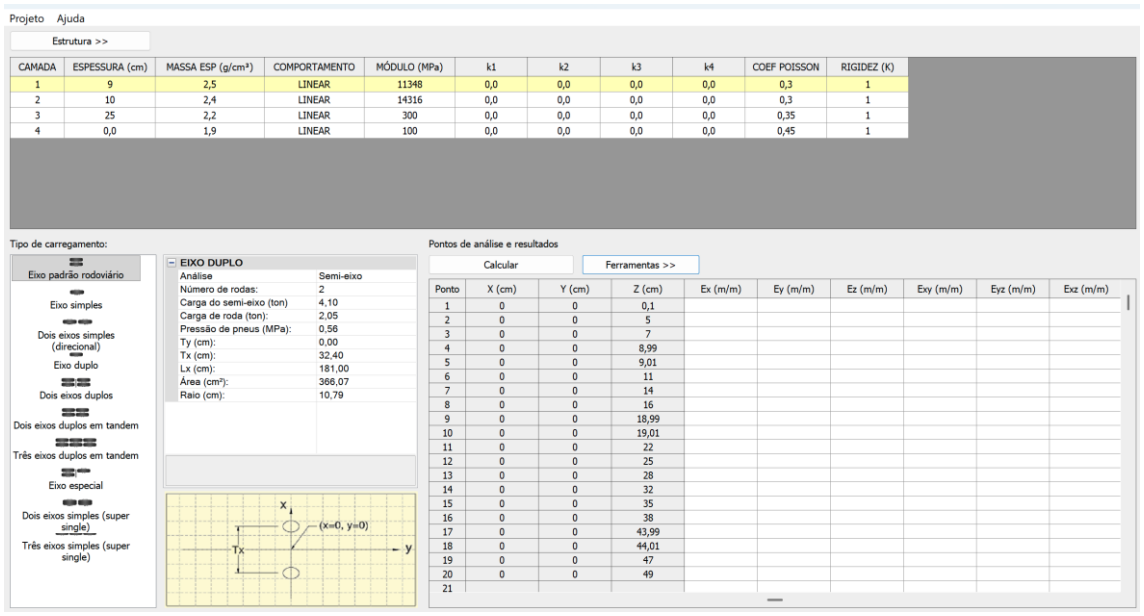


Figura 2.25 – Estrutura de pavimento na simulação numérica AEMC

Fonte: LabTrans (2025)

Para fins de apresentação dos resultados, foram definidos, para o AEMC e o Viscoroute, pontos de análise nas profundidades z = [0,1; 5; 7; 8,99; 9,01; 11; 14; 16; 18,99; 19,01; 22; 25; 28; 32; 35; 38; 43,99; 44,01; 47; 49] cm, considerando o centro de carregamento entre as duas áreas de contato das rodas duplas (x = 0, y = 0 cm).

A Figura 2.26 apresenta os resultados obtidos com a ferramenta Alizé 2. A deformação longitudinal ε_{xx}, na direção de carregamento, próxima a superfície do pavimento (z = 0 cm) é da ordem de 57,4 μdef (μm/m), sendo positivo uma deformação de compressão, enquanto a deformação na fibra inferior da camada asfáltica (z ≈ 19 cm) é da ordem de -51,3 μdef, sendo negativo uma deformação de tração.

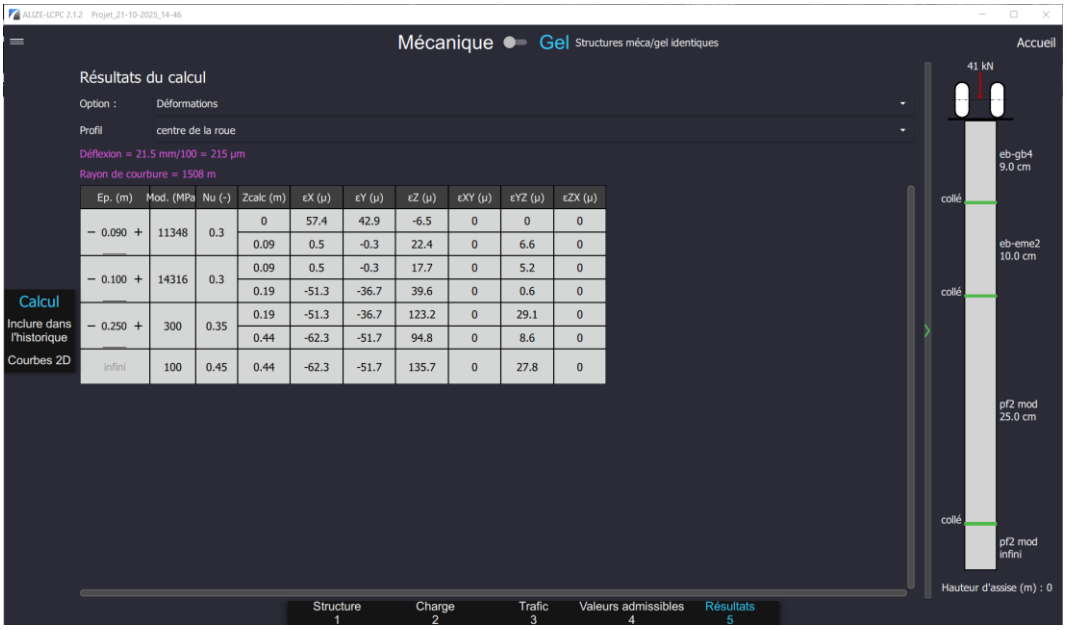


Figura 2.26 – Deformações resultantes da simulação numérica com a ferramenta Alizé 2

Fonte: LabTrans (2025)

A Figura 2.27 apresenta as deformações longitudinais ε_{xx}, no sentido do deslocamento da carga, obtidos com o *Viscoroute* 3.0 nas diferentes profundidades de análise. As deformações próximas à superfície (z = 0,1 cm) são da ordem de -59,29 μdef, sendo uma deformação negativa compressão, enquanto a deformação próxima à fibra inferior da camada asfáltica (z = 18,99 cm) é da ordem de 53,24 μdef, sendo positivo uma deformação de tração.

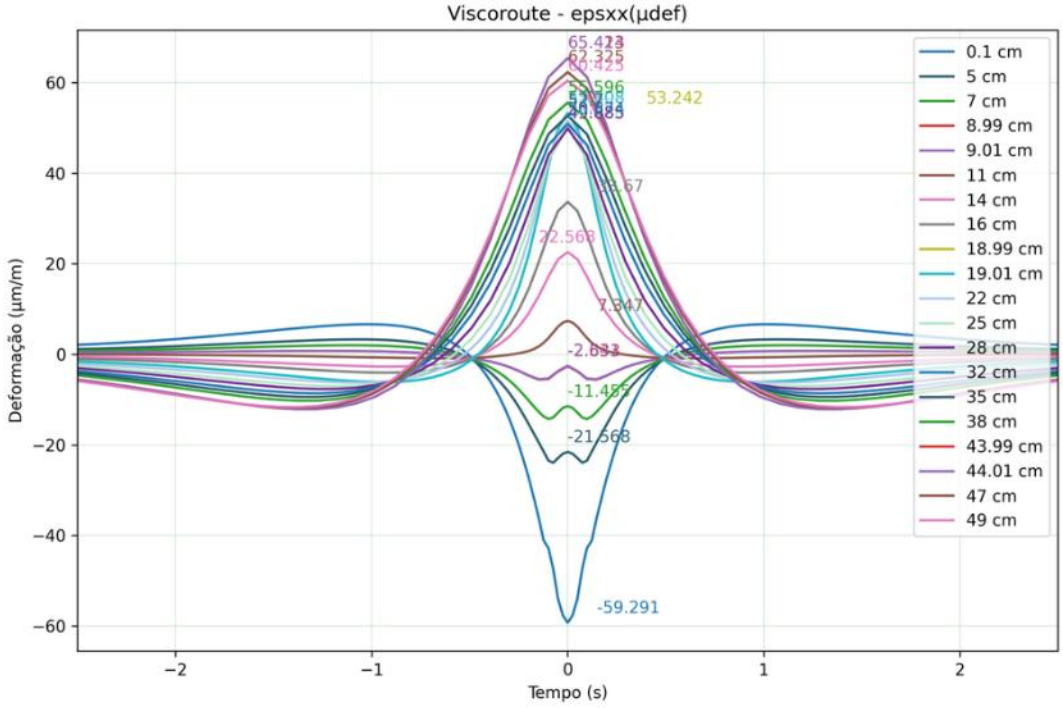


Figura 2.27 – Deformações resultantes da simulação numérica com a ferramenta Viscoroute 3.1

Fonte: LabTrans (2025)

A Figura 2.28 apresenta as deformações longitudinais ε_{yy}, no sentido do deslocamento da carga, obtidos com a ferramenta AEMC nas diferentes profundidades de análise. As deformações próximas à superfície (z = 0,1 cm) são da ordem de 57,38 μdef, sendo uma deformação positiva compressão, enquanto a deformação próxima à fibra inferior da camada asfáltica (z = 18,99 cm) é da ordem de -52,75 μdef, sendo negativo uma deformação de tração.

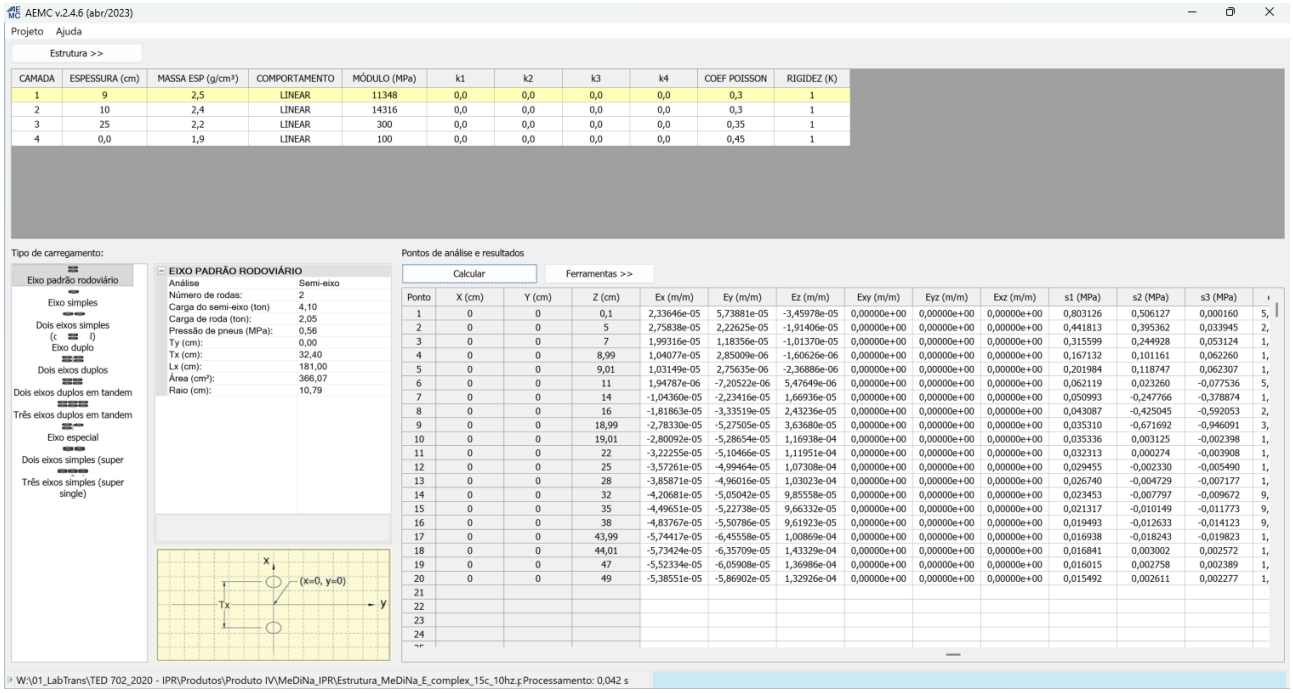


Figura 2.28 – Deformações resultantes da simulação numérica com a ferramenta AEMC

Fonte: LabTrans (2025)

A Figura 2.29 apresenta-se os resultados obtidos pelas ferramentas *Viscoroute*, AEMC e *Alizé* superpostos. Para fins de comparação, adotou-se uma convenção única de sinais para as deformações longitudinais, considerando-se: valores positivos para deformações de tração e negativos para deformações de compressão, procedendo-se, quando necessário, ao ajuste dos sinais em relação à saída nativa de cada programa. As simulações realizadas mostram que, para um mesmo conjunto de dados de entrada, as curvas de variação das deformações com a profundidade obtidas com o Alizé, com o Viscoroute 3.1 (em modo elástico equivalente) e com o AEMC/MeDiNa são praticamente coincidentes.

As pequenas diferenças observadas entre os resultados podem ser atribuídas a particularidades de cada código, tais como:

- forma de representação numérica do carregamento (idealização da área de contato, discretização do eixo, hipóteses de simetria);
- estratégias de discretização e integração numérica ao longo da profundidade; e
- critérios internos de convergência e interpolação de resultados.

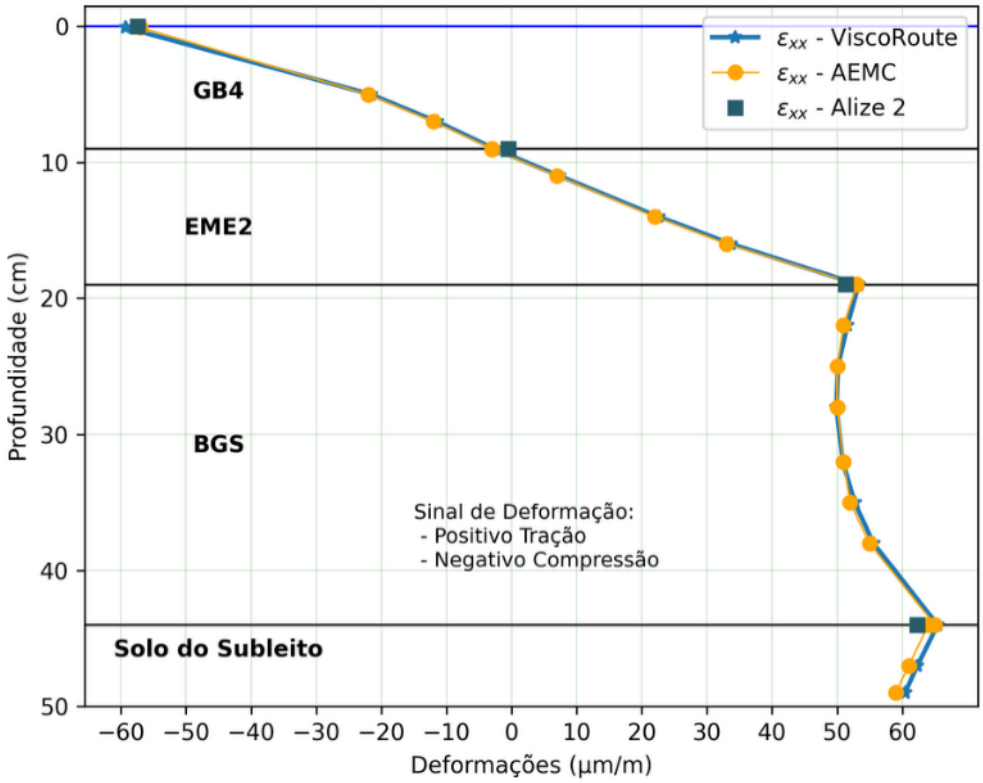


Figura 2.29 – Comparação entre as deformações resultantes das simulações numéricas Alizé, Viscoroute e AEMC

Fonte: LabTrans (2025)

Contudo, tais diferenças são da ordem de poucos por cento e não alteram as conclusões de engenharia quanto ao nível de solicitação das camadas, podendo ser interpretadas como variações numéricas naturais entre diferentes implementações de um mesmo modelo teórico.

Diante do exposto, a análise comparativa entre as ferramentas de simulação numérica permite assumir, com segurança, que:

- O núcleo de cálculo mecanístico das metodologias francesa e MeDiNa é, na prática, equivalente, quando se consideram as mesmas estruturas, propriedades e carregamentos;
- As diferenças de espessuras de camadas e de vidas de projeto obtidas nos capítulos seguintes decorrem, fundamentalmente, das premissas próprias de cada método de dimensionamento (valores admissíveis, funções de transferência, hipóteses de dano e fatores de segurança), e não de divergências nos resultados de tensões e deformações fornecidos pelas ferramentas de cálculo.

Os desdobramentos numéricos desta comparação, incluindo as deformações obtidas ao longo da profundidade das estruturas para os diferentes conjuntos de módulos (método francês e MeDiNa), subsidiam e corroboram os resultados apresentados e discutidos nos Capítulos 4 e 5, no contexto dos cenários simulados e das estruturas finalmente aprovadas por cada metodologia.

3 CENÁRIOS SIMULADOS

Considerando as estruturas de partida apresentadas no tópico 2.7, tem-se que as simulações numéricas realizadas neste RP – 035 compreenderam os cenários apresentados a seguir.

