



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



MARIA EDUARDA GUEDES COUTINHO

**AVALIAÇÃO DE DANOS EM DORMENTES DE CONCRETO
PROTENDIDO POR MEIO DA TÉCNICA DE ANÁLISE
MODAL**

Uberlândia, 2026

MARIA EDUARDA GUEDES COUTINHO

**AVALIAÇÃO DE DANOS EM DORMENTES DE CONCRETO
PROTENDIDO POR MEIO DA TÉCNICA DE ANÁLISE
MODAL**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil,
Estruturas e Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos dos Santos

Uberlândia, 2026

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

C871
2026 Coutinho, Maria Eduarda Guedes, 2000-
Avaliação de danos em dormentes de concreto protendido por
meio da técnica de análise modal [recurso eletrônico] / Maria
Eduarda Guedes Coutinho. - 2026.

Orientador: Antonio Carlos dos Santos .
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Engenharia Civil.
Modo de acesso: Internet.
DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2026.526>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia civil. I. , Antonio Carlos dos Santos, 1968-,
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação
em Engenharia Civil. III. Título.

CDU: 624

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 335, PPGEC				
Data:	09 de julho de 2026	Hora de início:	08:30	Hora de encerramento:	10:30
Matrícula do Discente:	12412ECV007				
Nome do Discente:	Maria Eduarda Guedes Coutinho				
Título do Trabalho:	Avaliação de danos em dormentes de concreto protendido por meio da técnica de análise modal				
Área de concentração:	Construção Civil, Estruturas e Geotecnia				
Linha de pesquisa:	Construção Civil				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	FECIV.VALE002 - Avaliação do uso de areia Vale na produção de concreto para dormentes sob a perspectiva da durabilidade				

Reuniu-se, em sessão pública por webconferência e na Sala de Reuniões, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelos Professores Doutores: Gustavo Henrique Siqueira - UNICAMP, Rodrigo Gustavo Delalibera - UFU e Antonio Carlos dos Santos, orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Antonio Carlos dos Santos, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Antônio Carlos dos Santos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 13/07/2026, às 14:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **GUSTAVO HENRIQUE SIQUEIRA, Usuário Externo**, em 13/07/2026, às 16:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Gustavo Delalibera, Professor(a) do Magistério Superior**, em 14/07/2026, às 09:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7475291** e o código CRC **95D41C14**.

Dedico esse trabalho ao meu avô Andrade e minha avó Dalva que não me viram formar, mas se orgulhavam em dizer para todos que eu seria Engenheira. Eles vivem em cada conquista, no brilho discreto de cada vitória. A ausência de vocês nunca foi distância, porque o amor vence o tempo, e a saudade é apenas o jeito que o coração encontra de manter vocês por perto.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por guiar meus passos, renovar minhas forças nos momentos de dificuldade e tornar possível a concretização desta conquista tão importante em minha vida.

Aos meus pais, Kellen e Eduardo, que foram meu primeiro lugar de amor, cuidado e proteção. Esta caminhada não começou apenas nas salas de aula, nos livros ou nas noites de estudo. Ela começou muito antes, nos gestos silenciosos de vocês, nas renúncias que talvez eu nunca consiga dimensionar completamente, nas palavras de incentivo, nas preocupações escondidas e no amor que sempre me sustentou. Se hoje chego até aqui, é porque tive em vocês uma base firme.

Ao meu noivo Marcos Rodrigo, - Uma vez ouvi que, nas grandes subidas, há pessoas que não caminham por nós, mas caminham conosco; não retiram de nós o desafio da montanha, mas ajudam a carregar parte do peso para que a chegada seja possível. Você segurou minhas sacolas enquanto eu subia o morro, acolheu minhas inseguranças, respeitou meus silêncios, sustentou minha coragem e me lembrou, muitas vezes, que eu era capaz de continuar. Sua presença transformou a dureza do percurso em algo mais leve, mais humano e mais possível.

Agradeço à minha família, que se fez presente mesmo na minha ausência, com uma mensagem de saudade e que estavam orgulhosos. De modo especial, agradeço à minha avó Valéria, à minha tia Káren e minha irmã Manuella. Em muitos momentos, a força que encontrei para continuar veio também da lembrança de tudo o que vocês representam para mim.

Agradeço ao meu orientador, Antonio Carlos, que, ao longo desta trajetória, tornou-se também amigo, referência e parte essencial da minha formação. Sua orientação ultrapassou os limites acadêmicos: você me apresentou novos caminhos, ampliou meu olhar para o mundo e me mostrou que a pesquisa também é feita de coragem, generosidade, sensibilidade e confiança. Em muitos momentos, quando a caminhada parecia incerta, sua presença foi direção. Você acreditou em mim, abriu portas, compartilhou conhecimento e nunca soltou minha mão diante dos desafios que surgiram. Por tudo isso, deixo minha profunda gratidão, admiração e carinho. Obrigada por ter sido orientador, mentor e amigo nesta caminhada.

Agradeço, aos amigos Rennan e Monica que conheci ao longo desta caminhada acadêmica e que, com o tempo, tornaram-se presenças importantes também na minha vida

pessoal. Vocês são pessoas que ultrapassaram os limites da academia e se tornaram amigos para a vida. À Profa Eliane Betânia, que me deu a oportunidade de iniciar na pesquisa e esteve comigo em todos momentos que precisei, sendo ouvinte, amiga, e principalmente, uma inspiração de mulher na área.

Agradeço a todos os amigos e colegas que fizeram parte desta caminhada e que, de diferentes formas, contribuíram para que este percurso fosse mais leve. Aos participantes do grupo de pesquisa DurAE durante esses 6 anos, Deodatto, Larissa, Marcos Vinícius, Laisy, Hubert, Fernando, João Pedro, Thamires, Andressa, Nayane, Marina e Yugo, deixo meu reconhecimento pela parceria, pela colaboração e pela generosidade ao longo desta trajetória. A pesquisa, embora muitas vezes pareça um caminho solitário, torna-se mais forte quando construída em grupo.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Faculdade de Engenharia Civil (FECIV) e à Universidade Federal de Uberlândia (UFU), assim como seus professores e técnicos, especialmente, Prof. Dr. Márcio Schmidt, Prof. Dr. Rodrigo Delalibera, Prof. Dr. Paulo Guterres e técnicos Cristiane Pires e Wanderly Silva.

À Vale S.A., pelo apoio financeiro concedido, que contribuiu significativamente para a realização desta pesquisa e para a concretização desta etapa acadêmica.

RESUMO

Os dormentes de concreto protendido são elementos fundamentais da superestrutura ferroviária, responsáveis por manter a bitola da via e transferir as cargas provenientes dos trilhos para o lastro. Ao longo da vida útil, esses elementos podem ser afetados por diferentes mecanismos de dano, incluindo fissuração central associada ao apoio deficiente, fissuração no assento do trilho e deterioração por reações expansivas internas. A inspeção visual, embora amplamente utilizada, apresenta limitações para identificar danos internos ou fissuras parcialmente fechadas pela protensão. Neste contexto, este trabalho avaliou a aplicação da análise modal experimental como ferramenta complementar de diagnóstico não destrutivo em dormentes de concreto protendido. Foram investigados três mecanismos de dano: fissuração central por *center bound*, fissuração no apoio do trilho e fissuração por reação álcali-agregado. Os dormentes foram submetidos à indução controlada de danos, à caracterização visual e física da fissuração e a ensaios modais com excitação por martelo de impacto. Foram avaliadas as frequências naturais, as razões de amortecimento e as formas modais dos três primeiros modos de vibração. Os resultados indicaram que o primeiro modo de flexão apresentou a resposta mais consistente entre os parâmetros avaliados. Para o *center bound*, a frequência natural apresentou redução progressiva, embora discreta, com o aumento do dano. Para a fissuração no apoio do trilho, a razão de amortecimento mostrou maior sensibilidade do que a frequência natural. Nos dormentes submetidos à reação expansiva, a frequência natural foi influenciada pela interação entre ganho inicial de rigidez por continuidade da hidratação e perda progressiva de rigidez por fissuração expansiva, enquanto o amortecimento apresentou resposta mais direta à evolução da deterioração. Conclui-se que a análise modal possui potencial para complementar o diagnóstico de dormentes de concreto protendido, desde que interpretada em conjunto com a caracterização física do dano, inspeção visual e identificação dos mecanismos de deterioração atuantes.

Palavras-chave: Dormentes ferroviários, concreto protendido, dano estrutural, análise modal, monitoramento não destrutivo.

ABSTRACT

Prestressed concrete sleepers are essential components of railway superstructures, responsible for maintaining track gauge and transferring loads from the rails to the ballast. During service life, these elements may be affected by different damage mechanisms, including central cracking associated with deficient support, cracking at the rail seat, and deterioration caused by internal expansive reactions. Although visual inspection is widely used, it has limitations in detecting internal damage or cracks partially closed by prestressing. In this context, this study evaluated the application of experimental modal analysis as a complementary non-destructive diagnostic tool for prestressed concrete sleepers. Three damage mechanisms were investigated: central cracking due to center bound, cracking at the rail seat, and cracking induced by alkali-aggregate reaction. The sleepers were subjected to controlled damage induction, visual and physical crack characterization, and modal testing using impact hammer excitation. Natural frequencies, damping ratios, and mode shapes were evaluated for the first three vibration modes. The results indicated that the first flexural mode provided the most consistent response among the parameters assessed. For center bound damage, the natural frequency showed a progressive, although limited, reduction with increasing damage level. For rail seat cracking, the damping ratio was more sensitive than the natural frequency. In sleepers subjected to expansive reaction, the natural frequency was influenced by the interaction between initial stiffness gain due to continued hydration and progressive stiffness loss caused by expansive cracking, whereas damping showed a more direct response to the evolution of deterioration. The results indicate that modal analysis has potential to complement the diagnosis of prestressed concrete sleepers, provided that it is interpreted together with the physical characterization of damage, visual inspection, and identification of the active deterioration mechanisms.