3.1 VALORES ADMISSÍVEIS

A metodologia MeDiNa (DNIT, 2023a) especifica que as condições principais para a aprovação do dimensionamento de uma dada estrutura de pavimento de concreto asfáltico, ao final da vida útil projetada, são as seguintes:

- Não exceder o limite da deformação permanente admissível acumulada prevista para a classe da via em projeto (Tabela 3.1);
- Uma dada camada não pode apresentar deformação permanente unitária acima de 5,0 % de sua espessura;
- O subleito não pode apresentar deformação permanente acima de 5,0 mm, e;
- As misturas asfálticas não podem apresentar área trincada acima de 30,0 %.

Tabela 3.1 – Limites admissíveis de deformação permanente acumulada previstos para as estruturas de pavimento na metodologia MeDiNa

Tipo de Via	Limite Admissível Acumulado de Deformação Permanente (mm)
Sistema Arterial Principal	10,0
Sistema Arterial Primário	13,0
Sistema Arterial Secundário	20,0
Sistema Coletor Primário	13,0
Sistema Coletor Secundário	20,0
Sistema Local	20,0

Fonte: Adaptado de DNIT (2023a)

Conforme já discorrido no tópico 2.1, a BR-280/SC, Lotes 2.1 e 2.2, foi considerada como estudo de caso. Logo, tem-se que o sistema arterial principal é o que atende à categoria da via supracitada, observando-se o limite de 10,0 mm para a admissibilidade de deformação permanente global das estruturas de pavimento dimensionadas.

No contexto da metodologia francesa, as Equações 4.6 e 4.8 apresentadas no tópico 4.4 do RP – 032, são utilizadas para o cálculo dos valores admissíveis de deformação permanente no topo das plataformas de fundação (PF) e das fibras inferiores das camadas asfálticas mais profundas de uma dada estrutura de pavimento, respectivamente.

Para estabelecer as deformações admissíveis das misturas asfálticas [$\varepsilon(NE, \theta eq, f)$], foram tomados os valores dos ensaios de fadiga na condição mais crítica de $\varepsilon 6$ (Figura 2.7; Tabela 2.7), do $|E*|$ tanto de referência quanto na θeq de 28 ºC e 10 Hz (Tabela 2.8), o número N de 2,55 x 10^8, bem como os coeficientes de risco (kr), heterogeneidade (ks) e de ajuste campo/laboratório (kc) abordados no tópico 4.2 do RP – 032.

O risco probabilístico de ruptura (kr) das camadas asfálticas dimensionadas foi atribuído em 1,0 %, conforme adota-se usualmente para projetos de pavimento das autoestradas (*Autoroutes*) na França, sendo o caso que mais se assemelha ao âmbito das rodovias federais no Brasil, em que os valores utilizados nesta pesquisa foram determinados com o uso da Equação 20 (vide tópico 4.2 do RP – 032), a saber: 0,661 e 0,722, para estruturas portando as camadas asfálticas mais profundas em GB e EME, respectivamente.

No caso do ks, como foi concebida uma PF3 para as estruturas de pavimento (Figura 2.20) com 300 MPa no topo da camada de BGS, o valor a considerar é 1,0 (vide Tabela 4.4 do RP – 032). Para o kc, tem-se que nos cenários em que as misturas de módulo elevado EME e GB constituíram as camadas mais profundas, situação a ser melhor esclarecida no tópico 3.2, os valores adotados foram 1,0 e 1,3 (vide Tabela A1 do RP – 032), respectivamente.

Dado o exposto, os valores admissíveis de [$\varepsilon\,(NE,\ \theta eq,\ f)$] serão apresentados no tópico 3.2, devido necessitarem de maiores explicações quanto aos cenários simulados. Quanto à deformação admissível no topo da PF ($\varepsilon z,\, ad$), a partir do número N de 2,55 x 10^8 aplicado à Equação 4.4 do RP – 032, obteve-se o valor de 163,28 μdef.

3.2 TIPOS DE CENÁRIOS

Com base nas explanações já discorridas, tem-se que os cenários estabelecidos para o desenvolvimento das simulações numéricas, em cada metodologia considerada, foram divididos conforme apresentado nas Tabelas 3.2 e 3.3.

Tabela 3.2 – Tipos de cenários estabelecidos para a realização das simulações numéricas: metodologia MeDiNa

Tipo de Simulação	Caso	Cenários	Tipos de Estruturas
Elástica linear e carregamento estacionário	1	Padrão do método Estrutura 'Avaliada'	GB4 / EME2
	2		GB4 e GB4 / GB4
	3		EME2 e EME2 / EME2
	4	Padrão do método Estrutura 'Dimensionada'	GB4 / EME2
	5		GB4 e GB4 / GB4
	6		EME2 e EME2 / EME2

*Considerando variações na estrutura de partida (Figura 2.20) e PF igual em todos os casos.

Fonte: LDTPav (2025)

Tabela 3.3 – Tipos de cenários estabelecidos para a realização das simulações numéricas: metodologia francesa

Tipo de Simulação	Caso	Cenários	Tipos de Estruturas[a]
Elástica linear e carregamento estacionário	1	Padrão do método: [ε (NE, θ_{eq}, f)] ε_6 = 10 ºC e 25 Hz |E*| = 10 ºC e 10 Hz θ_{eq} = 15 ºC e 10 Hz	GB4 / EME2
	2		GB4 e GB4 / GB4
	3		EME2 e EME2 / EME2
	4	[ε (NE, θ_{eq}, f)] ε_6 = 10 ºC e 25 Hz |E*| = 10 ºC e 10 Hz θ_{eq} = 28 ºC e 10 Hz	GB4 / EME2
	5		GB4 e GB4 / GB4
	6		EME2 e EME2 / EME2
Viscoelástica linear e carregamento dinâmico	7	[ε (NE, θ_{eq}, f)] ε_6 = 10 ºC e 25 Hz |E*| = 10 ºC e 10 Hz θ_{eq} = 15 ºC e 10 Hz V = 20 m/s	GB4 / EME2
	8		GB4 e GB4 / GB4
	9		EME2 e EME2 / EME2
	10	[ε (NE, θ_{eq}, f)] ε_6 = 10 ºC e 25 Hz |E*| = 10 ºC e 10 Hz θ_{eq} = 28 ºC e 10 Hz V = 20 m/s	GB4 / EME2
	11		GB4 e GB4 / GB4
	12		EME2 e EME2 / EME2

[a] Considerando variações na estrutura de partida (Figura 2.20) e PF igual em todos os casos.

Fonte: Clara (2026)

Importante destacar que nas simulações numéricas que envolveram a ferramenta computacional MeDiNa 1.1.9.0 (DNIT, 2023b), verificam-se os cenários denominados Estrutura ‘Avaliada’ e Estrutura ‘Dimensionada’ (Tabela 3.2). Isto ocorre devido à plataforma da referida ferramenta permitir que sejam feitas avaliações das estruturas de pavimento previamente ao uso da função ‘Dimensionar’.

Na prática, significa que o projetista pode solicitar ao programa que verifique se a estrutura que está pretendendo dimensionar atende aos critérios admissíveis estabelecidos pela metodologia. Caso contrário, pode modificar parâmetros de entrada para fins de ajuste, antes de submetê-la ao processo final de dimensionamento.

Entretanto, em consulta direta ao Engº. Dr. Filipe Franco, que desenvolveu o programa MeDiNa desde a primeira versão, foi esclarecido que a distinção entre a função ‘Avaliar’ e ‘Dimensionar’ tange ao fato de que a primeira considera a aplicação apenas das leis de comportamento dos materiais e suas respectivas respostas, enquanto a segunda aplica o ajuste do fator de deslocamento (fS) previsto na função sigmoide desenvolvida para a função de transferência do programa (DNIT, 2023a), buscando segundo o especialista consultado, estabelecer a melhor relação econômica frente aos critérios admissíveis do método.

Em todo o caso, houve a garantia do referido especialista de que não há qualquer problema em considerar como finalmente dimensionadas em projeto, as estruturas que sejam aprovadas apenas no processo ‘Avaliar’, ou seja, sem a necessidade de usar a função ‘Dimensionar’, ficando a cargo do projetista ponderar cada caso e justificar a solução finalmente adotada. Pelas razões explanadas, foram efetuadas as simulações numéricas considerando ambos os cenários para as mesmas variações de estruturas de pavimento, em que os desdobramentos quanto aos resultados obtidos, serão discutidos no tópico 5.

Além disso, algumas hipóteses foram simuladas para os casos indicados nas Tabelas 3.2 e 3.3, em que todas as descritas a seguir se aplicam na íntegra aos casos 1 e 4 (Tabela 3.2) e aos casos 1, 4, 7 e 10 (Tabela 3.3), enquanto para as demais as simulações variaram de forma aleatória entre as opções apresentadas.

- Hipótese 1: considerando a estrutura de partida (Figura 2.20, Figura 2.21 e Figura 2.22) e variações de espessura apenas para a camada de sub-base EME 2;
- Hipótese 2: considerando a estrutura de partida (Figura 2.20, Figura 2.21 e Figura 2.22) e variações de espessura apenas para a camada de base GB 4;
- Hipótese 3: considerando a estrutura de partida (Figura 2.20, Figura 2.21 e Figura 2.22) e variações iguais de espessura em ambas as camadas de base GB 4 e de sub-base EME 2; e
- Hipótese 4: considerando a estrutura de partida (Figura 2.20, Figura 2.21 e Figura 2.22) e variações de espessura em ambas as camadas de base GB 4 e de sub-base EME 2.

A partir dos casos e hipóteses devidamente definidos, e aplicando os dados de entrada já informados ao longo dos tópicos anteriores na Equação 4.8 do RP – 032, foram calculadas as deformações admissíveis [$\varepsilon(NE, \theta eq, f)$] das misturas asfálticas GB e EME para fins de comparativo aos resultados das simulações numéricas realizadas no contexto da metodologia francesa (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 – Deformações admissíveis das misturas asfálticas GB e EME no contexto da metodologia francesa

Tipo de Simulação	Caso	Deformações Admissíveis	
		[$\varepsilon(NE, \theta eq, f)$] (μdef)	$\varepsilon_{z,\,ad}$ (μdef)
Elástica linear e carregamento estacionário	1	49,25	163,28
	2	50,93	
	3	49,25	
	4	76,90	
	5	70,52	
	6	76,90	
Viscoelástica linear e carregamento dinâmico	7	49,25	
	8	50,93	
	9	49,25	
	10	76,90	
	11	70,52	
	12	76,90	

[a] Considerando variações na estrutura de partida (Figura 2.20) e PF igual em todos os casos.

Fonte: LDTPav, 2025a

Por fim, considerando a estrutura de partida da Figura 2.21 e suas respectivas variações, a serem apresentadas no tópico 4, tem-se que com o uso da ferramenta computacional *Alizé* (IFSTTAR, 2016) foram também verificados os impactos de não se prever aderência nas interfaces de contato entre o topo do solo do subleito e a camada de reforço em GNT/BGS, e entre esta última e a camada asfáltica mais profunda da estrutura de pavimento dimensionada. Desta forma, tornou-se possível verificar o grau de perda da vida útil, devido a este critério adotado pela metodologia MeDiNa (DNIT, 2023a) nas simulações numéricas de dimensionamento.

A ferramenta *Alizé* (IFSTTAR, 2016) foi escolhida para o procedimento destas avaliações, em razão de dispor de um comando capaz de ativar a função inversa da Equação 4.4 do RP – 032, colocando o número N como variável a ser calculada, algo não disponível nas demais utilizadas nesta pesquisa (MeDiNa 1.1.9.0, DNIT 2023b, e; *Viscoroute* 2.0, Chabot *et al.*, 2010).

Além disso, o *Alizé* é a ferramenta oficialmente homologada pela metodologia francesa em sua forma tradicional, garantindo não apenas credibilidade aos resultados obtidos, mas um procedimento adicional de verificação das análises realizadas. E, por esta razão, foi utilizada para a conferência de todos os resultados obtidos nas simulações elásticas lineares estacionárias realizadas com o uso da ferramenta *Viscoroute* 2.0, em colaboração cientifica direta com a equipe da *Université Gustave Eiffel* (UGE), tendo sido observada plena conformidade dos valores determinados por ambas.

A escolha da ferramenta *Viscoroute* 2.0 para a execução das rotinas numéricas deu-se em razão de se tratar de uma versão mais estável e já validada ao longo de anos de trabalhos e verificações entre campo e laboratório. A versão 3.1, embora seja a evolução mais avançada da ferramenta computacional, ainda se encontra em fase de aperfeiçoamento e, até o momento, está validada de forma conclusiva apenas para as condições de aderência entre as camadas asfálticas. Além disso, o *Viscoroute* 2.0 é gratuito e permite replicar as rotinas numéricas apresentadas neste Produto, ao contrário do *Alizé*, que exige a compra de licença para uso, o que impede o caráter irrestrito. Por esse motivo, a versão 3.1 não foi utilizada nesta pesquisa.

Além disso, a ferramenta MeDiNa 1.1.9.0 (DNIT, 2023b) não dispõe de função que permita ao usuário habilitar ou desabilitar as condições de aderência entre as camadas estabelecidas na programação de sua plataforma.

Todavia, em razão da ferramenta *Alizé* (IFSTTAR, 2016) permitir apenas análises elásticas lineares, com aplicação de carregamento estacionário, tem-se que somente esta modalidade de simulação numérica foi avaliada quanto às condições distintas de aderência entre as camadas mencionadas anteriormente.

Logo, não foram procedidas avaliações deste tipo para as estruturas de pavimento dimensionadas no contexto viscoelástico linear sob carregamento dinâmico, e tampouco para as soluções ‘Avaliadas’ ou ‘Dimensionadas’, pelas metodologias francesa e MeDiNa, respectivamente, devido aos dados experimentais não serem compatíveis com os comandos de entrada previstos na ferramenta computacional *Alizé*.

4 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Com base nos cenários apresentados no tópico 3, é importante ressaltar que a partir das estruturas de partida (Figura 2.20, Figura 2.21 e Figura 2.22), foram simuladas distintas variações de espessuras das camadas de misturas asfálticas GB e EME, a fim de que se pudesse chegar às melhores soluções para cada caso e hipótese considerados.

Para que melhor houvesse a identificação de cada solução finalmente encontrada, foi estabelecido um código de cores (Quadro 4.1), permitindo ao leitor verificar de forma instantânea a correspondência entre a estrutura de pavimento simulada e o respectivo contexto de aprovação.

Quadro 4.1 – Legendas padrão de avaliação das soluções simuladas numericamente

Legenda	Tipo de Solução
Metodologia MeDiNa	
	Solução ‘Avaliada’ ou ‘Dimensionada’ sem emissão de alertas pelo programa MeDiNa, com afundamento global da estrutura abaixo de 10,0 mm, mas que indica observação de afundamento na trilha de roda do subleito acima de 5,0 mm na aba ‘Resultados’.
	Solução ‘Avaliada’ ou ‘Dimensionada’ sem emissão de alertas pelo programa MeDiNa e, aprovada em todos os critérios estabelecidos pelo Manual de Ajuda.
Metodologia Francesa	
	Solução aprovada em relação aos valores admissíveis estabelecidos na Tabela 3.4.

Fonte: Clara (2026) e LDTPav (2025)

4.1 METODOLOGIA MEDINA

A seguir são apresentadas as estruturas ‘Avaliadas’ e ‘Dimensionadas’ pela metodologia MeDiNa (DNIT, 2023a; Tabela 4.1 a Tabela 4.9), compreendendo os casos informados na Tabela 3.2. Ainda, como a estrutura de partida (Figura 2.20) considera sempre a mesma PF para todas as variações simuladas, as soluções indicadas em forma de tabelas, apontam somente as variações de espessuras das camadas asfálticas consideradas em cada situação.

Para cada simulação realizada foram avaliados os parâmetros de percentual de trincamento (%), afundamento na trilha de roda global da estrutura de pavimento (ATR Global), bem como o afundamento na trilha de roda apenas no topo do subleito (ATR Subleito).

Tabela 4.1 – Estruturas de pavimento ‘Avaliadas’: caso 1, hipótese 1

Camada	Espessuras (cm)			
GB4	8,0	8,0	8,0	8,0
EME2	9,0	10,0	11,0	11,5
Parâmetros Avaliados				
Trincamento (%)	67,8	35,7	19,9	15,7
ATR Global (mm)	10,2	8,2	6,6	5,9
ATR Subleito (mm)	8,9	6,94	5,44	4,83

Fonte: LDTPav (2025)

Tabela 4.2 – Estruturas de pavimento 'Avaliadas': caso 1, hipótese 2

Camada	Espessuras (cm)			
GB4	8,0	9,0	10,0	10,5
EME2	9,0	9,0	9,0	9,0
Parâmetros Avaliados				
Trincamento (%)	67,8	34,6	19,0	14,9
ATR Global (mm)	10,2	8,1	6,5	5,9
ATR Subleito (mm)	8,9	6,90	5,38	4,76

Fonte: LDTPav (2025)

Tabela 4.3 – Estruturas de pavimento 'Avaliadas': caso 1, hipótese 3

Camada	Espessuras (cm)		
GB4	8,0	9,5	10,0
EME2	9,0	9,5	10,0
Parâmetros Avaliados			
Trincamento (%)	67,8	19,3	12,3
ATR Global (mm)	10,2	6,6	5,3
ATR Subleito (mm)	8,9	5,40	4,24

Fonte: LDTPav (2025)

Tabela 4.4 – Estruturas de pavimento 'Avaliadas': caso 1, hipótese 4

Camada	Espessuras (cm)				
GB4	8,0	8,0	8,5	9,5	10,0
EME2	9,0	9,5	9,0	10,0	9,5
Parâmetros Avaliados					
Trincamento (%)	67,8	49,3	48,6	15,2	15,1
ATR Global (mm)	10,2	9,1	9,1	5,9	5,9
ATR Subleito (mm)	8,9	7,85	7,83	4,79	4,78

Fonte: LDTPav (2025)

Tabela 4.5 – Estruturas de pavimento 'Avaliadas': caso 2, hipótese variável

Camada	Espessuras (cm)					
GB4	8,0	15,0*	8,0	8,0	9,0	8,0
GB4	x	x	8,0	9,0	9,0	10,5
Parâmetros Avaliados						
Trincamento (%)	99,0	99,0	99,0	99,0	70,5	50,5
ATR Global (mm)	89,6	14,0	10,9	8,6	6,8	6,1
ATR Subleito (mm)	86,75	12,47	9,53	7,32	5,65	4,98
Camada	Espessuras (cm)					
GB4	9,0	10,0	-	-	-	-
GB4	10,0	10,0	-	-	-	-
Parâmetros Avaliados						
Trincamento (%)	35,8	19,5	-	-	-	-
ATR Global (mm)	5,5	4,4	-	-	-	-
ATR Subleito (mm)	4,39	3,42	-	-	-	-

Apesar das misturas asfálticas Grave-Bitume (GB) poderem ser aplicadas em camadas de até 16,0 cm, a ferramenta computacional MeDiNa 1.1.9.0 não permite que sejam previstas espessuras de camadas asfálticas acima de 15,0 cm.

Fonte: LDTPav (2025)

Tabela 4.6 – Estruturas de pavimento 'Avaliadas': caso 3, hipótese variável

Camada	Espessuras (cm)						
EME2	9,0	15,0	9,0	9,0	10,0	9,0	9,5
EME2	x	x	9,0	10,0	10,0	11,0	11,0
Parâmetros Avaliados							
Trincamento (%)	99,0	99,0	49,2	26,4	15,9	15,9	12,9
ATR Global (mm)	83,0	19,0	9,6	7,7	6,3	6,3	5,7
ATR Subleito (mm)	80,29	17,34	8,25	6,50	5,13	5,13	4,58

Fonte: LDTPav (2025)

Tabela 4.7 – Estruturas de pavimento 'Dimensionadas': caso 4, variável

Camada	Espessuras (cm)		
GB4	8,0	8,0	9,3
EME2	9,0	10,3	9,0
Parâmetros Avaliados			
Trincamento (%)	67,8	29,6	28,5
ATR Global (mm)	10,2	7,7	7,6
ATR Subleito (mm)	8,9	6,45	6,41

Fonte: LDTPav (2025)

Tabela 4.8 – Estruturas de pavimento 'Dimensionadas': caso 5, hipótese variável

Camada	Espessuras (cm)			
GB4	8,0	15,0[a]	8,0	8,0
GB4	x	x	8,0	11,3
Parâmetros Avaliados				
Trincamento (%)	99,0	99,0	99,0	29,4
ATR Global (mm)	89,6	14,0	10,9	5,1
ATR Subleito (mm)	86,75	12,47	9,53	4,07

[a]Apesar das misturas asfálticas Grave-Bitume (GB) poderem ser aplicadas em camadas de até 16,0 cm, a ferramenta computacional MeDiNa 1.1.9.0 não permite que sejam previstas espessuras de camadas asfálticas acima de 15,0 cm.

Fonte: LDTPav (2025)

Tabela 4.9 – Estruturas de pavimento 'Dimensionadas': caso 6, hipótese variável

Camada	Espessuras (cm)			
EME2	9,0	15,0	9,0	9,0
EME2	x	x	9,0	9,8
Parâmetros Avaliados				
Trincamento (%)	99,0	99,0	49,2	29,7
ATR Global (mm)	83,0	19,0	9,6	8,1
ATR Subleito (mm)	80,29	17,34	8,25	6,81

Fonte: LDTPav (2025)

4.2 METODOLOGIA FRANCESA

As estruturas de pavimento dimensionadas pela metodologia francesa, abordam os casos apresentados na Tabela 3.3. Ainda, como as estruturas de partida (Figura 2.21 e Figura 2.22) consideram sempre a mesma PF para todas as variações simuladas, as soluções apresentadas em forma de tabelas, também indicam somente as variações de espessuras das camadas asfálticas consideradas em cada situação, seguindo o modelo do tópico 4.1.

Contudo, os parâmetros avaliados diferem da metodologia MeDiNa (DNIT, 2023a), e compreendem as deformações de tração (εt) na base da camada asfáltica mais profunda

da estrutura em análise, bem como a deformação de compressão (εz) no topo da PF, tendo sido comparados aos valores admissíveis apresentados na Tabela 3.4, para cada caso específico.

Tabela 4.10 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 1, hipótese 1 – ESRD 8,2 t

Camada	Espessuras (cm)		
GB4	8,0	8,0	8,0
EME2	9,0	12,0	13,0
Parâmetros Avaliados			
ε_t na base EME2 (μdef)	61,05	49,76	46,65
ε_z no topo da PF3 (μdef)	135,30	108,15	100,85
ε_t na base EME2 (Alizé): sem aderência (μdef)	-	-	53,6
N função inversa (Alizé): sem aderência	-	-	$1,43 \times 10^8$
Perda de vida útil	Rompe no 6º ano		

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.11 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 1, hipótese 1 – ESRD 10,0 t

Camada	Espessuras (cm)		
GB4	8,0	8,0	8,5
EME2	9,0	15,0	15,0
Parâmetros Avaliados			
ε_t na base EME2 (μdef)	74,46	50,26	48,39
ε_z no topo da PF3 (μdef)	165,00	107,62	104,52
ε_t na base EME2 (Alizé): sem aderência (μdef)	-	-	55,30
N função inversa (Alizé): sem aderência	-	-	$1,15 \times 10^8$
Perda de vida útil	Rompe no 5º ano		

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.12 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 1, hipótese 2 – ESRD 8,2 t

Camada	Espessuras (cm)		
GB4	8,0	11,0	11,5
EME2	9,0	9,0	9,0
Parâmetros Avaliados			
ε_t na base EME2 (μdef)	61,05	50,44	48,50
ε_z no topo da PF3 (μdef)	135,30	108,84	105,35
ε_t na base EME2 (Alizé): sem aderência (μdef)	-	-	55,9
N função inversa (Alizé): sem aderência	-	-	$1,07 \times 10^8$
Perda de vida útil	Rompe no 5º ano		

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.13 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 1, hipótese 2 – ESRD 10,0 t

Camada	Espessuras (cm)		
GB4	8,0	14,0	14,5
EME2	9,0	9,0	9,0
Parâmetros Avaliados			
ε_t na base EME2 (μdef)	74,46	50,88	49,09
ε_z no topo da PF3 (μdef)	165,00	109,17	106,03
ε_t na base EME2 (Alizé): sem aderência (μdef)	-	-	56,10
N função inversa (Alizé): sem aderência	-	-	$1,04 \times 10^8$
Perda de vida útil	Rompe no 5º ano		

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.14 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 1, hipótese 3 – ESRD 8,2 t

Camada	Espessuras (cm)		
GB4	8,0	10,0	11,0
EME2	9,0	10,0	11,0
Parâmetros Avaliados			
ε_t na base EME2 (μdef)	61,05	49,94	44,06
ε_z no topo da PF3 (μdef)	135,30	108,61	94,89
ε_t na base EME2 (Alizé): sem aderência (μdef)	-	-	50,3
N função inversa (Alizé): sem aderência	-	-	$2{,}20 \times 10^6$
Perda de vida útil	Rompe no 9º ano		

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.15 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 1, hipótese 3 – ESRD 10,0 t

Camada	Espessuras (cm)			
GB4	8,0	10,0	11,0	12,0
EME2	9,0	10,0	11,0	12,0
Parâmetros Avaliados				
ε_t na base EME2 (μdef)	74,46	60,90	53,73	47,28
ε_z no topo da PF3 (μdef)	165,00	132,45	115,72	101,94
ε_t na base EME2 (Alizé): sem aderência (μdef)	-	-	-	53,9
N função inversa (Alizé): sem aderência	-	-	-	$1{,}37 \times 10^8$
Perda de vida útil	Rompe no 6º ano			

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.16 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 1, hipótese 4 – ESRD 8,2 t

Camada	Espessuras (cm)	
GB4	8,0	10,5
EME2	9,0	10,0
Parâmetros Avaliados		
ε_t na base EME2 (μdef)	61,05	48,39
ε_z no topo da PF3 (μdef)	135,30	105,12
ε_t na base EME2 (Alizé): sem aderência (μdef)	-	55,7
N função inversa (Alizé): sem aderência	-	$1{,}09 \times 10^8$
Perda de vida útil	Rompe no 5º ano	

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.17 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 1, hipótese 4 – 10,0 t

Camada	Espessuras (cm)		
GB4	8,0	12,0	12,0
EME2	9,0	11,0	11,5
Parâmetros Avaliados			
ε_t na base EME2 (μdef)	74,46	50,64	48,72
ε_z no topo da PF3 (μdef)	165,00	108,63	105,37
ε_t na base EME2 (Alizé): sem aderência (μdef)	-	-	55,7
N função inversa (Alizé): sem aderência	-	-	$1{,}09 \times 10^8$
Perda de vida útil	Rompe no 5º ano		

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.18 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 2, hipótese variável – ESRD 8,2 t

Camada	Espessuras (cm)			
GB4	8,0	16,0	8,0	8,0
GB4	x	x	14,0	15,0
Parâmetros Avaliados				
ε_t na base GB4 (μdef)	201,87	73,97	49,86	46,98
ε_z no topo da PF3 (μdef)	406,10	158,88	104,01	97,66
ε_t na base GB4 (Alizé): sem aderência (μdef)	-	-	-	54,3
N função inversa (Alizé): sem aderência	-	-	-	$1,59 \times 10^8$
Perda de vida útil	Rompe no 7º ano			

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.19 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 2, hipótese variável – ESRD 10,0 t

Camada	Espessuras (cm)				
GB4	16,0	8,0	8,0	8,5	9,0
GB4	x	8,0	16,0	16,0	16,0
Parâmetros Avaliados					
ε_t na base GB4 (μdef)	90,21	90,21	53,78	52,05	50,59
ε_z no topo da PF3 (μdef)	193,75	193,75	112,02	108,90	105,54
ε_t na base GB4 (Alizé): sem aderência (μdef)	-	-	-	-	58,4
N função inversa (Alizé): sem aderência	-	-	-	-	$0,93 \times 10^8$
Perda de vida útil	Rompe no 5º ano				

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.20 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 3, hipótese variável – ESRD 8,2 t

Camada	Espessuras (cm)			
EME2	15,0	9,0	9,0	9,0
EME2	x	9,0	10,0	11,0
Parâmetros Avaliados				
ε_t na base EME2 (μdef)	67,09	54,96	51,31	48,01
ε_z no topo da PF3 (μdef)	144,56	119,10	110,53	102,84
ε_t na base EME2 (Alizé): sem aderência (μdef)	-	-	-	53,6
N função inversa (Alizé): sem aderência	-	-	-	$1,42 \times 10^8$
Perda de vida útil	Rompe no 6º ano			

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.21 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 3, hipótese variável – ESRD 10,0 t

Camada	Espessuras (cm)			
EME2	15,0	9,0	9,0	9,0
EME2	x	13,0	13,5	14,0
Parâmetros Avaliados				
ε_t na base EME2 (μdef)	83,47	51,53	49,97	48,04
ε_z no topo da PF3 (μdef)	185,07	109,35	105,98	102,44
ε_t na base EME2 (Alizé): sem aderência (μdef)	-	-	-	54,8
N função inversa (Alizé): sem aderência	-	-	-	$1,22 \times 10^8$
Perda de vida útil	Rompe no 6º ano			

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.22 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 4, hipótese 1 – ESRD 8,2 t

Camada	**Espessuras (cm)**			
GB4	8,0	8,0	8,0	8,0
EME2	9,0	13,0	14,0	15,0
Parâmetros Avaliados				
ε_t na base EME2 (μdef)	103,47	81,64	77,17	73,03
ε_z no topo da PF3 (μdef)	207,07	162,55	153,52	145,17
ε_t na base EME2 (Alizé): sem aderência (μdef)	-	-	-	89,4
N função inversa (Alizé): sem aderência	-	-	-	$0,9 \times 10^8$
Perda de vida útil	Rompe no 5º ano			

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.23 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 4, hipótese 1 – ESRD 10,0 t

Camada	**Espessuras (cm)**			
GB4	8,0	8,0	10,5	11,0
EME2	9,0	15,0	15,0	15,0
Parâmetros Avaliados				
ε_t na base EME2 (μdef)	126,19	89,06	77,95	75,96
ε_z no topo da PF3 (μdef)	252,53	177,04	155,03	150,70
ε_t na base EME2 (Alizé): sem aderência (μdef)	-	-	-	93,7
N função inversa (Alizé): sem aderência	-	-	-	$0,66 \times 10^8$
Perda de vida útil	Rompe no 5º ano			

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.24 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 4, hipótese 2 – ESRD 8,2 t

Camada	**Espessuras (cm)**				
GB4	8,0	11,0	12,0	13,0	14,0
EME2	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0
Parâmetros Avaliados					
ε_t na base EME2 (μdef)	103,47	77,14	73,00	77,14	73,00
ε_z no topo da PF3 (μdef)	207,07	153,46	145,10	153,46	145,10
ε_t na base EME2 (Alizé): sem aderência (μdef)	-	-	-	-	89,4
N função inversa (Alizé): sem aderência	-	-	-	-	$0,9 \times 10^8$
Perda de vida útil	Rompe no 5º ano				

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.25 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 4, hipótese 2 – ESRD 10,0 t

Camada	**Espessuras (cm)**				
GB4	8,0	14,0	16,0	16,0	16,0
EME2	9,0	9,0	9,0	9,5	10,0
Parâmetros Avaliados					
ε_t na base EME2 (μdef)	126,19	89,02	79,96	77,91	75,92
ε_z no topo da PF3 (μdef)	252,53	176,95	158,75	154,95	150,64
ε_t na base EME2 (Alizé): sem aderência (μdef)	-	-	-	-	93,6
N função inversa (Alizé): sem aderência	-	-	-	-	$0,66 \times 10^8$
Perda de vida útil	Rompe no 5º ano				

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.26 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 4, hipótese 3 – ESRD 8,2 t

Camada	Espessuras (cm)			
GB4	8,0	10,0	11,0	12,0
EME2	9,0	10,0	11,0	12,0
Parâmetros Avaliados				
ε_t na base EME2 (μdef)	103,47	86,46	77,15	69,17
ε_z no topo da PF3 (μdef)	207,07	172,31	153,49	137,39
ε_t na base EME2 (Alizé): sem aderência (μdef)	-	-	-	84,1
N função inversa (Alizé): sem aderência	-	-	-	$1,37 \times 10^8$
Perda de vida útil	Rompe no 6º ano			

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.27 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 4, hipótese 3 – ESRD 10,0 t

Camada	Espessuras (cm)			
GB4	8,0	12,0	13,0	13,0
EME2	9,0	12,0	12,5	13,0
Parâmetros Avaliados				
ε_t na base EME2 (μdef)	126,19	84,35	77,93	75,94
ε_z no topo da PF3 (μdef)	252,53	167,55	155,00	150,68
ε_t na base EME2 (Alizé): sem aderência (μdef)	-	-	-	93,6
N função inversa (Alizé): sem aderência	-	-	-	$0,66 \times 10^8$
Perda de vida útil	Rompe no 5º ano			

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.28 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 4, hipótese 4 – ESRD 8,2 t

Camada	Espessuras (cm)		
GB4	8,0	10,5	11,0
EME2	9,0	10,5	11,5
Parâmetros Avaliados			
ε_t na base EME2 (μdef)	103,47	81,63	75,05
ε_z no topo da PF3 (μdef)	207,07	162,52	149,53
ε_t na base EME2 (Alizé): sem aderência (μdef)	-	-	92,2
N função inversa (Alizé): sem aderência	-	-	$0,70 \times 10^8$
Perda de vida útil	Rompe no 5º ano		

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.29 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 4, hipótese 4 – ESRD 10,0 t