Keywords: Railway sleepers, prestressed concrete, structural damage, modal analysis, non-destructive monitoring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Principais tipos de danos em dormentes de concreto protendido	26
Figura 2: Padrão de fissuração - <i>center bound</i>	26
Figura 3: Diferentes condições de apoio de dormentes	27
Figura 4: Padrão de fissuração - apoio do trilho.....	28
Figura 5: Padrão de fissuração - degradação química	30
Figura 6: Países com casos de dormentes de concreto afetados por reações expansivas	31
Figura 7: Comparação entre modos de vibração em diferentes condições.....	42
Figura 8: Arranjo de ensaio modal em dormente de concreto protendido	44
Figura 9: Gráfico obtido do acelerômetro central do dormente a) concreto protendido b) concreto reforçado (em vermelho ensaio antes da carga repetitiva; após a aplicação da repetição de carga, linha preta).	45
Figura 10: Arranjo de ensaio de dormente em via de metrô	47
Figura 11: Gráfico comparativo entre as frequências naturais de dormentes de concreto	47
Figura 12: Ilustração comportamento <i>in-phase</i> e <i>out-of-phase</i> ferrovia	48
Figura 13: Programa experimental	49
Figura 14: Dimensões dormentes de concreto protendido bitola larga	50
Figura 15: Configuração do ensaio de <i>center bound</i>	51
Figura 16: <i>Set up</i> ensaio Momento fletor no apoio do trilho.....	53
Figura 17: Etapas metodológicas para gerar a reação	56
Figura 18: Processo de protensão e concretagem dos dormentes.....	58
Figura 19: Dormentes imersos em solução na câmara de temperatura	59
Figura 20: Medição de expansão em corpos de prova.....	59
Figura 21: Monitoramento de expansão no dormente	60
Figura 22: Ensaios de caracterização.....	63
Figura 23: Etapas resumidas da análise modal em dormentes de concreto.....	65
Figura 24: Posicionamento do acelerômetro no dormente	66
Figura 25: Localização das batidas de martelo no dormente.....	67
Figura 26: Resumo processamento de sinais - análise modal	68
Figura 27: Sinais de excitação e de resposta	70
Figura 28: Picos identificados como válidos	71

Figura 29: Magnitude, fase e coerência da FRF	72
Figura 30: Diagrama de estabilização	72
Figura 31: Configuração espacial das formas modais	73
Figura 32: Curva carga <i>versus</i> deslocamento - Dormentes de caracterização <i>center bound</i> ...	76
Figura 33: Áreas de interesse para mapa de fissuração por <i>center bound</i>	76
Figura 34: Mapa de fissuração dos dormentes até ruptura em carga (kN) por dano de <i>center bound</i> – a) D1 b) D2 c) D3	77
Figura 35: Monitoramento da abertura da primeira fissura por <i>center bound</i>	78
Figura 36: Curva carga <i>versus</i> deslocamento dos dormentes nos níveis de carga estabelecidos – <i>center bound</i>	79
Figura 37: Evolução das fissuras pela face lateral nos níveis de carga (kN) estabelecidos – a) D4 b) D5 c) D6	80
Figura 38: Evolução das fissuras na face superior para os níveis de carga– a) D4 b) D5 c) D6	80
Figura 39: Curva carga <i>versus</i> deslocamento - Dormentes de caracterização apoio do trilho .	81
Figura 40: Áreas de interesse para mapa de fissuração no apoio do trilho	82
Figura 41: Mapa de fissuração dos dormentes até ruptura apoio do trilho – a) D1 b) D2 c) D3	82
Figura 42: Monitoramento da abertura da primeira fissura apoio do trilho	84
Figura 43: Curva carga <i>versus</i> deslocamento dos dormentes nos níveis de carga estabelecidos – apoio do trilho.....	84
Figura 44: Evolução das fissuras pelo apoio do trilho – a) D4 b) D5 c) D6	85
Figura 45: Monitoramento da expansão em corpos de prova.....	86
Figura 46: Expansão média medida diretamente nos dormentes em função da face monitorada, da posição e da direção de leitura.	87
Figura 47: Resistência a compressão, tração e módulos de elasticidade do concreto	88
Figura 48: Resultados SDT para os níveis atingidos – a) Íntegro; b) 0,05% c) 0,12%	89
Figura 49: Resultado do número de DRI.....	89
Figura 50: Inspeção visual dormentes: a)0,05%; b)0,12%	90
Figura 51: MEV com EDS de gel de reação álcali sílica	91
Figura 52: Mapeamento químico por área no EDS	92
Figura 53: Nível de fissura no agregado - a) íntegro; b)0,05%; c) 0,12%.....	93

Figura 54: MAC - Dados de <i>Center Bound</i> – a) Modo 1; b) Modo 2; c) Modo 3	94
Figura 55: MAC - Dados de Apoio do trilho – a) Modo 1; b) Modo 2; c) Modo 3	95
Figura 56: MAC - Dados de expansão– a) Modo 1; b) Modo 2; c) Modo 3	96
Figura 57: Variação percentual da frequência do primeiro modo de vibração em relação ao estado íntegro para os três mecanismos de dano - a) <i>Center bound</i> ; b) Apoio do trilho; c) Expansão.....	107
Figura 58: Razão de amortecimento normalizada em relação ao estado íntegro para os três mecanismos de dano - a) <i>Center bound</i> ; b) Apoio do trilho; c) Expansão.....	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Índices físicos dos agregados miúdos e graúdos	54
Tabela 2: Resultados de perda ao fogo (LOI) e Fluorescência de raio x do cimento.....	55
Tabela 3: Quantidade de materiais do traço	57
Tabela 4: Quantidade de corpo de prova cilíndrico 10 cm x 20 cm por ensaio	64
Tabela 5: Variação percentual das propriedades mecânicas em função da expansão do concreto	88
Tabela 6: Área de fissura nos dormentes.....	91
Tabela 7: Resultados de análise modal por <i>center bound</i> em cada nível de dano.....	98
Tabela 8: Resultados de análise modal por fissura no apoio do trilho em cada nível de dano	100
Tabela 9: Resultados de análise modal por reação expansiva em cada nível de expansão	102
Tabela 10: Efeito do tipo de dano sobre a frequência e agrupamento pelo teste de Duncan .	110
Tabela 11: Efeito do tipo de dano sobre o amortecimento e agrupamento pelo teste de Duncan	111

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Ensaios de caracterização e normas técnicas.....	61
Quadro 2: Tipos de danos considerados para o DRI e seus fatores de peso para ponderação do dano	62

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASD – Soma das Diferenças de Aceleração (Acceleration Summation Difference)

ASTM – Sociedade Americana de Ensaio e Materiais (American Society for Testing and Materials)

DEF – Formação de Etringita Tardia (Delayed Ettringite Formation)

DRI – Índice de Dano (Damage Rating Index)

EDS – Espectroscopia por Energia Dispersiva (Energy Dispersive Spectroscopy)

EFDD – Decomposição Aprimorada no Domínio da Frequência (Enhanced Frequency Domain Decomposition)

END – Ensaio Não Destrutivo

FDD – Decomposição no Domínio da Frequência (Frequency Domain Decomposition)

FEA – Análise por Elementos Finitos (Finite Element Analysis)

FRA – Administração Federal Ferroviária (Federal Railroad Administration)

FRF – Função Resposta em Frequência (Frequency Response Function)

LOI – Perda ao fogo

LVDT – Transdutor de Deslocamento Variável Linear (Linear Variable Differential Transformer)

MCD – Diferença de Curvatura Modal (Modal Curvature Difference)

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

RAA – Reação Álcali-Agregado

RAC – Reação Álcali-Carbonato

RAS – Reação Álcali-Sílica

RC – Resistência à compressão

RT – Resistência à tração por compressão diametral

SDT – Ensaio de Dano por Rigidez (Stiffness Damage Test)

°C – Graus Celsius

cm – Centímetro

g – Grama

Hz – Hertz

kN – Quilonewton

kg – Quilograma

kg/m³ – Quilograma por metro cúbico

m – Metro

mm – Milímetro

mV/g – Milivolt por aceleração da gravidade

MPa – Megapascal

N – Newton

s – Segundo

% – Percentual

± – Mais ou menos

E – Módulo de elasticidade [GPa]

f_n – Frequência natural [Hz]

f_s – Frequência de amostragem [Hz]

Pi – Carga inicial total de protensão [kN]

QrupAP – Carga média de ruptura no ensaio de apoio do trilho [kN]

QrupCB – Carga média de ruptura no ensaio de center bound [kN]

ξ – Coeficiente de amortecimento

k – Rigidez [N/m]

m – Massa [kg]

E – Módulo de elasticidade [GPa]

σ – Tensão [MPa]

ε – Deformação adimensional

g – Aceleração da gravidade [9,81 m/s²]

Al₂O₃ – Óxido de alumínio

CaCO₃ – Calcita (carbonato de cálcio)

CaO – Óxido de cálcio

CaSO₄ – Sulfato de cálcio

C₃A – 3CaO·Al₂O₃ (aluminato tricálcico)

C₃S – 3CaO·SiO₂ (silicato tricálcico)

C₂S – 2CaO·SiO₂ (silicato dicálcico)

C₄AF – 4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃ (ferro aluminato tetracálcico)

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

CO₂ – Dióxido de carbono

H₂O – Água

Mg(OH)₂ – Brucita (hidróxido de magnésio)

Na₂CO₃ – Carbonato de sódio

NaOH – Soda cáustica (hidróxido de sódio)