Camada	Espessuras (cm)		
GB4	8,0	12,5	14,0
EME2	9,0	13,0	12,0
Parâmetros Avaliados			
ε_t na base EME2 (μdef)	126,19	77,93	75,93
ε_z no topo da PF3 (μdef)	252,53	155,00	150,67
ε_t na base EME2 (Alizé): sem aderência (μdef)	-	-	93,6
N função inversa (Alizé): sem aderência	-	-	$0,66 \times 10^8$
Perda de vida útil	Rompe no 5º ano		

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.30 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 5, hipótese variável – ESRD 8,2 t

Camada	Espessuras (cm)				
GB4 0/20	16,0	8,0	8,0	8,0	8,5
GB4 0/20	x	8,0	13,0	15,0	15,5
Parâmetros Avaliados					
ε_t na base GB4 (μdef)	109,68	109,70	81,31	72,74	68,90
ε_z no topo da PF3 (μdef)	220,23	220,23	162,06	144,71	136,98
ε_t na base GB4 (Alizé): sem aderência (μdef)	-	-	-	-	83,7
N função inversa (Alizé): sem aderência	-	-	-	-	$0{,}73 \times 10^8$
Perda de vida útil	Rompe no 5º ano				

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.31 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 5, hipótese variável – ESRD 10,0 t

Camada	Espessuras (cm)				
GB4 0/20	16,0	8,0	10,0	11,0	11,5
GB4 0/20	x	8,0	16,0	16,0	16,0
Parâmetros Avaliados					
ε_t na base GB4 (μdef)	107,14	133,78	75,64	71,90	69,58
ε_z no topo da PF3 (μdef)	236,72	268,58	150,22	142,68	139,41
ε_t na base GB4 (Alizé): sem aderência (μdef)	-	-	-	-	85,7
N função inversa (Alizé): sem aderência	-	-	-	-	$0{,}61 \times 10^8$
Perda de vida útil	Rompe no 5º ano				

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.32 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 6, hipótese variável – ESRD 8,2 t

Camada	Espessuras (cm)			
EME2	15,0	9,0	9,0	9,0
EME2	x	12,0	13,0	13,5
Parâmetros Avaliados				
ε_t na base EME2 (μdef)	117,36	81,72	77,25	75,14
ε_z no topo da PF3 (μdef)	235,23	162,78	153,74	149,78
ε_t na base EME2 (Alizé): sem aderência(μdef)	-	-	-	92,3
N função inversa (Alizé): sem aderência	-	-	-	$0{,}73 \times 10^8$
Perda de vida útil	Rompe no 5º ano			

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.33 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 6, hipótese variável – ESRD 10,0 t

Camada	Espessuras (cm)			
EME2	15,0	9,0	10,5	11,0
EME2	x	15,0	15,0	15,0
Parâmetros Avaliados				
ε_t na base EME2 (μdef)	143,12	84,46	78,04	76,05
ε_z no topo da PF3 (μdef)	286,86	167,84	155,28	150,95
ε_t na base EME2 (Alizé): sem aderência (μdef)	-	-	-	93,8
N função inversa (Alizé): sem aderência	-	-	-	$0{,}65 \times 10^8$
Perda de vida útil	Rompe no 5º ano			

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.34 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 7, hipótese 1 – ESRD 8,2 t

Camada	Espessuras (cm)				
GB4	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
EME2	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0
Parâmetros Avaliados					
ε_t na base EME2 (μdef)	62,28	58,23	54,56	51,22	48,16
ε_z no topo da PF3 (μdef)	141,14	131,29	122,44	114,45	107,21

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.35 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 7, hipótese 1 – ESRD 10,0 t

Camada	Espessuras (cm)				
GB4	8,0	8,0	8,0	8,0	9,0
EME2	9,0	14,0	14,5	15,0	15,0
Parâmetros Avaliados					
ε_t na base EME2 (μdef)	75,94	55,33	53,26	51,73	48,88
ε_z no topo da PF3 (μdef)	172,12	122,75	119,20	115,46	108,86

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.36 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 7, hipótese 2 – ESRD 8,2 t

Camada	Espessuras (cm)				
GB4	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0
EME2	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0
Parâmetros Avaliados					
ε_t na base EME2 (μdef)	62,28	58,27	54,63	51,25	48,29
ε_z no topo da PF3 (μdef)	141,14	131,35	122,57	114,52	107,47

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.37 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 7, hipótese 2 – ESRD 10,0 t

Camada	Espessuras (cm)				
GB4	8,0	9,0	14,0	14,5	15,0
EME2	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0
Parâmetros Avaliados					
ε_t na base EME2 (μdef)	75,94	71,06	51,94	50,48	49,08
ε_z no topo da PF3 (μdef)	172,12	160,19	115,89	112,68	109,28

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.38 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 7, hipótese 3 – ESRD 8,2 t

Camada	Espessuras (cm)			
GB4	8,0	9,0	10,0	11,0
EME2	9,0	9,0	10,0	11,0
Parâmetros Avaliados				
ε_t na base EME2 (μdef)	62,28	58,27	51,28	45,45
ε_z no topo da PF3 (μdef)	141,14	131,35	114,58	100,83

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.39 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 7, hipótese 3 – ESRD 10,0 t

Camada	Espessuras (cm)			
GB4	8,0	10,0	11,0	12,0
EME2	9,0	10,0	11,0	12,0
Parâmetros Avaliados				
ε_t na base EME2 (μdef)	75,94	62,53	55,43	48,97
ε_z no topo da PF3 (μdef)	172,12	139,73	122,96	109,06

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.40 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 7, hipótese 4 – ESRD 8,2 t

Camada	Espessuras (cm)			
GB4	8,0	8,0	8,5	9,0
EME2	9,0	12,5	12,0	12,0
Parâmetros Avaliados				
ε_t na base EME2 (μdef)	62,28	49,66	49,67	48,19
ε_z no topo da PF3 (μdef)	141,14	110,88	110,92	107,28

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.41 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 7, hipótese 4 – ESRD 10,0 t

Camada	Espessuras (cm)			
GB4	8,0	11,5	12,0	12,5
EME2	9,0	12,0	11,5	12,0
Parâmetros Avaliados				
ε_t na base EME2 (μdef)	75,94	50,37	50,38	47,63
ε_z no topo da PF3 (μdef)	172,12	112,46	112,49	106,13

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.42 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 8, hipótese variável – ESRD 8,2 t

Camada	Espessuras (cm)		
GB4	16,0	8,0	8,0
GB4	x	12,5	13,0
Parâmetros Avaliados			
ε_t na base GB4 (μdef)	68,95	51,36	49,82
ε_z no topo da PF3 (μdef)	155,32	113,58	109,83

Tabela 4.43 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 8, hipótese variável – ESRD 10,0 t

Camada	Espessuras (cm)		
GB4	16,0	8,0	8,0
GB4	x	8,0	16,0
Parâmetros Avaliados			
ε_t na base GB4 (μdef)	84,08	84,09	50,57
ε_z no topo da PF3 (μdef)	189,41	189,41	111,64

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.44 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 9, hipótese variável – ESRD 8,2 t

Camada	Espessuras (cm)			
EME2	15,0	9,0	9,0	9,0
EME2	x	9,0	11,0	12,0
Parâmetros Avaliados				
ε_t na base EME2 (μdef)	71,0	57,67	50,72	49,18
ε_z no topo da PF3 (μdef)	162,55	129,72	113,10	109,57

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.45 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 9, hipótese variável – ESRD 10,0 t

Camada	Espessuras (cm)			
EME2	15,0	9,0	9,0	9,0
EME2	X	14,0	14,5	15,0
Parâmetros Avaliados				
ε_t na base EME2 (μdef)	86,59	51,24	49,79	48,39
ε_z no topo da PF3 (μdef)	198,23	114,13	110,94	107,56

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.46 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 10, hipótese 1 – ESRD 8,2 t

Camada	Espessuras (cm)			
GB4	8,0	8,0	8,0	9,0
EME2	9,0	11,0	12,0	12,5
Parâmetros Avaliados				
ε_t na base EME2 (μdef)	93,39	83,18	78,67	76,54
ε_z no topo da PF3 (μdef)	197,57	176,07	166,59	162,40

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.47 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 10, hipótese 1 – ESRD 10,0 t

Camada	Espessuras (cm)			
GB4	8,0	8,0	9,0	9,5
EME2	9,0	15,0	15,0	15,0
Parâmetros Avaliados				
ε_t na base EME2 (μdef)	113,90	81,72	77,02	75,04
ε_z no topo da PF3 (μdef)	240,94	173,55	164,76	160,90

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.48 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 10, hipótese 2 – ESRD 8,2 t

Camada	Espessuras (cm)			
GB4	8,0	9,0	11,0	12,0
EME2	9,0	9,0	9,0	9,0
Parâmetros Avaliados				
ε_t na base EME2 (μdef)	93,39	87,89	78,12	73,78
ε_z no topo da PF3 (μdef)	197,57	186,05	165,56	156,45

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.49 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 10, hipótese 2 – ESRD 10,0 t

Camada	Espessuras (cm)			
GB4	8,0	9,0	14,5	15,0
EME2	9,0	9,0	9,0	9,0
Parâmetros Avaliados				
ε_t na base EME2 (μdef)	113,90	107,18	77,86	75,80
ε_z no topo da PF3 (μdef)	240,94	226,89	166,79	162,16

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.50 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 10, hipótese 3 – ESRD 8,2 t

Camada	Espessuras (cm)			
GB4	8,0	9,0	10,0	11,0
EME2	9,0	9,0	10,0	11,0
Parâmetros Avaliados				
ε_t na base EME2 (μdef)	93,39	87,89	78,34	70,21
ε_z no topo da PF3 (μdef)	197,57	186,05	165,97	148,86

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.51 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 10, hipótese 3 – ESRD 10,0 t

Camada	Espessuras (cm)			
GB4	8,0	10,0	11,0	12,0
EME2	9,0	10,0	11,0	12,0
Parâmetros Avaliados				
ε_t na base EME2 (μdef)	113,90	95,54	85,62	76,54
ε_z no topo da PF3 (μdef)	240,94	202,40	181,53	163,66

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.52 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 10, hipótese 4 – ESRD 8,2 t

Camada	Espessuras (cm)		
GB4	8,0	9,5	10,0
EME2	9,0	10,0	10,5
Parâmetros Avaliados			
ε_t na base EME2 (μdef)	93,39	80,63	76,23
ε_z no topo da PF3 (μdef)	197,57	171,04	161,79

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.53 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 10, hipótese 4 – ESRD 10,0 t

Camada	Espessuras (cm)		
GB4	8,0	9,5	14,5
EME2	9,0	14,5	9,5
Parâmetros Avaliados			
ε_t na base EME2 (μdef)	113,90	76,95	75,95
ε_z no topo da PF3 (μdef)	240,94	164,59	162,45

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.54 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 11, hipótese variável – ESRD 8,2 t

Camada	Espessuras (cm)			
GB4	16,0	8,0	8,0	8,0
GB4	x	8,0	11,0	11,5
Parâmetros Avaliados				
ε_t na base GB4 (μdef)	87,85	86,59	72,62	70,20
ε_z no topo da PF3 (μdef)	194,11	192,59	159,85	155,42

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.55 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 11, hipótese variável – ESRD 10,0 t

Camada	Espessuras (cm)			
GB4	16,0	8,0	8,0	8,0
GB4	x	8,0	15,0	15,5
Parâmetros Avaliados				
ε_t na base GB4 (μdef)	107,14	107,15	70,95	69,09
ε_z no topo da PF3 (μdef)	236,72	236,72	156,95	153,10

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.56 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 12, hipótese variável – ESRD 8,2 t

Camada	Espessuras (cm)			
EME2	15,0	9,0	9,0	9,0
EME2	x	11,0	11,5	12,0
Parâmetros Avaliados				
ε_t na base EME2 (μdef)	107,72	80,80	78,64	76,57
ε_z no topo da PF3 (μdef)	230,26	173,41	169,08	164,40

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.57 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 12, hipótese variável – ESRD 10,0 t

Camada	Espessuras (cm)			
EME2	15,0	9,0	9,5	10,0
EME2	X	15,0	15,0	15,0
Parâmetros Avaliados				
ε_t na base EME2 (μdef)	131,37	80,01	78,05	75,60
ε_z no topo da PF3 (μdef)	280,80	172,02	168,15	163,82

Fonte: Clara (2026)

4.3 COMPILAÇÃO DAS ESTRUTURAS APROVADAS

A partir dos resultados apresentados nos tópicos 4.1 e 4.2, um resumo das estruturas aprovadas nas simulações numéricas, em cada caso e respectiva hipótese, para ambas as metodologias estudadas, é compilado nas Tabelas, considerando a mesma legenda de cores indicada na seção introdutória do tópico 4.

4.3.1 Metodologia Medina

As Tabelas 4.58 a 4.60 apresentam a compilação dos resultados correspondentes às estruturas 'Avaliadas', enquanto a Tabela 4.61 compreende as estruturas 'Dimensionadas'.

Tabela 4.58 – Estruturas de pavimento 'Avaliadas': caso 1, hipóteses 1 a 4

Caso/Hipótese	Camadas	Espessuras Unitárias (cm)	
1/1	GB4	8,0	8,0
	EME2	11,0	11,5
1/2	GB4	10,0	10,5
	EME2	9,0	9,0
1/3	GB4	9,5	10,0
	EME2	9,5	10,0
1/4	GB4	9,5	10,0
	EME2	10,0	9,5
Caso/Hipótese	**Camadas**	**Espessuras Totais (cm)**	
1/1	GB4	19,0	19,5
	EME2		
1/2	GB4	19,0	19,5
	EME2		
1/3	GB4	19,0	20,0
	EME2		
1/4	GB4	19,5	19,5
	EME2		

Fonte: LDTPav (2025)

Tabela 4.59 – Estruturas de pavimento 'Avaliadas': caso 2, hipótese variável

Caso/Hipótese	Camadas	Espessuras Unitárias (cm)
2/Variável	GB4	10,0
	GB4	10,0
	Camadas	Espessuras Totais (cm)
	GB4	20,0
	GB4	

Fonte: LDTPav (2025)

Tabela 4.60 – Estruturas de pavimento 'Avaliadas': caso 2, hipótese variável

Caso/Hipótese	Camadas	Espessuras Unitárias (cm)			
3/Variável	EME2	9,0	10,0	9,0	9,5
	EME2	10,0	10,0	11,0	11,0
	Camadas	Espessuras Totais (cm)			
	EME2	19,0	20,0	20,0	20,5
	EME2				

Fonte: LDTPav (2025)

Tabela 4.61 – Estruturas de pavimento 'Dimensionadas': caso 4 a 6, hipótese variável

Caso/Hipótese	Camadas	Espessuras Unitárias (cm)	
4/Variável	GB4	8,0	9,3
	EME2	10,3	9,0
	Camadas	Espessuras Totais (cm)	
	GB4	18,3	18,3
	EME2		
	Camadas	Espessuras Unitárias (cm)	
5/Variável	GB4	8,0	
	GB4	11,3	
	Camadas	Espessura Total (cm)	
	GB4	19,3	
	GB4		
	Camadas	Espessuras Unitárias (cm)	
6/Variável	EME2	9,0	
	EME2	9,8	
	Camadas	Espessura Total (cm)	
	EME2	18,8	
	EME2		

Fonte: LDTPav (2025)

4.3.2 Metodologia Francesa

As Tabelas 4.62 a 4.69 apresentam a compilação dos resultados correspondentes às estruturas dimensionadas pela metodologia francesa, considerando os seguintes cenários e sequência:

- Elasticidade Linear e Carregamento Estacionário: θ_{eq} = 15 °C e 10 Hz (Tabela 4.62 e Tabela 4.63);
- Elasticidade Linear e Carregamento Estacionário: θ_{eq} = 28 °C e 10 Hz (Tabela 4.64 e Tabela 4.65);
- Viscoelasticidade Linear e Carregamento Dinâmico: θ_{eq} = 15 °C e 10 Hz (Tabela 4.66 e Tabela 4.67);
- Viscoelasticidade Linear e Carregamento Dinâmico: θ_{eq} = 28 °C e 10 Hz (Tabela 4.68 e Tabela 4.69).