Si – Sílica

SiO₂ – Óxido de silício

SO₃ – Trióxido de enxofre

SO₄²⁻ – Íon sulfato

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	JUSTIFICATIVA.....	19
1.2	OBJETIVOS.....	21
1.2.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	<i>21</i>
1.2.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>21</i>
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1	DORMENTES FERROVIÁRIOS DE CONCRETO PROTENDIDO	23
2.2	DANOS EM DORMENTES DE CONCRETO PROTENDIDO	24
2.2.1	<i>Fissuras no meio do vão.....</i>	<i>26</i>
2.2.2	<i>Fissuras no assento do trilho</i>	<i>28</i>
2.2.3	<i>Fissuras por reação expansiva</i>	<i>29</i>
2.3	ANÁLISE MODAL	34
2.3.1	<i>Propriedades modais.....</i>	<i>36</i>
2.4	ANÁLISE MODAL EM DORMENTES.....	40
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	49
3.1	INDUÇÃO DE DANOS	51
3.1.1	<i>Fissuras centrais por center bound:</i>	<i>51</i>
3.1.2	<i>Fissuras no assento do trilho por alta carga de impacto:</i>	<i>52</i>
3.1.3	<i>Fissuras por degradação química expansiva (RAA):</i>	<i>54</i>
3.2	ENSAIOS DE ANÁLISE MODAL.....	64
3.2.1	<i>Configuração experimental.....</i>	<i>65</i>
3.2.2	<i>Pontos de excitação e medição:</i>	<i>65</i>
3.2.3	<i>Processamento dos sinais e identificação das propriedades dinâmicas.....</i>	<i>68</i>
3.2.4	<i>Análise estatística dos parâmetros modais</i>	<i>74</i>
4	RESULTADOS.....	75
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS DANOS INDUZIDOS	75
4.1.1	<i>Center Bound.....</i>	<i>75</i>
4.1.2	<i>Fissuração no apoio do trilho.....</i>	<i>81</i>

4.1.3	<i>Fissuração por reação expansiva interna.....</i>	85
4.2	PARÂMETROS MODAIS	93
5	DISCUSSÃO	103
5.1	IMPACTO DA INDUÇÃO DE TRÊS TIPOS DISTINTOS DE DANOS EM DORMENTES.....	103
5.1.1	<i>Fissuras centrais por center bound.....</i>	103
5.1.2	<i>Fissuras no assento do trilho</i>	103
5.1.3	<i>Fissuração por reação expansiva interna.....</i>	104
5.2	INFLUÊNCIA DOS PADRÕES DE DANO NOS PARÂMETOS MODAIS EM DORMENTES.....	106
5.3	CONTRIBUIÇÃO PARA A VALIDAÇÃO DA ANÁLISE MODAL COMO FERRAMENTA DE DIAGNÓSTICO NÃO DESTRUTIVO.....	112
5.4	LIMITAÇÕES DA INTERPRETAÇÃO E IMPLICAÇÕES PARA O MONITORAMENTO	112
6	CONCLUSÕES	114
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116
	APÊNDICE A – DEFINIÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DE ENSAIO DE ANÁLISE MODAL EM DORMENTES.....	126
	APÊNDICE B – ANÁLISE ESTATÍSTICA	129

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o setor ferroviário desempenha papel estratégico na matriz logística nacional, especialmente no transporte de cargas. Em 2022, esse modal representou cerca de 20% da movimentação de cargas no país, com projeção de crescimento para mais de 40% até 2035, conforme o Plano Nacional de Logística (PNL 2035), em função da busca por maior eficiência, segurança e sustentabilidade no transporte de cargas e passageiros (Brasil, 2024). Esse cenário amplia a demanda por infraestrutura ferroviária e, conseqüentemente, por dormentes, elementos responsáveis por manter a bitola da via e transferir ao lastro os esforços e vibrações gerados pela passagem dos trens.

Os dormentes podem ser produzidos em madeira, aço, polímeros e concreto; contudo, os dormentes de concreto protendido têm se destacado pela maior durabilidade, estabilidade da via, resistência aos carregamentos repetitivos e capacidade de preservação da geometria ferroviária. Por essas características, seu uso tem se consolidado em metrô e na substituição progressiva dos dormentes de madeira em ferrovias de carga (Lima, 2022). Esse crescimento deve ser reforçado pelo Programa de Autorizações Ferroviárias (Pro Trilhos), regulamentado pela Lei Federal nº 14.273/2021, que, até outubro de 2022, já registrava 76 requerimentos para novos projetos ferroviários, totalizando cerca de 19 mil quilômetros de trilhos e demanda estimada de aproximadamente 32 milhões de dormentes (AEC, 2022).

Apesar dessas vantagens, os dormentes de concreto protendido podem ter sua integridade comprometida por reações deletérias internas, fadiga mecânica e impactos ambientais, afetando a segurança e a vida útil da via permanente. Li, You e Kaewunruen (2022) classificaram danos críticos nesses elementos a partir de um levantamento internacional, atribuindo maiores índices de severidade ao *center bound* (5,36), às fissuras no assento do trilho (3,15) e às fissuras internas associadas a reações químicas no concreto (4,67), em uma escala máxima de 8,00 pontos. Esses resultados indicam que a deterioração dos dormentes não se restringe a danos mecânicos ou superficiais, mas também envolve processos internos capazes de comprometer progressivamente o desempenho do concreto.

Entre esses processos, destacam-se as reações expansivas internas, como a reação álcali-agregado (RAA) e a formação tardia de etringita (DEF). No Brasil, manifestações associadas a reações expansivas já foram relatadas em diferentes tipos de estruturas de concreto, incluindo blocos de fundação, usinas hidrelétricas, e dormentes de concreto (Andrade *et al.*, 2006; Silva,

2007; Hasparyk; Kuperman; Torres, 2012; Torres; Andrade, 2016; Costa *et al.*, 2025). A ocorrência desses mecanismos reforça a necessidade de métodos capazes de identificar a deterioração interna antes que os danos se tornem evidentes ou comprometam a segurança do sistema ferroviário.

Nesse contexto, além de se apresentar como uma técnica de caráter não destrutivo, a análise modal permite determinar parâmetros como frequências naturais, modos de vibração e amortecimento, os quais são sensíveis a alterações de rigidez devido a fissuração. Dessa forma, a avaliação de dormentes de concreto protendido por meio da técnica de análise modal pode contribuir para a identificação objetiva de diferentes níveis de dano, fornecendo uma base experimental para decisões mais precisas de manutenção, substituição e gestão da vida útil desses elementos.

1.1 JUSTIFICATIVA

A avaliação da integridade de dormentes de concreto protendido em vias ferroviárias apresenta limitações técnicas e operacionais. Em condições de serviço, a interrupção da via para inspeções detalhadas, extração de amostras ou aplicação de ensaios laboratoriais avançados implica restrições logísticas, aumento de custos e interferência na operação ferroviária (Lidén, 2015). Por esse motivo, a avaliação desses elementos ainda é predominantemente baseada em inspeções visuais, realizadas por inspetores que percorrem os trilhos a pé.

Embora amplamente empregada, a inspeção visual apresenta baixa sensibilidade à detecção de danos internos ou estágios iniciais de desenvolvimento e depende diretamente da experiência e da interpretação do inspetor. Além disso, a própria configuração da via limita a observação do dormente, uma vez que o lastro encobre parte significativa de sua superfície e pode ocultar sinais iniciais de deterioração (Jing *et al.*, 2021).

Essas limitações são agravadas pela própria configuração estrutural dos dormentes de concreto protendido. A protensão aumenta a rigidez do elemento e pode manter fissuras parcialmente fechadas, reduzindo a evidência visual dos estágios iniciais de dano (Li; You; Kaewunruen, 2022b). Assim, quando os sinais externos são suficientes para justificar uma investigação mais detalhada, a deterioração pode já estar associada à perda de rigidez e à redução da capacidade de serviço.

Como consequência, a avaliação baseada predominantemente em manifestações superficiais pode levar tanto ao diagnóstico tardio de danos quanto à substituição prematura de

dormentes que ainda apresentam condições mecânicas suficientes para permanecer em serviço. Essa condição contribui para a manutenção excessiva da via e para o aumento dos custos associados à substituição desses elementos antes do esgotamento de sua vida útil projetada. (Kaewunruen; Remennikov, 2009; Silva; Gonçalves; Pipa, 2008; Dias; Serra; Lima, 2021).

Dessa forma, a detecção precoce de dormentes defeituosos torna-se necessária para subsidiar estratégias de monitoramento e manutenção preventiva, especialmente diante do crescimento da demanda por infraestrutura ferroviária e da necessidade de avaliar continuamente a condição desses elementos em via. Nesse contexto, métodos mais sensíveis e objetivos são necessários para complementar a inspeção visual e caracterizar danos antes que a deterioração seja identificada apenas por manifestações superficiais.

A análise modal experimental apresenta-se como uma técnica não destrutiva capaz de detectar alterações nas propriedades dinâmicas dos dormentes, como frequências naturais, modos de vibração e amortecimento. Esses parâmetros são influenciados por modificações na rigidez, na fissuração e na integridade estrutural do elemento, o que permite associar a resposta dinâmica à condição de dano do dormente. Em estruturas de concreto, métodos baseados em vibração têm sido aplicados para identificar fissuração e perda de rigidez por meio das alterações na resposta dinâmica. Em dormentes de concreto, essa abordagem também tem apresentado resultados consistentes, indicando potencial para avaliar a integridade estrutural e diferenciar condições de dano (Kaewunruen; Remennikov, 2009; Janeliukstis *et al.*, 2019; Choi *et al.*, 2023, 2024).

Apesar desses avanços, o conhecimento atual ainda não permite distinguir de forma clara como diferentes tipos de dano afetam especificamente as propriedades modais de dormentes de concreto protendido. Essa limitação restringe o uso da análise modal como ferramenta diagnóstica em campo, uma vez que alterações identificadas nos ensaios dinâmicos nem sempre podem ser diretamente associadas à origem, ao tipo ou à extensão do dano.