Tabela 4.62 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 1, hipóteses 1 a 4; casos 2 e 3, hipótese variável – ESRD 8,2 t,

Caso/Hipótese	Camadas	Espessuras Unitárias (cm)	Espessuras Totais (cm)
1/1	GB4	8,0	21,0
	EME2	13,0	
1/2	GB4	11,5	20,5
	EME2	9,0	
1/3	GB4	11,0	22,0
	EME2	11,0	
1/4	GB4	10,5	20,5
	EME2	10,0	
2/Variável	GB4	8,0	23,0
	GB4	15,0	
3/Variável	EME2	9,0	20,0
	EME2	11,0	

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.63 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 1, hipóteses 1 a 4; casos 2 e 3, hipótese variável – ESRD 10,0 t

Caso/Hipótese	Camadas	Espessuras Unitárias (cm)	Espessuras Totais (cm)
1/1	GB4	8,5	23,5
	EME2	15,0	
1/2	GB4	14,5	23,5
	EME2	9,0	
1/3	GB4	12,0	24,0
	EME2	12,0	
1/4	GB4	12,0	23,5
	EME2	11,5	
2/Variável	GB4	9,0	25,0
	GB4	16,0	
3/Variável	EME2	9,0	23,0
	EME2	14,0	

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.64 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 4, hipóteses 1 a 4; casos 5 e 6, hipótese variável – ESRD 8,2 t

Caso/Hipótese	Camadas	Espessuras Unitárias (cm)	Espessuras Totais (cm)
4/1	GB4	8,0	23,0
	EME2	15,0	
4/2	GB4	14,0	23,0
	EME2	9,0	
4/3	GB4	12,0	24,0
	EME2	12,0	
4/4	GB4	11,0	22,5
	EME2	11,5	
5/Variável	GB4	8,0	22,0
	GB4	14,0	
6/Variável	EME2	9,0	22,5
	EME2	13,5	

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.65 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 4, hipóteses 1 a 4; casos 5 e 6, hipótese variável – ESRD 10,0 t

Caso/Hipótese	Camadas	Espessuras Unitárias (cm)	Espessuras Totais (cm)
4/1	GB4	11,0	26,0
	EME2	15,0	
4/2	GB4	16,0	26,0
	EME2	10,0	
4/3	GB4	13,0	26,0
	EME2	13,0	
4/4	GB4	14,0	26,0
	EME2	12,0	
5/Variável	GB4	11,5	27,5
	GB4	16,0	
6/Variável	EME2	11,0	26,0
	EME2	15,0	

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.66 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 7, hipóteses 1 a 4; casos 8 e 9, hipótese variável – ESRD 8,2 t

Caso/Hipótese	Camadas	Espessuras Unitárias (cm)	Espessuras Totais (cm)
7/1	GB4	8,0	21,0
	EME2	13,0	
7/2	GB4	12,0	21,0
	EME2	9,0	
7/3	GB4	11,0	22,0
	EME2	11,0	
7/4	GB4	9,0	21,0
	EME2	12,0	
8/Variável	GB4	8,0	21,0
	GB4	13,0	
9/Variável	EME2	9,0	21,0
	EME2	12,0	

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.67 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 7, hipóteses 1 a 4; casos 8 e 9, hipótese variável – ESRD 10,0 t

Caso/Hipótese	Camadas	Espessuras Unitárias (cm)	Espessuras Totais (cm)
7/1	GB4	9,0	24,0
	EME2	15,0	
7/2	GB4	15,0	24,0
	EME2	9,0	
7/3	GB4	12,0	24,0
	EME2	12,0	
7/4	GB4	12,5	24,5
	EME2	12,0	
8/Variável	GB4	8,0	24,0
	GB4	16,0	
9/Variável	EME2	9,0	24,0
	EME2	15,0	

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.68 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 10, hipóteses 1 a 4; casos 11 e 12, hipótese variável – ESRD 8,2 t

Caso/Hipótese	Camadas	Espessuras Unitárias (cm)	Espessuras Totais (cm)
10/1	GB4	9,0	21,5
	EME2	12,5	
10/2	GB4	12,0	21,0
	EME2	9,0	
10/3	GB4	11,0	22,0
	EME2	11,0	
10/4	GB4	10,0	20,5
	EME2	10,5	
11/Variável	GB4	8,0	19,5
	GB4	11,5	
12/Variável	EME2	9,0	21,0
	EME2	12,0	

Fonte: Clara (2026)

Tabela 4.69 – Estruturas de pavimento dimensionadas: caso 10, hipóteses 1 a 4; casos 11 e 12, hipótese variável – ESRD 10,0 t

Caso/Hipótese	Camadas	Espessuras Unitárias (cm)	Espessuras Totais (cm)
10/1	GB4	9,5	24,5
	EME2	15,0	
10/2	GB4	15,0	24,0
	EME2	9,0	
10/3	GB4	12,0	24,0
	EME2	12,0	
10/4	GB4	14,5	24,0
	EME2	9,5	
11/Variável	GB4	8,0	23,5
	GB4	15,5	
12/Variável	EME2	10,0	25,0
	EME2	15,0	

Fonte: Clara (2026)

5 DISCUSSÕES SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS

Considerando as estruturas de pavimento aprovadas e compiladas nos tópicos 4.3.1 e 4.3.2, foi realizado um comparativo entre os casos e hipóteses simulados para as metodologias MeDiNa e francesa, a fim de se verificar o impacto da diferença entre as espessuras finalmente estabelecidas em cada situação analisada, para a mesma configuração dos conjuntos das camadas asfálticas (Tabela 5.1 a 5.16).

Tabela 5.1 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: elasticidade linear e carregamento estacionário (MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 8,2 t)

Caso/Hipótese		Diferença de Espessuras (cm) Obs.: a favor da estrutura dimensionada pela metodologia francesa				
Metodologia MeDiNa	Metodologia Francesa					
Estrutura 'Avaliada'	Estrutura Dimensionada (θeq = 15 °C e 10 Hz)	Cenário Comparativo[a]				
		F x S1 M	F x S2 M	F x S3 M	F x S4 M	F x S5 M
1/1	1/1	-	2,0	1,5	-	
1/2	1/2	-	1,5	1,0	-	
1/3	1/3	3,0	2,0	-	-	
1/4	1/4	-	-	1,0	1,0	
2/Variável	2/Variável	-	-	3,0	-	
3/Variável	3/Variável	-	1,0	0,0	0,0	- 0,5

[a]Legenda: F x Sn M (simulação metodologia francesa x simulação n metodologia MeDiNa)

Fonte: LDTPav (2025)

Tabela 5.2 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: elasticidade linear e carregamento estacionário (MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 10,0 t)

Caso/Hipótese		Diferença de Espessuras (cm) Obs.: a favor da estrutura dimensionada pela metodologia francesa				
Metodologia MeDiNa	Metodologia Francesa					
Estrutura 'Avaliada'	Estrutura Dimensionada (θeq = 15 °C e 10 Hz)	Cenário Comparativo[a]				
		F x S1 M	F x S2 M	F x S3 M	F x S4 M	F x S5 M
1/1	1/1	-	4,5	4,0	-	-
1/2	1/2	-	4,5	4,0	-	-
1/3	1/3	5,0	4,0	-	-	-
1/4	1/4	-	-	4,0	4,0	-
2/Variável	2/Variável	-	-	5,0	-	-
3/Variável	3/Variável	-	4,0	3,0	3,0	2,5

[a]Legenda: F x Sn M (simulação metodologia francesa x simulação n metodologia MeDiNa)

Fonte: LDTPav (2025)

Tabela 5.3 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: elasticidade linear e carregamento estacionário (MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 8,2 t)

Caso/Hipótese		Diferença de Espessuras (cm) Obs.: a favor da estrutura dimensionada pela metodologia francesa				
Metodologia MeDiNa	Metodologia Francesa					
Estrutura 'Avaliada'	Estrutura Dimensionada (θeq = 28 °C e 10 Hz)	Cenário Comparativo[a]				
		F x S1 M	F x S2 M	F x S3 M	F x S4 M	F x S5 M
1/1	4/1	-	4,0	3,5	-	-
1/2	4/2	-	4,0	3,5	-	-
1/3	4/3	5,0	4,0	-	-	-
1/4	4/4	-	-	3,0	3,0	-
2/Variável	5/Variável	-	-	4,0	-	-
3/Variável	6/Variável	-	3,5	2,5	2,5	2,0

[a]Legenda: F x Sn M (simulação metodologia francesa x simulação n metodologia MeDiNa)

Fonte: LDTPav (2025)

Tabela 5.4 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: elasticidade linear e carregamento estacionário (MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 10,0 t)

Caso/Hipótese		Diferença de Espessuras (cm) Obs.: a favor da estrutura dimensionada pela metodologia francesa				
Metodologia MeDiNa	Metodologia Francesa					
Estrutura 'Avaliada'	Estrutura Dimensionada (θeq = 28 °C e 10 Hz)	Cenário Comparativo[a]				
		F x S1 M	F x S2 M	F x S3 M	F x S4 M	F x S5 M
1/1	4/1	-	7,0	6,5	-	-
1/2	4/2	-	7,0	6,5	-	-
1/3	4/3	7,0	6,0	-	-	-
1/4	4/4	-	-	6,5	6,5	-
2/Variável	5/Variável	-	-	7,5	-	-
3/Variável	6/Variável	-	7,0	6,0	6,0	5,5

[a]Legenda: F x Sn M (simulação metodologia francesa x simulação n metodologia MeDiNa)

Fonte: LDTPav (2025)

Tabela 5.5 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 8,2 t (viscoelasticidade linear e carregamento dinâmico)

Caso/Hipótese		Diferença de Espessuras (cm) Obs.: a favor da estrutura dimensionada pela metodologia francesa				
Metodologia MeDiNa	Metodologia Francesa					
Estrutura 'Avaliada'	Estrutura Dimensionada (θeq = 15 °C e 10 Hz)	Cenário Comparativo[a]				
		F x S1 M	F x S2 M	F x S3 M	F x S4 M	F x S5 M
1/1	7/1	-	2,0	1,5	-	-
1/2	7/2	-	2,0	1,5	-	-
1/3	7/3	3,0	2,0	-	-	-
1/4	7/4	-	-	1,5	1,5	-
2/Variável	8/Variável	-	-	1,0	-	-
3/Variável	9/Variável	-	2,0	1,0	1,0	0,5

[a]Legenda: F x Sn M (simulação metodologia francesa x simulação n metodologia MeDiNa)

Fonte: LDTPav (2025)

Tabela 5.6 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 10,0 t (viscoelasticidade linear e carregamento dinâmico)

Caso/Hipótese		Diferença de Espessuras (cm) Obs.: a favor da estrutura dimensionada pela metodologia francesa				
Metodologia MeDiNa	Metodologia Francesa					
Estrutura 'Avaliada'	Estrutura Dimensionada (θeq = 15 °C e 10 Hz)	Cenário Comparativo[a]				
		F x S1 M	F x S2 M	F x S3 M	F x S4 M	F x S5 M
1/1	7/1	-	5,0	4,5	-	-
1/2	7/2	-	5,0	4,5	-	-
1/3	7/3	5,0	4,0	-	-	-
1/4	7/4	-	-	5,0	5,0	-
2/Variável	8/Variável	-	-	4,0	-	-
3/Variável	9/Variável	-	5,0	4,0	4,0	3,5

[a]Legenda: F x Sn M (simulação metodologia francesa x simulação n metodologia MeDiNa)

Fonte: LDTPav (2025)

Tabela 5.7 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 8,2 t (viscoelasticidade linear e carregamento dinâmico)

Caso/Hipótese		Diferença de Espessuras (cm) Obs.: a favor da estrutura dimensionada pela metodologia francesa				
Metodologia MeDiNa	Metodologia Francesa					
Estrutura 'Avaliada'	Estrutura Dimensionada (θeq = 28 °C e 10 Hz)	Cenário Comparativo[a]				
		F x S1 M	F x S2 M	F x S3 M	F x S4 M	F x S5 M
1/1	10/1	-	2,5	2,0	-	-
1/2	10/2	-	2,0	1,5	-	-
1/3	10/3	3,0	2,0	-	-	-
1/4	10/4	-	-	1,0	1,0	-
2/Variável	11/Variável	-	-	- 0,5	-	-
3/Variável	12/Variável	-	2,0	1,0	1,0	0,5

[a]Legenda: F x Sn M (simulação metodologia francesa x simulação n metodologia MeDiNa)

Fonte: LDTPav (2025)

Tabela 5.8 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 10,0 t (viscoelasticidade linear e carregamento dinâmico)

Caso/Hipótese		Diferença de Espessuras (cm) Obs.: a favor da estrutura dimensionada pela metodologia francesa				
Metodologia MeDiNa	Metodologia Francesa					
Estrutura 'Avaliada'	Estrutura Dimensionada (θeq = 28 °C e 10 Hz)	Cenário Comparativo[a]				
		F x S1 M	F x S2 M	F x S3 M	F x S4 M	F x S5 M
1/1	10/1	-	5,5	5,0	-	-
1/2	10/2	-	5,0	4,5	-	-
1/3	10/3	5,0	4,0	-	-	-
1/4	10/4	-	-	4,5	4,5	-
2/Variável	11/Variável	-	-	3,5	-	-
3/Variável	12/Variável	-	6,0	5,0	5,0	4,5

[a]Legenda: F x Sn M (simulação metodologia francesa x simulação n metodologia MeDiNa)

Fonte: LDTPav (2025)

Tabela 5.9 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: elasticidade linear e carregamento estacionário (MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 8,2 t)

Caso/Hipótese		Diferença de Espessuras (cm) Obs.: a favor da estrutura dimensionada pela metodologia francesa	
Metodologia MeDiNa	Metodologia Francesa		
Estrutura 'Dimensionada'	Estrutura Dimensionada (θeq = 15 °C e 10 Hz)	Cenário Comparativo[a]	
		F x S1 M	F x S2 M
4/Variável	1/1	2,7	2,2
	1/2	2,2	1,7
	1/3	3,7	3,2
	1/4	2,2	1,7
5/Variável	2/Variável	3,7	-
6/Variável	3/Variável	2,7	-

[a]Legenda: F x Sn M (simulação metodologia francesa x simulação n metodologia MeDiNa)

Fonte: LDTPav (2025)

Tabela 5.10 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: elasticidade linear e carregamento estacionário (MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 10,0 t)

Caso/Hipótese		Diferença de Espessuras (cm) Obs.: a favor da estrutura dimensionada pela metodologia francesa	
Metodologia MeDiNa	Metodologia Francesa		
Estrutura 'Dimensionada'	Estrutura Dimensionada (θeq = 15 °C e 10 Hz)	Cenário Comparativo[a]	
		F x S1 M	F x S2 M
4/Variável	1/1	5,2	4,7
	1/2	5,2	4,7
	1/3	5,7	5,2
	1/4	5,2	4,7
5/Variável	2/Variável	5,7	-
6/Variável	3/Variável	4,2	-

[a]Legenda: F x Sn M (simulação metodologia francesa x simulação n metodologia MeDiNa)

Fonte: LDTPav (2025)

Tabela 5.11 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: elasticidade linear e carregamento estacionário (MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 8,2 t)

Caso/Hipótese		Diferença de Espessuras (cm) Obs.: a favor da estrutura dimensionada pela metodologia francesa	
Metodologia MeDiNa	Metodologia Francesa		
Estrutura 'Dimensionada'	Estrutura Dimensionada (θeq = 28 °C e 10 Hz)	Cenário Comparativo[a]	
		F x S1 M	F x S2 M
4/Variável	4/1	4,7	4,2
	4/2	4,7	4,2
	4/3	5,7	5,2
	4/4	4,2	3,7
5/Variável	5/Variável	4,7	-
6/Variável	6/Variável	3,7	-

[a]Legenda: F x Sn M (simulação metodologia francesa x simulação n metodologia MeDiNa)

Fonte: LDTPav (2025)

Tabela 5.12 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: elasticidade linear e carregamento estacionário (MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 10,0 t)

Caso/Hipótese		Diferença de Espessuras (cm) Obs.: a favor da estrutura dimensionada pela metodologia francesa	
Metodologia MeDiNa	Metodologia Francesa		
Estrutura 'Dimensionada'	Estrutura Dimensionada (θeq = 28 °C e 10 Hz)	Cenário Comparativo[a]	
		F x S1 M	F x S2 M
4/Variável	4/1	7,7	7,2
	4/2	7,7	7,2
	4/3	7,7	7,2
	4/4	7,7	7,2
5/Variável	5/Variável	8,2	-
6/Variável	6/Variável	7,2	-

[a]Legenda: F x Sn M (simulação metodologia francesa x simulação n metodologia MeDiNa)

Fonte: LDTPav (2025)

Tabela 5.13 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 8,2 t (viscoelasticidade linear e carregamento dinâmico)

Caso/Hipótese		Diferença de Espessuras (cm) Obs.: a favor da estrutura dimensionada pela metodologia francesa	
Metodologia MeDiNa	Metodologia Francesa		
Estrutura 'Dimensionada'	Estrutura Dimensionada (θ_{eq} = 15 °C e 10 Hz)	Cenário Comparativo[a]	
		F x S1 M	F x S2 M
4/Variável	7/1	2,7	2,2
	7/2	2,7	2,2
	7/3	3,7	3,2
	7/4	2,7	2,2
5/Variável	8/Variável	1,7	-
6/Variável	9/Variável	2,2	-
[a]Legenda: F x Sn M (simulação metodologia francesa x simulação n metodologia MeDiNa)			

Fonte: LDTPav (2025)

Tabela 5.14 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 10,0 t (viscoelasticidade linear e carregamento dinâmico)

Caso/Hipótese		Diferença de Espessuras (cm) Obs.: a favor da estrutura dimensionada pela metodologia francesa	
Metodologia MeDiNa	Metodologia Francesa		
Estrutura 'Dimensionada'	Estrutura Dimensionada (θ_{eq} = 15 °C e 10 Hz)	Cenário Comparativo[a]	
		F x S1 M	F x S2 M
4/Variável	7/1	5,7	5,2
	7/2	5,7	5,2
	7/3	5,7	5,2
	7/4	6,2	5,7
5/Variável	8/Variável	4,7	-
6/Variável	9/Variável	5,2	-
[a]Legenda: F x Sn M (simulação metodologia francesa x simulação n metodologia MeDiNa)			

Fonte: LDTPav (2025)

Tabela 5.15 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 8,2 t (viscoelasticidade linear e carregamento dinâmico)

Caso/Hipótese		Diferença de Espessuras (cm) Obs.: a favor da estrutura dimensionada pela metodologia francesa	
Metodologia MeDiNa	Metodologia Francesa		
Estrutura 'Dimensionada'	Estrutura Dimensionada (θ_{eq} = 28 °C e 10 Hz)	Cenário Comparativo[a]	
		F x S1 M	F x S2 M
4/Variável	10/1	3,2	2,7
	10/2	2,7	2,2
	10/3	3,7	3,2
	10/4	2,2	1,7
5/Variável	11/Variável	0,2	-
6/Variável	12/Variável	2,2	-
[a]Legenda: F x Sn M (simulação metodologia francesa x simulação n metodologia MeDiNa)			

Fonte: LDTPav (2025)

Tabela 5.16 – Diferença de espessuras entre as estruturas de pavimento: MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 8,2 t (viscoelasticidade linear e carregamento dinâmico)

Caso/Hipótese		Diferença de Espessuras (cm) Obs.: a favor da estrutura dimensionada pela metodologia francesa	
Metodologia MeDiNa	Metodologia Francesa		
Estrutura 'Dimensionada'	Estrutura Dimensionada (θ_{eq} = 28 °C e 10 Hz)	Cenário Comparativo[a]	
		F x S1 M	F x S2 M
4/Variável	10/1	6,2	5,7
	10/2	5,7	5,2
	10/3	5,7	5,2
	10/4	5,7	5,2
5/Variável	11/Variável	4,2	-
6/Variável	12/Variável	6,2	-

[a]Legenda: F x Sn M (simulação metodologia francesa x simulação n metodologia MeDiNa)

Fonte: LDTPav (2025)

Observando os cenários comparativos simulados entre as soluções obtidas pelas metodologias MeDiNa e francesa, tem-se que a primeira apresentou invariavelmente estruturas de pavimento com espessuras de camadas asfálticas mais esbeltas, para todos os casos analisados, compreendendo diferenças que variaram, a depender do caso e hipótese considerados, de 0,5 cm a 5,7 cm (MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 8,2 t) e de 2,5 cm a 8,2 cm (MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 10,0 t), respectivamente.