Por esse motivo, este estudo visa contribuir para o aprimoramento das técnicas de diagnóstico de integridade estrutural, fornecendo subsídios para a implementação de metodologias de monitoramento mais eficazes. Nesse contexto, a análise modal aplicada em conjunto com a inspeção visual pode representar um avanço significativo na gestão e manutenção de ferrovias, garantindo maior segurança, eficiência e longevidade para os dormentes em operação.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 *Objetivo Geral*

Analisar as alterações dinâmicas de dormentes de concreto protendido em função da presença de diferentes tipos de danos.

1.2.2 *Objetivos específicos*

- Avaliar o impacto da indução de três tipos distintos de danos em dormentes:
 - a. Fissuras por centrais por *center bound* (apoio deficiente);
 - b. Fissuras no assento do trilho por carga de impacto localizada;
 - c. Fissuração por mecanismos de reação expansiva interna.
- Avaliar a influência dos padrões de dano induzidos nas propriedades modais dos dormentes;
- Contribuir para a validação da análise modal como ferramenta de diagnóstico não destrutivo aplicável à monitoramento estrutural de dormentes ferroviários.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 1, apresenta a introdução com justificativa do tema a ser pesquisado, os objetivos gerais e específicos além da estrutura da dissertação.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre dormentes ferroviários de concreto protendido, mecanismos de dano e fundamentos da análise modal experimental.

O Capítulo 3 descreve o programa experimental, incluindo a indução dos danos, a caracterização do concreto, o monitoramento da expansão e os procedimentos de análise modal.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos, contemplando a caracterização dos danos induzidos e os parâmetros modais identificados experimentalmente.

O Capítulo 5 discute os resultados em função dos objetivos específicos, relacionando os padrões de danos às alterações nas frequências naturais e nas razões de amortecimento.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões do estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos necessários para a avaliação de danos em dormentes de concreto protendido por meio da análise modal experimental. Inicialmente, são abordadas as principais características desses elementos, suas funções na superestrutura ferroviária e sua importância para a estabilidade e o desempenho da via. Em seguida, são discutidos os principais tipos de danos observados em dormentes de concreto protendido, incluindo fissuras centrais associadas ao apoio deficiente, fissuras na região do assento do trilho e fissuração decorrente de reações expansivas internas. Na sequência, são apresentados os conceitos fundamentais da análise modal, com ênfase nas frequências naturais, nos modos de vibração e no amortecimento. Por fim, são revisados estudos que aplicaram métodos baseados em vibração à avaliação de dormentes de concreto, destacando o potencial da análise modal para identificar alterações na rigidez e na integridade estrutural desses elementos.

2.1 DORMENTES FERROVIÁRIOS DE CONCRETO PROTENDIDO

As malhas ferroviárias representam um dos principais modais de transporte, tanto para o deslocamento de pessoas quanto para o transporte de cargas. Sua estrutura inclui elementos da superestrutura denominados dormentes ferroviários, cujas funções principais são receber e transmitir os esforços gerados pelos veículos ao lastro, fornecer suporte ao trilho permitindo sua fixação e garantir a manutenção da bitola da via ao longo da vida útil da infraestrutura (Liu *et al.*, 2021).

Estima-se que aproximadamente 20 milhões de dormentes sejam instalados anualmente no mundo (Jing *et al.*, 2021). Esses elementos podem ser fabricados em aço, madeira, concreto ou materiais poliméricos, sendo que cada material apresenta vantagens e limitações relacionadas à instalação, manutenção e desempenho em serviço. O uso crescente de dormentes de concreto é justificado pela ampla disponibilidade de matéria-prima, elevada resistência mecânica, maior peso próprio, que contribui para a estabilidade da via, e vida útil estimada em cerca de 30 anos (Li; You; Kaewunruen, 2022a). Ademais, quando associado a técnicas adicionais de reforço, o concreto pode proporcionar maior durabilidade ao elemento sob diferentes condições operacionais (Janeliukstis *et al.*, 2019).

Os primeiros dormentes de concreto foram concebidos em concreto armado. Entretanto, a experiência em campo demonstrou que esse sistema não apresentava desempenho satisfatório para resistir às solicitações impostas pela operação ferroviária, especialmente sob carregamentos repetidos. Com o desenvolvimento da tecnologia do concreto protendido, tornou-se possível produzir dormentes com maior capacidade resistente e melhor desempenho estrutural. O primeiro projeto de dormente de concreto protendido data de 1884 e é atribuído ao francês Joseph Monier (Bastos, 1999).

Em condições ideais, nas quais tanto os componentes da superestrutura ferroviária quanto o material rodante se encontram isentos de falhas, o contato entre roda e trilho ocorre de maneira uniforme e sem irregularidades significativas. Nessa situação, os carregamentos podem ser representados por uma análise estática equivalente, assumindo que as variações temporais e os efeitos inerciais são suficientemente pequenos para serem desprezados em determinadas abordagens analíticas (El Moueddeb *et al.*, 2022). Entretanto, em condições reais de operação, defeitos e descontinuidades presentes na via modificam esse comportamento idealizado e introduzem ações dinâmicas no sistema ferroviário. Essas ações geram vibrações que, além de amplificar os esforços estruturais, podem acelerar processos de degradação e fadiga nos materiais constituintes da via (Kaewunruen *et al.*, 2019).

Dessa forma, embora os dormentes de concreto protendido sejam projetados para apresentar elevada capacidade resistente e durabilidade em serviço, esses elementos podem desenvolver diferentes tipos de defeitos ao longo de sua vida útil, resultantes tanto de etapas de fabricação quanto das condições operacionais e ambientais às quais estão submetidos. Nesse contexto, torna-se necessário compreender os principais mecanismos de deterioração associados a esses elementos estruturais.

2.2 DANOS EM DORMENTES DE CONCRETO PROTENDIDO

As falhas em dormentes de concreto já estiveram associadas a acidentes ferroviários de grande escala, com impactos financeiros expressivos e riscos à segurança dos usuários do transporte ferroviário. Dados da *Federal Railroad Administration* (FRA), sobre acidentes ocorridos entre 2004 e 2013 nos Estados Unidos indicaram que, nesse período, houve pelo menos 15 acidentes ferroviários graves relacionados a falhas em dormentes de concreto ou seus sistemas de fixação (Bastos, 2016).

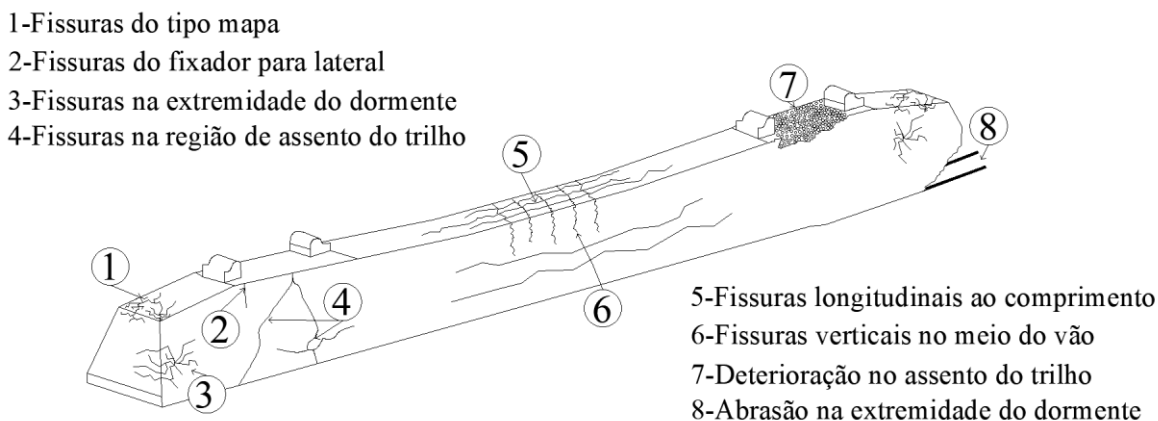
Ao longo da vida útil em serviço, a durabilidade e o desempenho dos dormentes de concreto protendido são influenciados pelo tempo de exposição e pelas condições ambientais, uma vez que a capacidade resistente do elemento pode ser progressivamente reduzida em meios agressivos. Nesse contexto, Li *et al.* (2022) investigaram a redução das cargas iniciais de fissuração ao longo de 40 anos de uso dos dormentes e constataram uma perda de aproximadamente 60% em comparação com um dormente novo.

Nesse mesmo contexto, Farnam e Rezaie (2019) demonstraram, por meio de análises experimentais e numéricas baseadas na mecânica da fratura, que o aumento da fissuração em dormentes de concreto protendido está associado à redução da carga última e da energia de fratura, evidenciando a perda de capacidade de carga do elemento. Em relação a distribuição e desenvolvimento desses danos, Jokūbaitis, Valivonis e Marčiukaitis (2016) observaram que os mecanismos de deterioração tendem a ocorrer com maior intensidade nas extremidades do dormente, especialmente na região de assento do trilho e na zona de ancoragem, comportamento que os autores associaram à retração da armadura durante a liberação da protensão e aos danos induzidos na interface entre o aço e o concreto.

Os principais danos observados em dormentes de concreto protendido podem ser divididos em dois grupos principais: danos intrínsecos, associados a deficiências internas do concreto, e danos extrínsecos, relacionados às solicitações impostas pela operação ferroviária e à ação de ciclos de gelo e degelo (Lima, 2022). Embora essa classificação seja útil para fins de análise, a maioria das falhas não se desenvolvem de forma isolada. Em serviço, os dormentes podem ser afetados por mais de um tipo de dano, e esses processos frequentemente estão relacionados entre si, em muitos casos, por meio da fissuração. Fissuras originadas durante o processo de fabricação, por exemplo, podem tornar o elemento mais suscetível à degradação química. Em contrapartida, processos de degradação química podem reduzir a integridade do concreto e favorecer o surgimento ou a propagação de fissuras por cargas dinâmicas (Safiuddin *et al.*, 2018).

Na Figura 1 estão ilustrados os principais tipos de danos que ocorrem em dormentes de concreto protendido.

Figura 1: Principais tipos de danos em dormentes de concreto protendido



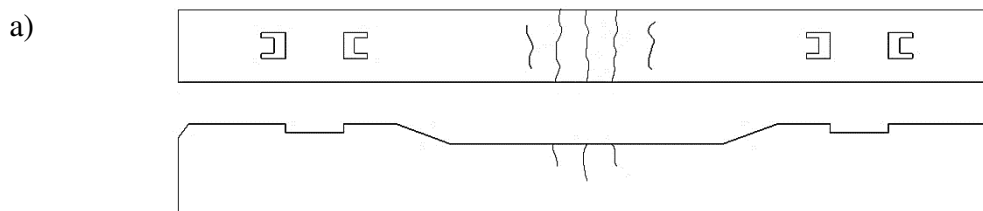
Fonte: Adaptado de Taherinezhad *et al.* (2013).

A fissuração no meio do vão e no assento do trilho, fissuras longitudinais e fissuração do tipo mapa representam parcela significativa dos defeitos observados nesses elementos (Bastos, 2016). Tais danos afetam diretamente o desempenho estrutural dos dormentes, uma vez que reduzem a continuidade do material, intensificam a concentração de tensões e favorecem a progressão do dano sob carregamento.

2.2.1 Fissuras no meio do vão

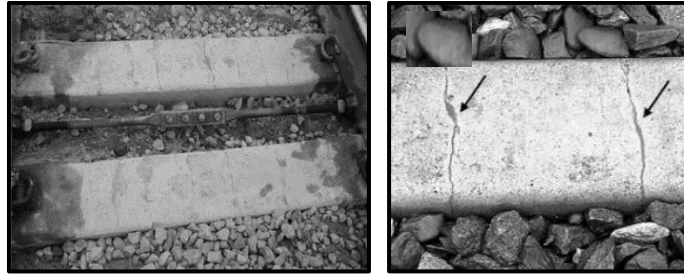
Os dormentes de concreto protendido possuem duas regiões críticas: o meio do vão e o assento do trilho. Na seção central, fissuras transversais podem surgir na parte superior do dormente, ilustradas na Figura 2, sendo recorrentes devido aos elevados momentos fletores negativos (You *et al.*, 2022). Em linhas ferroviárias, esse fenômeno é conhecido como *center bound* (Clark *et al.*, 2017).

Figura 2: Padrão de fissuração - *center bound*



Fonte: Autora (2026)

b)

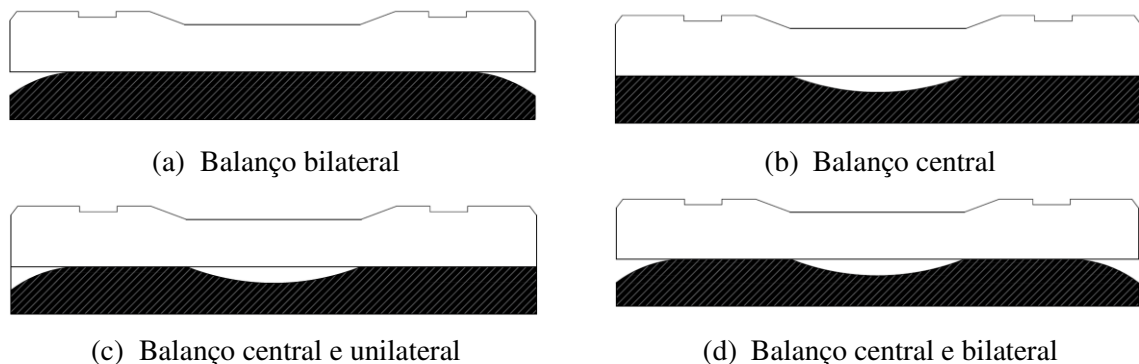


Fonte: Taherinezhad *et al.* (2013); You *et al.* (2022)

O principal fator associado a essas fissuras é o apoio inadequado dos dormentes sobre o lastro ferroviário (Chen *et al.*, 2014), o que, aliado às irregularidades geométricas da via, gera cargas dinâmicas significativas. Dessa forma, as condições de apoio do dormente no lastro são fatores determinante na distribuição de tensões no elemento. A degradação do lastro, causada por compactação insuficiente, vazios ou manutenção deficiente, pode agravar esse quadro, aumentando os momentos fletores e a concentração de tensões no centro dos dormentes (Montalbán Domingo *et al.*, 2014).

Seguindo essa premissa, (Li *et al.*, 2022) abordam a variação dessas condições de contato, destacando que apesar da distribuição uniforme do lastro, podem ocorrer, em via, vazios de apoio que causam concentração de tensões no centro ou na extremidade do dormente, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3: Diferentes condições de apoio de dormentes



Fonte: Adaptado de Li *et al.* (2022).

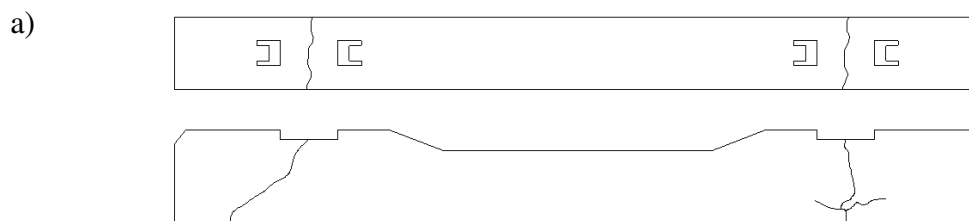
Bastos (2016) estudou diferentes condições de apoio para dormentes de concreto, simulando 6 distintas distribuições de lastro sob dormente a fim de quantificar a influência das condições de apoio na sua deflexão. Como resultado, os momentos fletores no centro do

dormente são mais sensíveis à distribuição do lastro do que a região de apoio do trilho. Hamarat *et al.* (2020) investigaram numericamente três casos diferentes de suporte, comprovando a influência da falta de suporte na flexão do dormente. Além disso, concluiu que a má distribuição e ausência do lastro reduz o amortecimento vibracional dos dormentes e consequentemente, ampliam-se as deflexões do sistema.

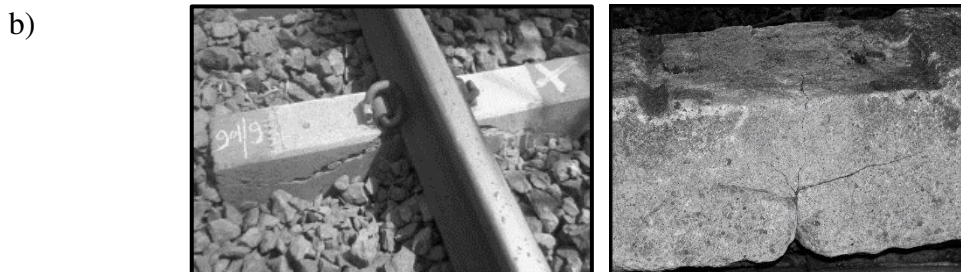
2.2.2 Fissuras no assento do trilho

O aparecimento de fissuras verticais (perpendicular ao comprimento do dormente) na região de apoio dos trilhos é uma das principais falhas associadas à redução de desempenho dos dormentes de concreto protendido. Essas fissuras, em geral, surgem na parte inferior do dormente e se propagam em direção aos trilhos (Taherinezhad *et al.*, 2013), conforme Figura 4.

Figura 4: Padrão de fissuração - apoio do trilho



Fonte: Autora (2026)



Fonte: Awasthi *et al.*(2017); Zeman (2010)

As fissuras ilustradas caracterizam sob o assento do trilho estão associadas a um mecanismo combinado de flexão e cortante no dormente. Nessa região, a carga concentrada aplicada pelo trilho induz simultaneamente momento fletor e força cortante, enquanto as ações dinâmicas amplificam esse estado de tensões. Em uma revisão realizada por Taherinezhad *et al.* (2013), os autores relatam que a fissuração no assento do trilho pode ocorrer em modos de flexão, flexão-cortante e cortante. Por isso, a fissura tende a se propagar em trajetória inclinada, e não puramente transversal.

Em geral, o dano aparente nessa localidade é o resultado de uma combinação de trilhos rígidos e cargas de impacto (Kaewunruen; Remennikov, 2010). Essas cargas de caráter dinâmico são originadas pela passagem de trens sobre linhas férreas com defeitos, presentes tanto na superestrutura da via permanente quanto nas rodas do veículo (Xe; Wang; Mindess, 1994). Além de defeitos superficiais nos trilhos, como ondulações e descamações, a presença de talas de junção de trilho e regiões com falhas de solda contribui para o aumento da intensidade dessas cargas (Alves, 2000).

Enquanto as cargas estáticas do sistema podem variar de 50 kN a 350 kN, as cargas de impacto variam entre 100 kN e 750 kN, dependendo das causas e da velocidade do trem (Kaewunruen; Remennikov, 2008a). Dessa forma, quanto maior o nível de dano nas ferrovias e em seu material rodante, maiores serão as cargas de impacto sobre a via e os riscos de defeitos precoces em seus componentes.