Exceções ocorreram em ocasiões pontuais de confrontação na Tabela 5.1, Tabela 5.7 e Tabela 5.15, em que foram obtidas diferenças de espessuras muito próximas (abaixo de 0,5). Entretanto, trataram-se de simulações alternativas às já executadas, com hipóteses variáveis, e que exprimem mais um complemento de avaliações do que a representatividade dos resultados obtidos quanto à tendência geral observada.

Estes cenários, mas sobretudo em relação à confrontação MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 10,0 t, corroboram à tendência de estudos prévios apresentados por Franco (2020), em que comparou os resultados do dimensionamento de uma mesma estrutura de pavimento considerando diversos métodos existentes no mundo, incluindo o MeDiNa, no âmbito do projeto COST 333 (Figura 5.1).

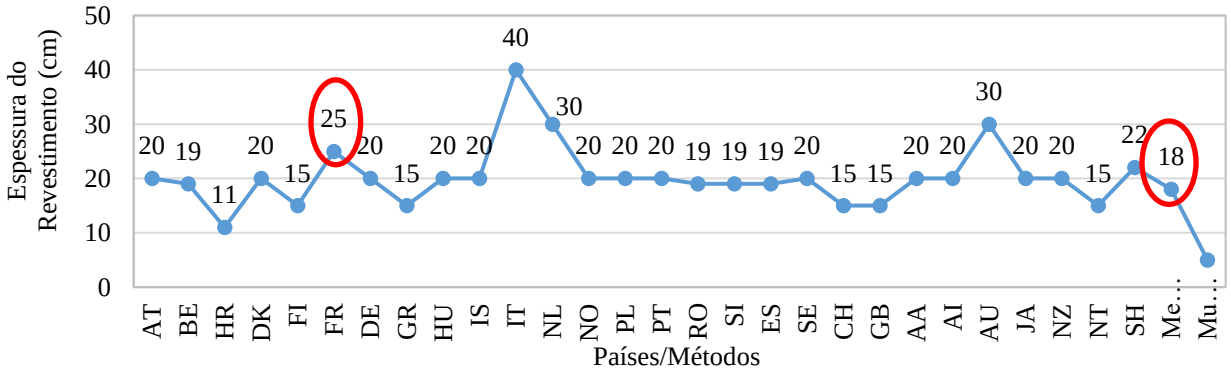


Figura 5.1 – Estrutura de pavimento dimensionada pela metodologia MeDiNa, comparada à de outros países

Fonte: Adaptado de Franco (2020)

Ao observar o gráfico da Figura 5.1, tem-se que os destaques sobre os resultados dos métodos MeDiNa e francês resultaram em uma diferença de 7,0 cm quanto à espessura do revestimento dimensionado, estando dentro do intervalo obtido nesta pesquisa para o cenário MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 10,0 t, e próximo ao limite máximo da confrontação MeDiNa ESRD 8,2 t x Francesa ESRD 8,2 t.

Estes aspectos indicam como alerta que o princípio da equivalência utilizado para converter o dano de uma determinada composição de eixos à passagem de um ESRD de 8,2 t, tal como executado no Brasil, não representa o dano real a que os pavimentos estão sujeitos no campo, se comparado à solicitação pela carga legal de 10,0 t admitida no país e que, no mínimo, é a aplicada pelos ESRD na prática. A comprovação disto a partir das simulações realizadas com a metodologia francesa foi a necessidade de se prever maiores espessuras de camadas asfálticas para que fossem obtidas amplitudes de deformação próximas aos casos com 8,2 t.

Portanto, se uma estrutura de pavimento está dimensionada considerando uma carga de ESRD equivalente a 8,2 t, e na prática está sendo solicitada pela mesma configuração de eixo por pelo menos 10,0 t, é certo que terá uma vida útil menor em relação ao que se previu em projeto.

Por esta razão, propostas como a do TED nº 194/2025, firmado com a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), que tem por objetivo estudar novas perspectivas para os estudos de tráfego, com enfoque na análise do espectro de carga da frota, a partir da coleta e tratamento de dados obtidos em estações de pesagem em movimento, são de suma importância para que se determine as condições mais próximas da realidade, em relação à solicitação das estruturas de pavimentos pelas composições de eixos, contribuindo para que se busque eliminar a aplicação do conceito obsoleto de equivalência ainda utilizado no país.

Quanto à ferramenta computacional MeDiNa 1.1.9.0, tem-se que a função ‘Avaliar’ se mostrou mais adequada que a função ‘Dimensionar’. Neste contexto, em todos os casos em que as estruturas de pavimento foram ‘Avaliadas’, houve a possibilidade de se determinar uma solução de dimensionamento que não apresentasse conflito com alguma prerrogativa de aceitabilidade do método na íntegra (Tabela 4.58 a 4.60).

Entretanto, em quase todos os cenários simulados com a utilização da função ‘Dimensionar’, à exceção de um (tabela 4.62), em que pese não ter havido a emissão de alertas pelo programa MeDiNa 1.1.9.0 na tela inicial sobre qualquer conflito com as premissas técnicas da metodologia, para fins de aceitabilidade da solução dimensionada, foi unânime a indicação na aba de resultados quanto à presença de afundamento na trilha de roda (ATR) igual ou superior a 5,0 mm no topo do solo do subleito, situação que não atende aos preceitos de aceitabilidade da metodologia.

E, a propósito da monoliticidade das estruturas de pavimento, foi demonstrado que considerar as interfaces das camadas subjacentes às asfálticas como não aderentes, é uma prerrogativa que impacta sobremaneira nas soluções de dimensionamento, conforme demonstrado nas simulações realizadas com o uso da ferramenta Alizé, para os casos de elasticidade linear e carregamento estacionário, ao longo do tópico 4.2, seja para solicitações com ESRD de 8,2 t quanto de 10,0 t.

Neste contexto, cabe esclarecer que as interfaces possuem aderência gerada por dois fatores principais: contato físico, que gera ângulo de atrito, intertravamento e resistência ao cisalhamento, e; forças de ligações químicas, que possibilitam a atração molecular entre os materiais, formando as tensões interfaciais.

Ademais, na interface de contato das camadas não asfálticas com as asfálticas, há a previsão do serviço de imprimação, justamente para que maior aderência efetiva seja alcançada no contato entre os materiais, propiciando a ocorrência de melhor resistência ao cisalhamento na região de contato e, sobretudo, transmissão dos esforços aplicados pelo tráfego, a fim de que não sejam concentrados apenas em uma única camada. Eis a razão de se projetar uma estrutura multicamadas e com caráter monolítico.

Logo, ignorar a existência destes fenômenos e condições de trabalho é ser contrário às leis clássicas já estabelecidas na ciência e, que regem o princípio do contato entre superfícies de materiais.

Senão vejamos, para todos os casos simulados com aderência inexistente entre as camadas constituintes da plataforma de fundação (PF) e, desta com a camada asfáltica mais profunda das estruturas simuladas numericamente (Tabela 4.10 a 4.33), foi observado que ocorre um forte aumento da deformação de tração na base da camada asfáltica mais profunda da estrutura dimensionada e, como consequência, a maior parte dos casos simulados nestas condições indicam a ocorrência de ruptura da estrutura ainda na metade da vida útil projetada, ou seja, com apenas cinco anos de serviço e, em todos os cenários considerados, a ruptura ocorreria antes dos 10 anos previstos.

Acerca da função de transferência prevista no programa MeDiNa 1.1.9.0, cabe destacar que se trata de uma equação de caráter empírico, constituída por um banco de dados limitado a partir de experiências com base em monitoramento de área trincada e de ensaios realizados à compressão diametral para as misturas asfálticas do projeto Fundão, oriundo da parceria entre a COPPE/UFRJ e a Petrobras/CENPES, iniciado em 2006, tanto para módulo de rigidez quanto para a fadiga.

Da série amostral considerada foram extraídos os valores dos coeficientes ‘Z’ e ‘n’, que constituem a formulação dos expoentes ‘A’ e ‘B’ da função sigmoide, responsável por determinar o percentual de área trincada (% AT) das misturas asfálticas ao longo da vida útil projetada (Fritzen *et al.*, 2019).

Logo, é condição óbvia à comunidade científica internacional que a evolução dos danos ocorrentes nas estruturas de pavimento se dá de maneira randômica, e cada seção apresenta aspectos e comportamentos intrínsecos, não podendo ser generalizados.

Estas condicionantes supracitadas, aliadas ao comportamento complexo das misturas asfálticas, principalmente quanto à dependência da temperatura e da frequência das cargas solicitantes, conduzem a dispersões quanto à trajetória das seções de ruptura das amostras e, consequentemente, dos resultados obtidos. Desta forma, tem-se que há distinções de resultados entre as amostras de mesma natureza ou não, fato que alerta para a adoção de funções com coeficientes fixos generalistas para o tratamento de casos distintos e complexos.

Ainda, a situação é agravada ao se prever o aporte de um fator de deslocamento (fS) para o ajuste da curva da área trincada unitária para a curva sigmoide padrão, fazendo com que haja uma tendência forçada de sobreposição da evolução do trincamento previsto para uma dada mistura asfáltica, a uma condição fixa pré-estabelecida por uma função que não representa a série amostral avaliada em cada caso. Assim, não importa qual tipo de mistura asfáltica está se estudando, pois, a lógica da função de transferência força com o que resultado obtido seja coincidente com a curva sigmoide já estabelecida no código do programa MeDiNa 1.1.9.0, não descrevendo o comportamento real do material testado.

Os próprios desenvolvedores do programa MeDiNa 1.1.9.0 são unânimes em afirmar – mesmo após terem executado uma ampliação da série amostral de testes, em relação à publicação original (Fritzen *et al.*, 2019), a partir da realização de ensaios utilizando o equipamento *Heavy Vehicle Simulator* (HVS) em trechos experimentais reais de campo –, o que segue (Fritzen *et al.*, 2025): *‘É importante ressaltar, no entanto, a necessidade de novas calibrações, à medida que o banco de dados adotado no artigo for expandido e, para o desenvolvimento e implementação de ferramentas mais avançadas que considerem fatores complexos e relevantes, como propriedades do ligante e da mistura asfáltica, temperatura, magnitude e velocidade do tráfego’*.

Cabe destacar também a modalidade dos ensaios previstos pela metodologia MeDiNa para testagem das misturas asfálticas, no que diz respeito ao módulo de rigidez e à fadiga, ou seja, à compressão diametral e com o controle da força, em que a partir do escopo já apresentado no tópico 4 do RP – 034, é possível concluir que o arcabouço experimental não possui relação campo/laboratório cientificamente estabelecida e apresenta resultados muito díspares aos dos ensaios praticados pelas metodologias mais avançadas do mundo, com destaque para a francesa e a americana, fato já comprovado de longa data por pesquisas em âmbito internacional (Di Benedetto *et al.*, 2003; Khalid, 2000; Chailleux, De La Roche e Piau, 2010) (Figura 5.2).

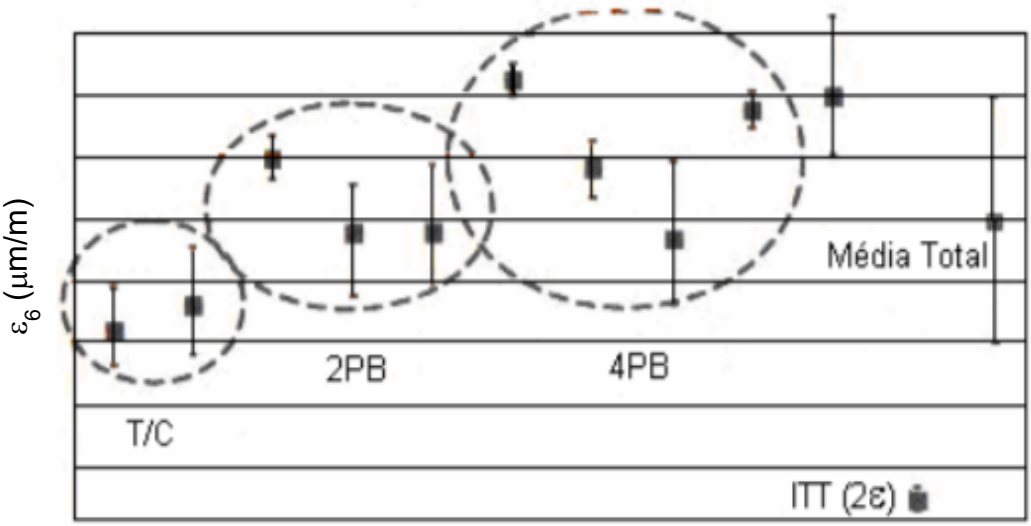


Figura 5.2 – Comparativo dos resultados de ε_6 na fadiga entre os ensaios de tração/compressão (T/C), viga a dois (2PB) e quatro (4PB) pontos, e compressão diametral (ITT)

Fonte: Adaptado de Di Benedetto *et al.* (2003)

Quanto ao modelo de avaliação de dano por área trincada, Fritzen *et al.* (2019) afirmam que (parênteses nosso): *'Diversos projetistas vêm utilizando o coeficiente igual a 10^4 como fator campo-laboratório para esse modelo (dano de fadiga por área trincada), que corresponde a cerca de 20,0 % da área trincada do pavimento a uma temperatura de 54 ºC e em termos de diferença de tensões'*. Portanto, utilizar como base conceptiva para proposição de uma metodologia um modelo que apresenta um afastamento de 10.000 vezes entre o comportamento observado em campo e o laboratorial indica um forte afastamento das condições práticas.

Dado o exposto, tem-se que todas estas limitações descritas colocam a metodologia MeDiNa em posição de um caminho ainda a ser percorrido para que atinja excelência em relação à francesa, principalmente por não ter definida uma relação campo/laboratório própria, considerando principalmente o contexto dos ensaios laboratoriais previstos e a lógica adotada na construção da função de transferência da ferramenta computacional.

Quanto à metodologia francesa, tem-se que apresentou resultados coerentes em relação ao comportamento mecânico e reológico das misturas asfálticas GB e EME estudadas ao longo da pesquisa.

Neste contexto, tem-se que as simulações elásticas lineares (EL) e viscoelásticas lineares (VEL) no contexto metodológico francês, apresentaram resultados próximos, devido possuírem a mesma base científica do modelo elástico linear que caracteriza parte do comportamento reológico e mecânico das misturas asfálticas. As diferenças observadas em favor de um ou outro modelo aplicado, estão na maior parte dos casos relacionadas à sensibilidade dos modelos reológicos, como o de Huet-Sayegh (1965), à ativação da componente viscosa, muito influenciada pelas variações de temperatura e frequência de solicitação do material.