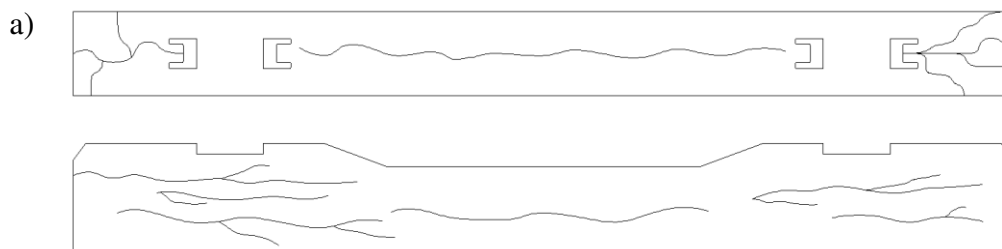
Montalbán Domingo *et al.* (2014) avaliaram a influência da presença de fissuras no desempenho da superestrutura ferroviária através de modelagem computacional de 3 diferentes condições de dormentes: não fissurado, fissurado na região central e fissurado na seção de apoio do trilho. Como resultado, não houve perda significativa de desempenho em dormentes com fissuras na seção central, em contrapartida, foi estimada uma redução de até 5% de rigidez em dormentes com fissuração na seção de apoio dos trilhos.

Para atenuação do surgimento dessas fissuras, foram desenvolvidos mecanismos de identificação precoce de rodas defeituosas capazes de gerar altas cargas de impacto na via (Kaewunruen; Remennikov, 2007). Outra forma de minimizar esses defeitos é por meio da utilização de palmilhas específicas de alta resistência que amortecem o impacto das cargas dinâmicas (Sadeghi, 2010).

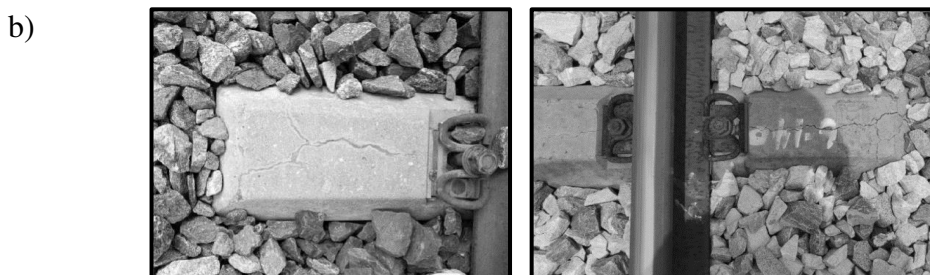
2.2.3 Fissuras por reação expansiva

A fissuração por degradação química dos dormentes de concreto está interligada em grande parte pela presença de reação expansiva do material, como por exemplo: Reação Álcali-Sílica ou Formação de Etringita Tardia. Ambas reações resultam em uma propagação de fissuras multidirecional, chamada de “padrão mapeada”, principalmente nas extremidades dos dormentes, enquanto na região central, a fissura é predominantemente longitudinal devido a restrição da protensão, como ilustrado na Figura 5.

Figura 5: Padrão de fissuração - degradação química



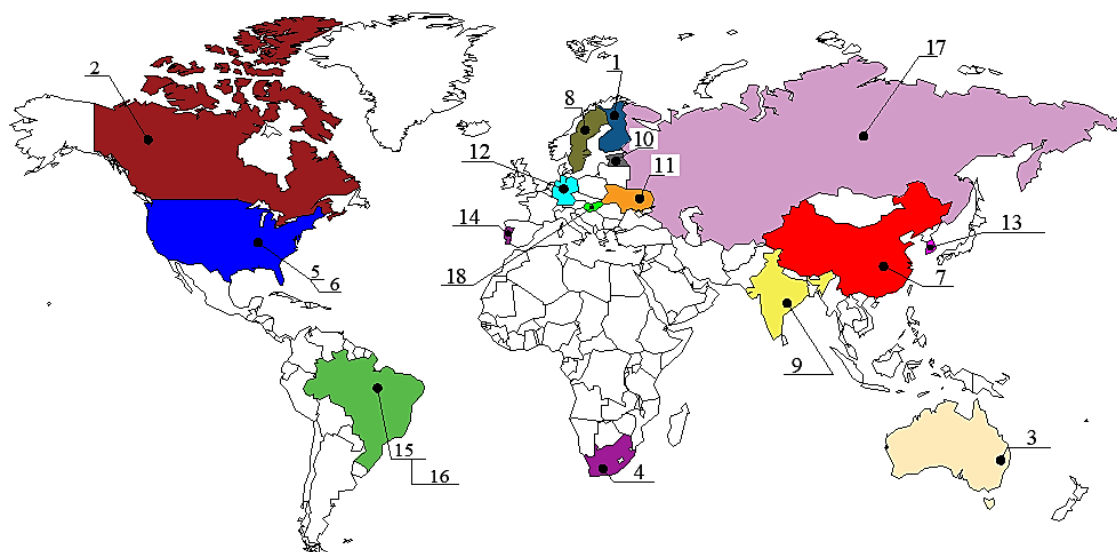
Fonte: Autora (2026)



Fonte: You *et al.* 2022

A ocorrência desses tipos de reações em dormentes de concreto protendido tem sido documentada em estudos de caso no mundo, conforme Figura 6, com a identificação de fissuras associadas a esses mecanismos de degradação. A variação na taxa de deterioração observada entre os diferentes casos está diretamente relacionada à dependência de cada reação expansiva às condições intrínsecas do material e aos fatores ambientais específicos que governam sua progressão.

Figura 6: Países com casos de dormentes de concreto afetados por reações expansivas



- | | |
|---|---|
| 1- Tepponen e Eriksson (1987)– Finlândia; | 10 - Jokūbaitis; Marčiukaitis e Valivonis (2019)– Lituânia; |
| 2 – Rogers e Tharmabala (1990)– Canadá; | 11 – Plugin <i>et al.</i> (2021)– Ucrânia; |
| 3 – Shayan e Quick (1992)– Austrália; | 12 –Jenkins (2022)– Alemanha; |
| 4 – Oberholster; Maree e Brand (1992)– África do sul; | 13 - Jeon <i>et al.</i> (2022)– Coreia do Sul; |
| 5 – Mielenz <i>et al.</i> (1995) – Estados Unidos; | 14- Silva; Gonçalves; Pipa e (2008) – Portugal; |
| 6 – Hime (1996)– Estados Unidos; | 15 – Ferreira <i>et al.</i> (2023)– Brasil; |
| 7 – Qinhua; Weiqing e Liang (1997) – China; | 16 – Medeiros; Sanchez e Dos Santos (2024)– Brasil; |
| 8 – Sahu e Thaulow (2004)– Suécia; | 17 – Troyan e Sova (2019)– Rússia; |
| 9 – Awasthi <i>et al.</i> (2017)– Índia; | 18 – Lubej <i>et al.</i> (2023) – Eslovênia; |

Fonte: Autora (2026)

A reação álcali agregado (RAA) é uma reação química entre hidróxidos alcalinos da solução de poros do concreto e fases minerais específicas constituintes dos agregados. A RAA é definida em dois tipos específicos, reação álcali-sílica (RAS) e álcali-carbonato (RAC), sendo a primeira mais frequente (Sims; Poole, 2017; Thomas, 2011).

A RAS é uma reação química que ocorre entre fases minerais silicosas instáveis nos agregados, sejam eles grãos ou miúdos, e os hidróxidos alcalinos presentes na solução dos poros do concreto. Nos estágios iniciais, o pH elevado ioniza a sílica reativa, quebrando os grupos silanol. Em seguida, os íons hidroxila atacam e rompem as ligações siloxana. Os álcalis estabilizam esses componentes ionizados, levando à formação de um gel com capacidade de absorver água e gerar pressões internas no concreto (Leemann *et al.*, 2024; Rajabipour *et al.*, 2015). Descobertas recentes indicam que o acúmulo de pressão associado à expansão da RAS

está principalmente ligado à precipitação de produtos de reação com carga negativa nos poros confinados do agregado, em vez da capacidade de absorção de água do gel. À medida que esses produtos da RAS se acumulam, forças eletrostáticas repulsivas se desenvolvem entre os sólidos de reação com carga negativa e as superfícies de silicato circundantes. Essa interação gera uma pressão de solidificação que pode atingir valores entre 6 e 13 MPa, o que é suficiente para forçar a separação das paredes do agregado e iniciar microfissuras, mesmo na ausência de gradientes de umidade significativos ou inchaço do gel (Sanchez *et al.*, 2015).

Já a reação álcali-carbonato (RAC), é um mecanismo de reação de expansão interno de desdolomitização, que leva à formação de calcita e brucita, padrões de fissuração diferentes da RAS e ausência de produtos secundários (Sanchez *et al.*, 2015). Além disso, mecanismos relacionados à desdolomitização foram identificados como a causa de deterioração estrutural significativa, impactando tanto a integridade quanto a funcionalidade geral, enquanto nenhum produto secundário foi identificado (Tang; Deng, 2004; Thomas; Fournier; Folliard, 2013).

O primeiro caso documentado no Canadá de deterioração por reação expansiva em dormentes de concreto foi relatado por Rogers e Tharmabala (1990). Entre 1985 e 1987, companhias ferroviárias canadenses identificaram falhas prematuras em dormentes de concreto protendido, manifestadas por fissuras longitudinais e perda de integridade estrutural. A investigação técnica revelou a ocorrência de reação álcali-sílica (RAS), confirmada pela presença de gel nas fissuras e por análises petrográficas que identificaram sílica amorfa nos agregados utilizados. Os dormentes afetados haviam sido fabricados com cimento de alto teor de álcalis, o que contribuiu para a ativação da reação. Como resposta, adotou-se a exigência do uso de cimento com baixo teor de álcalis na fabricação de novos dormentes, marcando uma mudança importante nas especificações técnicas adotadas pelas operadoras ferroviárias da região.

Shayan e Quick (1992) investigaram o aparecimento de fissuras longitudinais na face superior e fissuras mapeadas nas extremidades de dormentes de concreto protendido, examinando elementos com e sem a presença dessa manifestação na Austrália. Eles concluíram que a reação álcali-agregado era responsável por esses danos nos dormentes. No mesmo ano, o surgimento de fissuras longitudinais em dormentes com 12 anos de uso, alertaram ferrovias da África do Sul. Nesse caso, estudos com dormentes atingidos revelaram a presença de agregado granítico reativo (Oberholster; Maree; Brand, 1992). Um estudo conduzido por Troyan e Sova (2019) investigou a deterioração prematura de dormentes de concreto armado em ferrovias

russas. A análise indicou que a interação entre os álcalis presentes no cimento e agregados potencialmente reativos pode ter contribuído para o surgimento de fissuras internas nos dormentes, comprometendo sua durabilidade. Os autores apontam evidências visuais de danos internos que sugerem a presença de processos químicos expansivos. Além disso, destacam que correntes de fuga elétricas provenientes do sistema ferroviário podem ter acelerado a degradação do concreto.

Na China, Qinhu, Weiqing e Liang (1997) estudaram dormentes de concreto afetados pela reação álcali-sílica em Xangai através de técnicas como Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia por energia dispersiva (EDS). Nesse estudo foi comprovada a presença de sílica potencialmente reativa no dormente de concreto, o que ocasionou a fissuração. Na Ucrânia, sinais de reação álcali-sílica em dormentes de concreto protendido foram observados aproximadamente 2,8 anos após o início da operação das linhas ferroviárias (Plugin *et al.*, 2021) enquanto na Alemanha 200.000 dormentes de concreto com 15 anos desde sua fabricação estão sendo investigados quanto a presença de reações químicas deletérias (Jenkins, 2022).

Por outro lado, casos de reação álcali-carbonato são menos comuns. Medeiros, Sanchez e Santos (2024) relataram o primeiro caso documentado dessa reação no Brasil, identificado em dormentes de concreto protendido fabricados em 2011. O diagnóstico foi fundamentado na presença de brucita e calcita, além da aplicação de uma abordagem de avaliação multinível, que confirmou a ausência de produtos secundários—uma característica específica dessa reação.

Já a Formação Tardia de Etringita (*Delayed Ettringite Formation – DEF*) constitui um mecanismo de deterioração expansiva de origem interna que ocorre após a rigidez inicial do concreto ter sido alcançada. Trata-se de um fenômeno resultante da instabilidade térmica da etringita primária, normalmente formada durante os estágios iniciais da hidratação do cimento. Quando o concreto é exposto a temperaturas elevadas, geralmente superiores a 65-70 °C, durante a cura inicial, ocorre a decomposição da etringita previamente formada. Em condições posteriores de elevada umidade relativa (tipicamente acima de 90%), essa etringita pode se reformar no interior de uma matriz já endurecida, promovendo expansão localizada e gerando pressões cristalinas suficientes para induzir microfissuras, comprometendo de maneira significativa a integridade microestrutural e as propriedades mecânicas do material (Jebli *et al.*, 2021; Pavoine; Brunetaud; Divet, 2012).

A DEF também pode ocasionar perda de propriedades mecânicas e de durabilidade em dormentes de concreto protendido ((Tepponen; Eriksson, 1987; Mielenz *et al.*, 1995; Hime, 1996; Sahu; Thaulow, 2004; Silva; Gonçalves; Pipa, 2008; Awasthi *et al.*, 2017; Jokūbaitis; Marčiukaitis; Valivonis, 2019).

Estudos investigativos na Coreia do sul relataram a presença de fissuras longitudinais somadas a laterais mapeadas em dormentes afetados por reação expansiva, nesse caso DEF e RAA, combinadas. Os dormentes estudados estavam aplicados em via há 15 anos, sendo comprovada a presença dessas reações por ensaios microestruturais (Jeon *et al.*, 2022). Em um estudo recente, Lubej *et al.* (2023) investigaram dormentes de concreto retirados de ferrovias da Eslovênia, com 10 anos desde sua fabricação, chegando à conclusão que esses elementos estavam sendo afetados por reações expansivas combinadas. No mesmo ano, Ferreira *et al.* (2023) identificaram a presença de reações expansivas em diferentes grupos de dormentes de concreto protendido no norte do Brasil. Os elementos, também com 10 anos desde sua fabricação, apresentavam sinais de deterioração associados tanto à Reação Álcali-Sílica quanto à Formação de Etringita Tardia.

A recorrência de manifestações como fissuração longitudinal, lateral e mapeada em dormentes com mais de uma década de exposição evidencia a natureza progressiva dessas reações, cujo diagnóstico nem sempre é possível por métodos visuais convencionais. Tais observações reforçam a importância de estratégias de acompanhamento contínuo e detalhado da condição dos dormentes ao longo de sua vida útil, não apenas para fins de manutenção corretiva, mas principalmente como ferramenta preventiva voltada à gestão de risco operacional em ferrovias.

2.3 ANÁLISE MODAL

Dentro das abordagens vibracionais aplicadas a elementos estruturais, a análise modal experimental consiste na determinação das propriedades dinâmicas da estrutura a partir de ensaios com excitação controlada e medição da resposta vibratória. Essas propriedades incluem as frequências naturais, os modos de vibração e o amortecimento, os quais dependem da massa, da rigidez e dos mecanismos de dissipação de energia do sistema (Doebling *et al.*, 1996). A partir da aquisição e do processamento dos sinais de força e resposta, a técnica permite caracterizar o comportamento dinâmico do elemento e avaliar variações desses parâmetros

associadas a alterações estruturais ao longo da vida útil (Nóbrega, 2004; Michel; Guéguen; Bard, 2008).

Além da análise modal experimental, a identificação das propriedades dinâmicas também pode ser realizada por meio da análise modal operacional, na qual os parâmetros modais são estimados a partir da resposta estrutural medida sob excitações ambientais ou de serviço, sem medição direta da força aplicada. Essa abordagem é particularmente relevante para estruturas em operação, nas quais a aplicação de excitações controladas pode ser limitada por restrições de acesso, segurança ou continuidade de uso. No entanto, como a força excitadora não é medida diretamente, a interpretação dos resultados depende de procedimentos específicos de identificação modal e de maior controle sobre as condições de aquisição dos sinais (Brincker; Ventura; Andersen, 2001; Rainieri; Fabbrocino, 2014).

Experimentalmente, os parâmetros modais podem ser determinados por diferentes técnicas de identificação. Em ensaios com excitação conhecida, uma abordagem amplamente empregada consiste na construção das Funções de Resposta em Frequência (FRFs), que são funções complexas da frequência e descrevem a relação entre os sinais de entrada e saída do sistema. A análise dessas funções, especialmente nas regiões de ressonância, permite estimar as frequências naturais, os modos de vibração e os coeficientes de amortecimento modal por meio de métodos de ajuste no domínio da frequência (Maia; Silva, 1997).

No entanto, a determinação dos parâmetros modais com excitação conhecida não se limita ao uso de FRFs, podendo também ser realizada por métodos no domínio da frequência ou do tempo, enquanto, em abordagens baseadas apenas na resposta estrutural, são empregadas técnicas como *Frequency Domain Decomposition* (FDD), *Enhanced Frequency Domain Decomposition* (EFDD) e *Stochastic Subspace Identification* (SSI), amplamente empregadas em análise modal operacional de estruturas civis (Peeters; De Roeck, 2001; Mohammadi; Nasirshoaibi, 2017; Mostafaei; Ghamami, 2025).

Considerando que o dano estrutural altera as propriedades físicas do elemento e, consequentemente, suas características dinâmicas, mudanças observadas nos parâmetros modais, podem ser indicativas da presença, localização e severidade de danos (Morais, 2014; Lima Júnior, 2020).

2.3.1 Propriedades modais

As propriedades dinâmicas permitem descrever o comportamento estrutural em regime transiente. Elas resultam da interação entre as características de massa, rigidez e dissipação de energia do sistema e são amplamente utilizadas na análise dinâmica de estruturas. Em sistemas lineares com propriedades estruturais constantes, as frequências naturais, os modos de vibração e os amortecimentos modais são parâmetros intrínsecos do sistema Ewins (2000). Assim, alterações nesses parâmetros podem indicar mudanças na rigidez, na massa, nas condições de contorno ou na dissipação de energia.

Alterações nessas condições, mesmo que localizadas, podem gerar variações perceptíveis na resposta modal global do sistema (Ewins, 2000; Chopra, 2017).

2.3.1.1 Frequência natural

A frequência natural de vibração é uma propriedade intrínseca do sistema, definida por sua massa e rigidez, e corresponde às frequências nas quais a estrutura tende a vibrar. Essas frequências podem ser observadas em vibração livre após uma perturbação inicial ou, sob excitação externa, quando ocorre amplificação da resposta caso a frequência de excitação se aproxime da frequência natural, caracterizando a ressonância (Jr; Kurdila, 2006).

Em sistemas simples com um grau de liberdade, essa frequência pode ser determinada pela expressão:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{Equação 1}$$

No qual, k representa a rigidez e m a massa do sistema.

A relação entre a integridade estrutural e as frequências naturais tem sido tema recorrente na literatura, pois a resposta dinâmica é diretamente influenciada pela rigidez efetiva mobilizada durante a vibração. Em vigas de concreto armado, a fissuração reduz a continuidade da seção resistente e altera a rigidez a flexão do elemento. Srinivas *et al.* (2012) investigaram esse comportamento em uma viga de concreto armado com 3 metros de vão submetida a carregamentos estáticos progressivos até dois níveis de dano: início de fissuração (4,2t) e escoamento da armadura longitudinal principal (12,2t). Após cada etapa de carregamento, os autores realizaram ensaios de vibração forçada para avaliar a influência da deterioração progressiva nas propriedades dinâmicas da viga. Os resultados indicaram redução da frequência

natural do primeiro modo, de 52,34 Hz na condição sem dano para 45,16 Hz após o início da fissuração e 36,25 Hz após o escoamento da armadura longitudinal. Essas variações correspondem a reduções de 13,7% e 30,8%, respectivamente, em relação à condição inicial.