Logo, as análises VEL são mais acuradas para utilização em rotinas numéricas de dimensionamento das estruturas de pavimento, pois consideram o espectro do plano complexo para definir a resposta do material às cargas solicitantes, e não apenas um valor pontual extraído de sua amostragem. Ainda, permite a realização de análises no domínio dinâmico, a partir da relação não local de tensões estabelecida com a viscoelasticidade, oriunda da defasagem da resposta do material às solicitações sofridas, ou seja, da deformação resultante em relação à carga aplicada no âmbito frequencial.

Quanto ao modelo utilizado para definir a θeq em 28 ºC (Equações 2.4 e 2.5), foi possível perceber durante a sua aplicação que possui forte sensibilidade quando as cotas de análise se encontram mais próximas da superfície, não sendo verificado o mesmo para espessuras mais profundas, em que apresentou pouca variação dos valores calculados (Tabela 2.12). Cabe continuar as investigações, em comparação a outros modelos científicos existentes, a fim de apurar se para cotas profundas esta é uma tendência natural da propagação de calor na estrutura do pavimento ou se há limitações das equações utilizadas para este domínio de aplicação, que enseje a troca do modelo ou o seu aprimoramento.

De toda forma, para efeito de comparação, o valor de 28 ºC calculado nesta pesquisa não se encontra distante de experiência real já procedida no continente sulamericano, para fins de determinação da θeq. Estudo realizado na Guiana Francesa pelo *Département Général d'Aviation Civil* (DGAC, 2014) durante o projeto da pista de pouso do aeroporto internacional daquele país, seguindo as prerrogativas da metodologia francesa, estabeleceu o valor de 25 ºC.

Outro ponto importante a ser analisado diz respeito ao critério de ruptura adotado pelas metodologias MeDiNa e francesa, em que a primeira considera o limite de até 30,0 % da área trincada da mistura asfáltica, enquanto a segunda avalia a não ultrapassagem do valor da deformação admissível de tração [$\varepsilon(NE, \theta eq, f)$] calculada para a camada asfáltica mais profunda da estrutura de pavimento que se pretende dimensionar.

Quanto ao critério da metodologia MeDiNa, parte do princípio que a estrutura de pavimento, mais especificamente a camada asfáltica, já compreende em projeto uma admissibilidade de ter até 30,0 % de sua área útil trincada, isto é, rompida por fadiga, o que significa a falência estrutural do material.

Logo, esta linha de raciocínio vai de encontro ao que se tem como objetivo em projetos estruturais, inclusive de pavimentos, em razão de que devem ser concebidos para não trincar, em que pese estarem sujeitos a sofrer colapsos pontuais em alguma região de sua extensão ao longo da vida útil devido a causas variadas, mas não a ponto de ser considerado como critério metodológico principal para a validação do dimensionamento estrutural.

Inclusive, em termos práticos da engenharia, esta premissa favorecerá os maus prestadores de serviço, pois com a chancela metodológica para que as estruturas de pavimento possam trincar em até 30,0 % de sua área útil, utilizarão desta prerrogativa para

se eximirem da culpa por serviços mal prestados ao poder público e à sociedade, tanto em projeto quanto em execução e manutenção, pois terão supedâneo na própria metodologia em seu favor.

Isto posto, verifica-se que a metodologia francesa mais uma vez se mostra coerente em seus critérios, face à consideração da deformação admissível ser a variável de controle do processo de monitoramento da vida útil das estruturas de pavimento. Para tanto, basta aplicar a própria lógica utilizada na engenharia quando se projeta uma estrutura, quando são utilizados via de regra valores admissíveis quanto ao limite do comportamento mecânico dos elementos calculados, a saber: um pilar é projetado para suportar a carga máxima admissível referente ao esforço de compressão, a fim de que não flambe, e; uma laje deve ser concebida para que deforme dentro do limite da flecha admissível quando solicitada.

Portanto, é fácil compreender que em nenhum dos casos apontados como exemplos, admite-se o trincamento do elemento estrutural, mas toma-se como referência a não ultrapassagem do esforço mecânico admissível suportado, a fim de que não rompa. Por qual razão, uma estrutura de pavimento submetida ao esforço de flexão alternada na passagem do carregamento dinâmico (vide figuras 2.2 e 2.3; RP – 032), deveria ser projetada com base no percentual de área trincada, ao invés de considerar o valor admissível de deformação capaz de suportar? Fica evidente, portanto, que o critério de projeto necessita ser repensado.

Por esta razão, a metodologia francesa não adota o trincamento das misturas asfálticas como um fator determinístico e muito menos preditivo, mas de forma probabilística, tomando em conta o desempenho à fadiga das misturas asfálticas utilizadas no dimensionamento (vide tópico 4.2 e Apêndice B; RP – 032), com base em uma distribuição gaussiana de danos, devido ao processo de deterioração das estruturas de pavimento no campo ocorrer de forma aleatória ao longo da vida útil (Corté e Goux, 1996).

Portanto, diante de todas as considerações apresentadas durante a execução desta pesquisa, tem-se que apenas uma metodologia amadurecida cientificamente, com mais de 60 anos contínuos de desenvolvimento da sua linha de pesquisa, dispondo de estreita e comprovada relação campo/laboratório em 0,9 a 1,3 (Manuel LPC, 2007), tal como a metodologia francesa, é capaz de reproduzir as condições mais próximas de solicitação das estruturas de pavimento como ocorrem no campo.

Isto posto, permite aplicar em rotinas numéricas de dimensionamento equações constitutivas e modelos de comportamento, que tomem em conta o caráter viscoelástico das misturas asfálticas e a solicitação sob o domínio frequencial, isto é, dinâmico e dependente da temperatura e da velocidade do carregamento, a partir da aplicação do regime pseudopermanente, podendo contribuir em grande proporção para o aporte de avanços na construção do novo método de dimensionamento nacional.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir da execução do escopo teórico-experimental do TED nº 702/2020, foi possível estudar de maneira profunda e dentro das limitações impostas pelo tempo disponibilizado e pactuação da linha de trabalho com o DNIT/IPR, as particularidades das metodologias MeDiNa e francesa, abrangendo tanto o processo de formulação de misturas asfálticas quanto de dimensionamento das estruturas de pavimento de concreto asfáltico.

Neste contexto, pôde-se concluir que, após a entrega dos produtos, capacitações, orientações, publicações e atividades correlatas, todos os objetivos traçados para a execução desta pesquisa foram alcançados com êxito e, dentro dos prazos estipulados, feito considerável diante de uma extensa e desafiadora campanha experimental que perdurou 60 meses.

Assim, tomando em conta que em cada produto entregue já foram estabelecidas as considerações finais acerca dos temas explorados, tem-se que nas linhas seguintes serão compilados sob a forma de tópicos sucintos, os pontos mais relevantes acerca deste RP – 035:

- O conjunto de ensaios normativos previstos no protocolo experimental da metodologia MeDiNa para a determinação dos dados de entrada das misturas asfálticas na ferramenta computacional homônima, poderia ser repensado, pois o arcabouço estabelecido neste momento, não permite dispor de uma relação campo/laboratório estreita e, consequentemente, não contribui para a acurácia dos resultados obtidos para aplicação em rotinas numéricas de dimensionamento;
- A função de transferência da ferramenta computacional MeDiNa 1.1.9.0 possui falhas graves de concepção, em razão de dispor de coeficientes fixos pré-definidos com base em séries amostrais limitadas e oriundas de estudos prévios, que não são capazes de descrever o comportamento mecânico de todas as possíveis variações de formulações existentes no universo experimental das misturas asfálticas e das respostas estruturais de campo. Logo, não pode ser aplicada como uma lei de comportamento geral destes tipos materiais, complexos e variados em suas composições e respostas às cargas solicitantes. Inclusive, estas falhas já foram percebidas pela comunidade científica nacional e pelo próprio DNIT, pois em setembro de 2025 lançaram a versão 2.0 da ferramenta MeDiNa, a partir da recalibração dos coeficientes que abastecem a função de transferência, o que significa uma correta busca por melhorias, ainda que com viés empírico de concepção até o momento;
- A aplicação de fatores de deslocamento ‘fS’ à curva de trincamento individual de cada mistura asfáltica considerada no dimensionamento, para que seja forçosamente coincidente com a função sigmoide já definida no código programado para a ferramenta computacional, independente de qual seja a formulação considerada, demonstra um evidente distanciamento quanto à descrição do real comportamento mecânico das

misturas asfálticas, e deveria ter o seu conceito repensado para uma função analítica que representasse a resposta físico-mecânica dos materiais quando solicitados;

- Não à toa, todas as simulações numéricas com o uso da função 'Dimensionar' – quando se ativa a aplicação, de fato, da função de transferência para se determinar a solução de dimensionamento –, apresentaram dificuldades de convergência integral com os critérios de aprovação previstos na metodologia MeDiNa, principalmente no que diz respeito aos afundamentos na trilha de roda no topo do solo do subleito. Situação contrária foi verificada com o uso da função 'Avaliar', que permitiu obter estruturas finais sem conflitos com as prerrogativas admissíveis da metodologia, servindo novamente como ponto de alerta ao aspecto conceptivo da referida função;
- A admissibilidade de 30,0 % de trincamento da área útil das misturas asfálticas na estrutura de pavimento dimensionada, como critério metodológico deveria ser repensada, quando se entende como adequado projetar um elemento estrutural para que não rompa, prevendo de forma confiável a admissibilidade do esforço máximo que possa suportar quando solicitado, a fim de que não atinja esta condição crítica em campo, possibilitando a programação de manutenções preventivas, ao invés de corretivas, quando os trincamentos por fadiga já instalados nas misturas asfálticas denotam a falência estrutural do material, não sendo mais passíveis de reparação;
- A metodologia francesa apresentou resultados tanto para os casos simulados com ESRD de 8,2 t quanto de 10,0 t, maior robustez das camadas asfálticas dimensionadas em todos os casos, quando comparados aos resultados obtidos com o uso da metodologia MeDiNa, tanto na condição elástica linear (EL) com aplicação de carregamento estacionário quanto viscoelástica linear (VEL) sob carga dinâmica;
- Porém, não se trata de terem sido dimensionadas maiores ou menores espessuras a atestação do grau de confiabilidade do método francês. As principais razões para o cenário favorável é dispor de um conjunto de ensaios normativos que permitem reproduzir da forma mais próxima possível as solicitações a que as misturas asfálticas são submetidas em campo, e descrevê-las de maneira analítica na função de transferência utilizada para determinar a resposta dos materiais nas ferramentas computacionais Alizé, e sobretudo, Viscoroute 2.0, permitindo a avaliação intrínseca do comportamento mecânico e reológico das misturas asfálticas em cada caso, sem o uso de fatores que forcem a sobreposição do comportamento do material a uma função previamente definida, e não compatível com a própria formulação testada na campanha experimental;
- As simulações VEL mostraram-se mais acuradas que as EL, pois em que pese terem apresentado resultados próximos na maior parte dos casos avaliados, demonstraram maior sensibilidade às variações da componente viscosa das misturas asfálticas, principalmente por tomarem em conta o espectro reológico dos parâmetros viscoelásticos destes materiais no plano complexo, compreendendo a função de

fluência, a partir do modelo de Huet-Sayegh, algo não possível apenas com o uso da lei elástica linear;

- Ainda, o critério de ruptura a ser avaliado das misturas asfálticas pela metodologia francesa diz respeito à deformação de tração admissível na fibra inferior das camadas asfálticas, sendo bem mais coerente do ponto de vista da prática da engenharia, que considerar o percentual de área trincada instalado na estrutura do pavimento como critério metodológico;
- Para tanto, a possibilidade de haver ocorrências de trincamentos ao longo da vida útil é considerada no cálculo do coeficiente de risco (kr) do projeto, a partir de análises probabilísticas, em relação ao comportamento à fadiga dos materiais, e não de maneira determinística como na metodologia MeDiNa;
- O fato de a metodologia MeDiNa não considerar aderidas parte das camadas constituintes das estruturas de pavimento, demonstrou ser um critério avesso às condições mais próximas da realidade, tanto por razões físicas quanto químicas, reduzindo na maior parte dos casos analisados à metade da vida útil prevista em projeto, quando comparadas às simulações das mesmas condições completamente aderidas pelas ferramentas computacionais Alizé e Viscoroute 2.0.
- A comparação entre as ferramentas de cálculo mecanístico Alizé, Viscoroute 3.1 e AEMC/MeDiNa evidenciou que, quando alimentadas com a mesma estrutura de pavimento, os mesmos módulos dos materiais e o mesmo carregamento por eixo, todas fornecem campos de tensão e deformação praticamente coincidentes ao longo da profundidade. As diferenças observadas são da ordem de poucos por cento e decorrem de particularidades numéricas de cada código, não afetando as conclusões de engenharia. Dessa forma, confirma-se que o núcleo mecanístico de cálculo é equivalente entre as metodologias francesa e MeDiNa, e que as divergências de espessuras e vidas de projeto resultam principalmente das premissas próprias de cada método de dimensionamento (valores admissíveis, modelos de dano, funções de transferência e fatores de segurança).

Dado o exposto, apresentam-se as seguintes recomendações e perspectivas para a continuidade dos estudos acerca do tema explorado no TED nº 702/2020, no intuito de contribuir para a melhoria da construção do método de dimensionamento nacional, o que segue:

- Realizar estudos de tráfego com base no princípio da análise do dano real por composição de eixo, situação que se sobreporia ao tema do TED nº 194/2025, mas seria uma proposta adicional de solução à mudança de paradigma referente ao uso da equivalência de eixos atual;
- Aprofundar os estudos sobre a determinação da temperatura crítica do pavimento para fins de dimensionamento, tomando em conta não apenas os dados climatológicos, mas

as propriedades dos materiais e o comportamento mecânico das estruturas de pavimento, ampliando a acurácia do modelo proposto nesta pesquisa;

- Desenvolver modelos matemáticos que permitam determinar a rigidez dos materiais constituintes do pavimento, a partir das suas propriedades e de dados tomados em solicitação dinâmica, com o uso de *Traffic Speed Defletometer* (TSD), por exemplo, a fim de se eliminar o procedimento empírico de retroanálise das rotinas de dimensionamento dos pavimentos;
- Estudar a influência da variação frequencial no comportamento mecânico das misturas asfálticas, sobretudo à fadiga, a fim de atestar cientificamente se a transposição frequencial em determinadas temperaturas de trabalho é negligenciável ou não.

APÊNDICE A – FADIGA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS GB E EME

Tabela AP A1 – Resultados da mistura asfáltica GB a 0 ºC e 25 Hz

Nível de Deformação (x 10^{-6} def)	Número de Ciclos (N)
110	1168500
110	3112500
110	3442500
110	3214500
110	2491500
110	2581500
110	1302000
130	1684500
130	498000
130	1018500
130	339000
130	1231500
130	1261500
130	580500
130	619500
160	151500
160	459000
160	156000
160	432000
160	412500
160	249000

Fonte: Clara (2026)

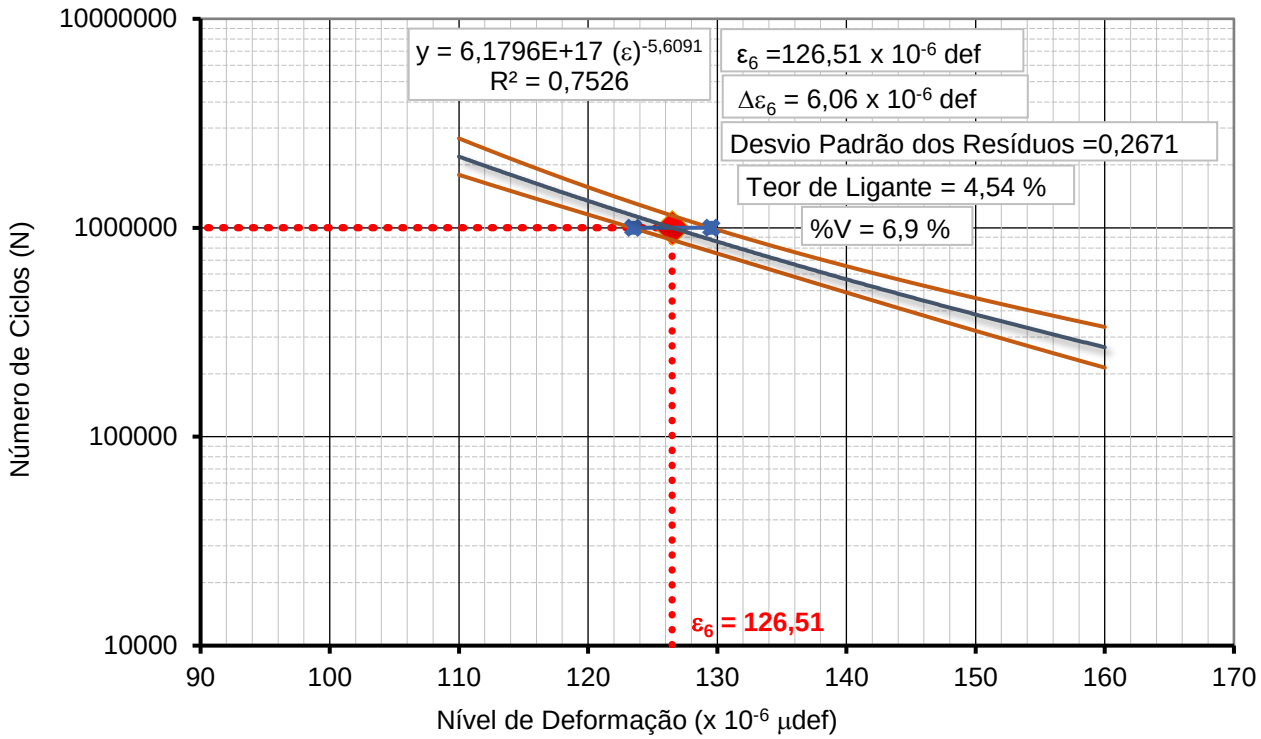


Figura AP A1 – Curva de fadiga da mistura asfáltica GB a 0 ºC e 25 Hz

Fonte: Clara (2026)

Tabela AP A2 – Resultados da mistura asfáltica EME a 0 ºC e 25 Hz

Nível de Deformação (x 10^{-6} def)	Número de Ciclos (N)
130	3784500
130	4278000
130	5023500
130	4534500
130	3924000
130	6090000
160	579000
160	388500
160	624000
160	897000
160	1026000
160	427500
190	478500
190	405000
190	264000
190	529500
190	162000
190	102000

Fonte: Clara (2026)

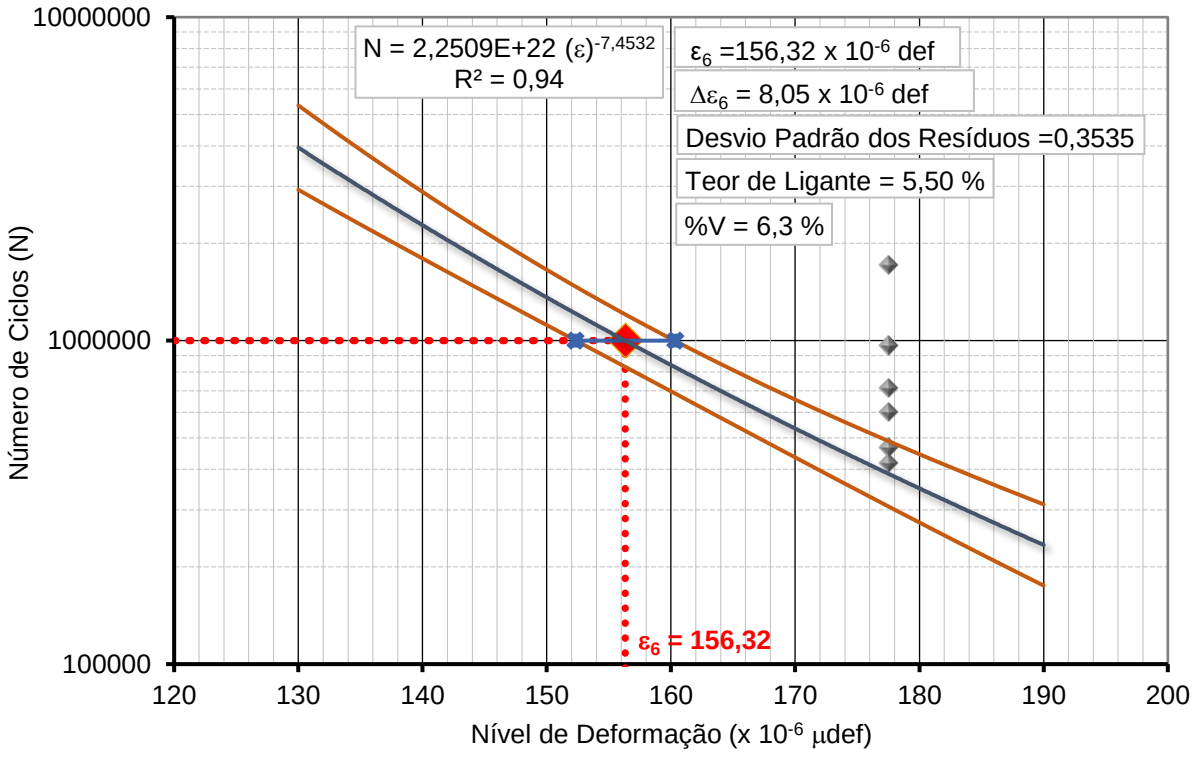


Figura AP A2 – Curva de fadiga da mistura asfáltica EME a 0 ºC e 25 Hz

Fonte: LDTPav, 2025a

APÊNDICE B – MÉDIAS HISTÓRICAS CLIMÁTICAS DAS ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO

Tabela AP B1 – Temperaturas médias mensais – série histórica 1931 – 1990

Estação Meteorológica	Temperatura Média Mensal (ºC)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1052 - Jaraguá do Sul	25,0	25,0	24,1	22,0	19,2	17,1	16,5	17,5	19,8	20,8	22,1	24,2
2389 - Schroeder	25,0	24,8	23,9	21,5	18,9	16,5	16,1	16,9	19,3	20,4	21,8	23,8
2434 - São João do Itaperiú	25,6	25,3	24,1	21,9	19,6	17,8	17,0	17,8	19,9	21,1	22,6	24,6
2388 - Massaranduba	25,1	25,3	24,0	22,1	19,3	17,1	16,7	17,4	19,4	21,0	22,0	24,0

Fonte: EPAGRI/CIRAM (2025)

Tabela AP B2 – Temperaturas médias mensais – série histórica 1991 – 2020

Estação Meteorológica	Temperatura Média Mensal (ºC)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1052 - Jaraguá do Sul	25,0	24,0	22,0	19,2	17,2	16,5	17,4	19,7	20,8	22,1	24,4	25,0
2389 - Schroeder	20,7	20,5	19,8	17,4	14,5	12,9	12,4	13,5	15,7	17,1	18,3	20,2
2434 - São João do Itaperiú	25,6	25,1	23,9	22,7	19,5	17,8	17,1	17,8	19,9	21,2	22,6	24,7
2388 - Massaranduba	25,1	25,08	23,7	22,2	19,3	17,2	16,7	17,5	19,4	20,7	22,0	24,1

Fonte: EPAGRI/CIRAM (2025)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO. Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice. Washington, DC. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT NBR 7181:2025. Solos – Análise granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2016.

_____. ABNT NBR 7182:2025. Solos – Ensaio de compactação.

BAI, T.; CHENG, Z.; HU, X.; FUENTES, L.; e WALUBITA, L. F. Viscoelastic modelling of an asphalt pavement based on actual tire-pavement contact pressure. Road Materials and Pavement Design, v. 22 (11), 2458–2477, jun. 2020. https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1766545.

BARBER, E. S. Calculation of Maximum Pavement Temperatures from Weather Reports. HRB Bulletin, 9 p. 1957.

BODIN, D.; CHUPIN, O.; DENNEMAN, D. Viscoelastic Asphalt Pavement Simulations and Simplified Elastic Pavement Models Based on an “Equivalent Asphalt Modulus” Concept. Journal of Testing and Evaluation, v. 45 (6), pp. 1887-1895, nov. 2017. https://doi.org/10.1520/JTE20160652.

BOURDON, C. e BROSSEAUD, Y. Élaboration du Guide Technique de Dimensionnement des Chaussées pour le Sénégal: Un bel exemple de partenariat EGIS-IFSTTAR-SENELABO. Journées Techniques Routes (JTR). Nantes, France. 2019.

CATALOGUE LCPC/SETRA. Catalogue des Structures Types de Chaussées Neuves: Réseau Routière National. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) et Service d’Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA). Paris, France, 1998.

CHABOT, A.; CHUPIN, O.; DELOFFRE, L.; DUHAMEL, D. ViscoRoute 2.0 A: Tool for the Simulation of Moving Load Effects on Asphalt Pavement. Road Materials and Pavement Design, v. 11 (2), pp. 227-250. https://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690274. sep. 2010.

CHAILLEUX, E. Note d’utilisation de l’application logicielle Viscoanalyse: version Beta. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). France. 2007.

CHAILLEUX, E.; De La ROCHE, C.; PIAU, J.-M. Study of the influence of experimental conditions applied to the indirect tensile test versus type of bituminous mixture. Materials and Structures, [S.L.], v. 44, n. 4, p. 719-734, 12. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1617/s11527-010-9661-1. set. 2010.

CHENG, H., WANG, Y., LIU, L., & SUN, L. Effects of using different dynamic moduli on predicted asphalt pavement responses in mechanistic pavement design. Road Materials and Pavement Design, v. 23 (8), pp. 1860-1876. https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1924842 may 2021.

CORTÉ, J-F; GOUX, M-T. Design of pavement structures: the French technical guide. Transportation Research Record, v. 1539, n. 1, p. 116-124, 1996.

CTTP. Catalogue des Dimensionnement des Chaussées Neuves. Contrôle Technique des Travaux Publics. Fascicules 1, 2 et 3, République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère des Travaux Publics. 2001.

DGAC. Méthode Rationnelle de Dimensionnement des Chaussés Aéronautiques Souples. Direction Génerale de l'Aviacion Civile, Guide technique, 1ère édition, Vol. 1. France, 2016

DI BENEDETTO, H.; BAAJ, H.; PRONK, C. LA ROCHE, e A. LUNDSTRÖM, R. Fatigue of bituminous mixtures: different approaches and RILEM Group contribution. *In:* Proceedings of the 6th International RILEM Symposium, p. 15-38. Zurich, Switzerland, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES DNIT. Manual de Ajuda: Programa MeDiNA - Versão 1.1.9., Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), 2023a. 38 p. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/medina-versao-1-1.9.

_____. DNIT. Programa MeDiNA - Versão 1.1.9.0, Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), 2023b. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/medina/medina-versao-1-1.9.

_____. DNIT. Projeto Executivo de Engenharia para Duplicação de Rodovia Incluindo Restauração e Melhoramentos para Adequação da Capacidade e Segurança: Rodovia BR-280/SC, Trecho Porto São Francisco do Sul – Divisa SC/PR (Porto União – União da Vitória). Vol. 3.1 – Memória Justificativa – Duplicação. Consórcio Iguatemi-Sotepa. 2012.

_____. DNIT. Manual de Pavimentação, Instituto de Pesquisas Rodoviárias IPR, Publicação IPR-719, 277 p. 2006.

DNIT-IE 179. Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente - Instrução de Ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), 2018.

DNIT-ME 135. Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), 2018.

DNIT-ME 134. Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), 2018.

DONG, Z.; MA, X. Analytical solutions of asphalt pavement responses under moving loads with arbitrary non-uniform tire contact pressure and irregular tire imprint. Road Materials and Pavement Design, v. 19 (8), pp. 1887-1903, jul. 2017. https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1354776.

DONG, P.; YUAN, Y.; CAO, X. Numerical investigation of dynamic stresses in asphalt pavement under the combined action of temperature, moisture and traffic loading. Construction and Building Materials, v. 417, 135131, ISSN 0950-0618, feb. 2024. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135131.

EPAGRI/CIRAM. Sistema AGROCONNECT. Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina, Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia. Santa Catarina, 2025.

FRANCO, F. A. C. P. Aplicações do Método MeDiNa no dimensionamento de pavimentos asfálticos. Apresentação realizada no XIII Workshop da Rede Temática de Asfalto (RTA), 37 lâminas. Rio de Janeiro, 2020.

FRITZEN, M. A.; da MOTTA, L. M. G.; UBALDO, M. de O.; ARAGÃO, F. T. S.; NASCIMENTO, L. A. H. do; FRANCO, F. A. C. de P. Validation of a transfer function adopted in the Brazilian mechanistic-empirical pavement design guide based on accelerated HVS and real traffic loads. Road Materials and Pavement Design, pp. 1–19, jun. 2025. https://doi.org/10.1080/14680629.2025.2511237.

FRITZEN, M. A.; FRANCO, F. A. C. P; MOTTA, L. M. G; UBALDO, M. O. Atualização da função transferência do dano de fadiga para a área trincada do programa MeDiNa. *In:* Anais do 9° Congresso Rodoviário Português, Lisboa, 2019.

GUIMARÃES, A. C. R. Um Método Mecanístico-Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos. Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da COPPE, 367 p. Rio de Janeiro, 2009.

GUIDE TECHNIQUE. Conception et dimensionnement des structures de chaussée, Guide-Technique. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) et Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA), Paris, France, 1994.

HORNYCH, P.; KAZAI, A.; PIAU, J-M. Study of the Resilient Behaviour of Unbound Granular Materials. *In*: Proceedings of the 5th Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields, Trondheim, Norway, 1998.

HORNYCH, P; BALAY, J-M; MAUDUIT, C.; BODIN, D. Evaluation of the concept of equivalent temperature for pavement design. *In:* Proceedings of the Ninth International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. Trondheim, Norway, 2013.

HORNYCH, P.; PIAU, J-M, BODIN, D.; SAINT-LAURENT, D.; NGUYEN, V. T. CESAR-LCPC: Version de Recherche - Le Module CVCR. Cahier de Développement Réalisé dans le Cadre de l'Opération de Recherche 11P063. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), 82 p. Nantes, France, 2008.

HUSSAN, S.; KAMAL, M. A.; HAFEEZ, I.; AHMAD, N.; KHANZADA, S.; AHMED, S. Modelling asphalt pavement analyzer rut depth using different statistical techniques. Road Materials and Pavement Design, v. 21 (1), pp. 117–142, jun. 2018. https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1481880.

IFSTTAR. Alizé-LCPC: Manuel d'Utilisation – Version 1.5. Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux, 116 p. France, 2016.

KHALID, H. A. A comparison between bending and diametral fatigue tests for bituminous materials. Materials and Structures, [S.L.], v. 33, n. 7, p. 457-465, ago. 2000. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/bf02480666.

LABTRANS. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS. LABORATÓRIO DE TRANSPORTE E LOGÍSTICA. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, SC, 2025.

LDTPav. Campanha de estudos técnicos. *In*: Documento preparatório da qualificação de tese de doutorado de Paulo Roberto Rodrigues, em andamento. Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Florianópolis, SC, 2025.

LIÈVRE, D; MORVAN, B. e PIAU, J-M. Alizé 2: Documentation utilisateur – Dimensionnement routier, vérification au gel. Université Gustave Eiffel (UGE), 80 p. France, 2021.

MACÊDO, J. A. G. de. Interpretação de Ensaios Deflectométricos para Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis. Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da COPPE, 455 p. Rio de Janeiro, 1996.

MANUEL LPC. Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés. Groupe de Travail RST. "Formulation des enrobés". Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris, France, 2007. 199 p.

MARTINEZ, R.; BALAY, J-M; BROSSEAUD, Y. Dimensionnement des Structures des Chaussées pour Voiries de Metrobus dans la Ville de Mexique. *In:* Proceedings of the PIARC Conference. Mexico, 2011.

SARROUKH, M.; LAHLOU, K; FARAH, M.; MEQUEDADE, N.; BEN EL MAMOUNE, N.; DERRADJI, A. Calcul de la Température Équivalente Selon le Climat Marocain et Son Effet sur le Dimensionnement des Chaussées. Academic Journal of Civil Engineering, Vol. 38 (1), Special Issue – RUGC. Marrakech, Morocco. https://doi.org/10.26168/ajce.38.1.6. 2020.

SAYEGH, G. Contribution à l'étude des propriétés viscoélastiques des bitumes purs et des bétons bitumineux. Thèse de Doctorat - Cours de Génie Civil, Faculté des Sciences de Paris. Paris, 1965.

SYBILSKI, D.; BAŃKOWSKI, W. Laboratory research and full scale testing of high modulus asphalt concrete in road pavement. Roads and Bridges, v. 10 (1-2), pp. 81-119, Road and Bridge Research Institute, apr. 2011. https://www.rabdim.pl/index.php/rb/article/view/v10n1-2p81.

UGE. Rapport sur la campagne expérimentale dans le manège de fatigue – saison 2024. Université Gustave Eiffel, 85 p. Nantes, France, 2024.

WANG, Y.; ZHAO, X.; ZHENG, L.; XIAO, J.; CAO, H.; LING, X. Design and mechanical response analysis of asphalt steel plastic pavement structure. Construction and Building Materials, v. 445, 137906, ISSN 0950-0618, sep. 2024. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137906.

XU, C.; CHEN, X.; ZENG, Q.; CAI, M.; ZHANG, W.; YU, B. A framework of integrating machine learning model and pavement life cycle assessment to optimize asphalt mixture design. Construction and Building Materials, v. 469, 140481, ISSN 0950-0618, mar. 2025. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140481.

ZOFKA, A.; BŁAŻEJOWSKI, K.; OSTROWSKI, P. (2021). Fatigue performance of asphalt pavements with highly polymer-modified asphalt binders. Road Materials and Pavement Design, v. 22 (sup1), pp. S269-S286, apr. 2021. https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1905701.