Esse comportamento também foi observado em estudos numéricos e experimentais envolvendo outros sistemas estruturais de concreto. Zhang *et al.* (2020), ao simular vigas mistas aço-concreto com diferentes níveis de dano, mostraram que reduções localizadas de rigidez podem provocar quedas nas frequências naturais mesmo em estágios iniciais de deterioração. Moura (2022), ao avaliar lajes de concreto armado, também verificou que a presença de fissuras compromete a rigidez do sistema e afeta diretamente a frequência fundamental em regime de serviço.

Em estruturas de concreto protendido, o estado inicial de compressão imposto pela protensão influencia a formação, a abertura e a propagação de fissuras. Até determinado nível de solicitação ou deterioração, esse pré-esforço pode limitar a abertura das fissuras e manter a continuidade aparente do elemento, preservando parte da rigidez efetiva mobilizada durante a vibração (Gan *et al.*, 2019). Esse comportamento pode reduzir a evidência visual do dano e atenuar, em estágios iniciais, as alterações observadas nas frequências naturais. No entanto, à medida que a fissuração evolui, que ocorrem perdas de protensão ou que mecanismos internos de deterioração comprometem a aderência e a integridade do concreto, a capacidade de fechamento das fissuras é reduzida. Nessa condição, a perda de rigidez torna-se mais pronunciada e passa a produzir alterações mais evidentes nas propriedades modais.

Ren e De Roeck (2002) demonstraram, por meio de modelos numéricos e validação experimental em vigas de concreto armado, que a introdução de danos localizados é capaz de provocar alterações mensuráveis nas propriedades modais, especialmente na frequência fundamental e na forma dos modos de vibração. Apesar de sua relevância, a frequência natural constitui um parâmetro global, sensível a alterações na rigidez do sistema, porém com capacidade limitada para identificar a localização de danos estruturais. Nesse contexto, torna-se necessária a análise de parâmetros que incorporem a distribuição espacial da resposta dinâmica.

2.3.1.2 Modos de vibração

Os modos de vibração descrevem os padrões de deformação espacial assumidos pela estrutura em cada uma de suas frequências naturais. Cada modo é caracterizado por uma forma modal específica, que representa o deslocamento relativo dos pontos da estrutura ao longo do

tempo. Esses modos são ortogonais entre si e podem ser determinados por meio de análise numérica (como o método dos elementos finitos), por ensaios experimentais com sensores acelerométricos e excitação controlada, também podem ser estimadas por análise modal operacional, a partir da resposta medida sob vibrações ambientais ou de serviço ((Maia; Silva, 1997; Ewins, 2000; Rainieri; Fabbrocino, 2014).

A principal vantagem das formas modais em relação às frequências naturais está na informação espacial que elas fornecem sobre a resposta dinâmica da estrutura. Enquanto as frequências naturais representam parâmetros globais, predominantemente sensíveis à rigidez total mobilizada em cada modo, as formas modais permitem avaliar a distribuição da deformação ao longo do elemento. Essa característica é importante para a identificação de danos localizados, pois uma fissura, uma redução local de rigidez ou uma descontinuidade interna pode produzir alterações pontuais na forma modal mesmo quando a variação da frequência natural é limitada. Assim, os modos de vibração funcionam como uma ponte entre a avaliação global do dano e a tentativa de localizar regiões com perda de integridade.

A partir das formas modais, é possível derivar parâmetros mais sensíveis à presença de danos localizados. Nesse sentido, Silva *et al.* (2020) demonstraram que indicadores derivados das formas modais, como a diferença de curvatura modal (*Modal Curvature Difference* – MCD) e a soma das diferenças de aceleração (*Acceleration Summation Difference* – ASD), permitem não apenas identificar a presença de dano, mas também aprimorar sua localização ao longo do elemento estrutural. Os resultados indicaram que, enquanto as frequências naturais refletem alterações globais de rigidez, parâmetros baseados nas formas modais apresentam maior sensibilidade à presença e à localização de danos localizados.

Além dos indicadores baseados na diferença entre formas modais, estudos recentes também têm explorado a complexidade modal como ferramenta de diagnóstico. Nesse sentido, Iezzi; Spina e Valente (2015) propuseram uma avaliação de dano baseada nas alterações das formas modais associadas ao amortecimento não proporcional, mostrando que modificações locais nas matrizes de rigidez e amortecimento podem aumentar a complexidade modal e fornecer indicadores sensíveis à presença de dano. De forma complementar, Masciotta e Pellegrini (2024) investigaram numericamente uma ponte submetida a cenários progressivos de deterioração e observaram que a variação do conteúdo imaginário das formas modais pode atuar como indicador de dano local. Ambos estudos reconhecem que, em estruturas reais com

amortecimento não proporcional, as formas modais não são puramente reais, apresentando componentes imaginárias cuja magnitude tende a aumentar com o dano.

2.3.1.3 Amortecimento

O amortecimento representa a capacidade do sistema estrutural de dissipar energia durante a vibração. Essa dissipação pode ocorrer por diferentes mecanismos, incluindo amortecimento interno do material, atrito seco ou amortecimento de Coulomb, e comportamento histerético durante ciclos de carregamento e descarregamento. Em estruturas de concreto, esses mecanismos podem ocorrer simultaneamente, de modo que o amortecimento identificado experimentalmente representa uma resposta equivalente do sistema.

Em análises dinâmicas, esses mecanismos são frequentemente representados por um amortecimento viscoso equivalente, no qual a força resistente é proporcional à velocidade, embora os mecanismos físicos reais estejam associados a histerese, atrito e outros processos dissipativos (Chopra, 2017; Qu *et al.*, 2024).

A estimativa do amortecimento é uma das etapas mais sensíveis da caracterização dinâmica. Em sistemas representados por amortecimento viscoso equivalente, a razão de amortecimento pode ser obtida pelo decremento logarítmico, com base no decaimento da resposta livre, ou pelo método da meia potência, com base na largura da banda em torno da frequência de ressonância (Chopra, 2017). Em estruturas de concreto, o amortecimento identificado experimentalmente pode ser influenciado por fissuras, juntas, interfaces, condições de apoio, amplitude de vibração e características do material.

Em estruturas de concreto, a razão de amortecimento é frequentemente reportada na faixa de 1% a 5%, variando conforme o tipo de elemento, o estado de fissuração, a amplitude de vibração, as condições de apoio e o contato com outros elementos. Cao *et al.* (2017) apresentaram uma revisão abrangente sobre o uso do amortecimento como parâmetro de identificação de danos estruturais, destacando seu potencial superior em relação às frequências naturais e formas modais em certas aplicações. O estudo revisa métodos de estimativa da razão de amortecimento em diferentes domínios (tempo, frequência e tempo-frequência), e evidencia que o amortecimento aumenta consistentemente com a severidade do dano, principalmente devido ao atrito gerado em fissuras e zonas de transição.

Dimri e Chakraborty (2022) avaliaram experimentalmente a influência da fissuração por flexão na resposta dinâmica de uma viga de concreto armado com 3,3 metros de comprimento, por meio de ensaios com martelo de impacto realizados antes e após a indução do dano. A

fissuração reduziu a rigidez efetiva da viga, refletindo-se na diminuição da frequência natural do primeiro modo, de 42,18 Hz para 27,44 Hz, correspondente a uma redução de 34,94%. No mesmo modo, a razão de amortecimento aumentou de 4,21% para 7,79%, indicando maior dissipação de energia após a formação das fissuras. Nos modos superiores, as variações de amortecimento foram menos uniformes, evidenciando que esse parâmetro depende da forma modal, da região danificada mobilizada durante a vibração e do método de identificação.

O estudo de Gidrão *et al.* (2024) investigaram a evolução da razão de amortecimento interno (ξ) em concretos com resistências à compressão de 42 MPa e 83 MPa submetidos a carregamentos cíclicos, utilizando ensaios acústicos após cada etapa de dano. Para o concreto com resistência de 42 MPa, o amortecimento inicial foi de 0,5%, aumentando para até 2,5% com um índice de dano (redução do módulo de elasticidade) de 0,8. Já no concreto de 83 MPa, o ξ inicial foi de 0,29%, alcançando no máximo 0,93% com dano moderado (índice 0,32). Os autores associaram esse aumento à intensificação dos mecanismos de dissipação por atrito interno, relacionados à formação e ao desenvolvimento de fissuras. Os resultados indicam que a razão de amortecimento interno aumenta com a progressão do dano, embora a magnitude dessa variação dependa da resistência do concreto, da microestrutura e do nível de fissuração mobilizado durante o carregamento cíclico.

2.4 ANÁLISE MODAL EM DORMENTES

O estudo do comportamento dinâmico dos dormentes está diretamente associado às solicitações repetitivas geradas pela interação roda-trilho. Em condições adequadas de via e material rodante, essas ações tendem a ser de menor intensidade, porém ocorrem em elevado número de ciclos, contribuindo para a degradação progressiva dos componentes ferroviários (Taherinezhad *et al.*, 2013). Irregularidades nas rodas, nos trilhos, nas fixações ou nas condições de apoio podem aumentar a intensidade das solicitações e introduzir componentes de frequência mais elevada. Knothe e Grassie (1993) destaca que cargas dinâmicas acima de 30 Hz podem contribuir para a deterioração dos componentes da via. Zhao, Li e Liu (2012) também observaram que forças dinâmicas de alta frequência podem intensificar a degradação do sistema de fixação e do lastro, além de favorecer fissuração, desalinhamento, perda de apoio e deslocamento dos dormentes.

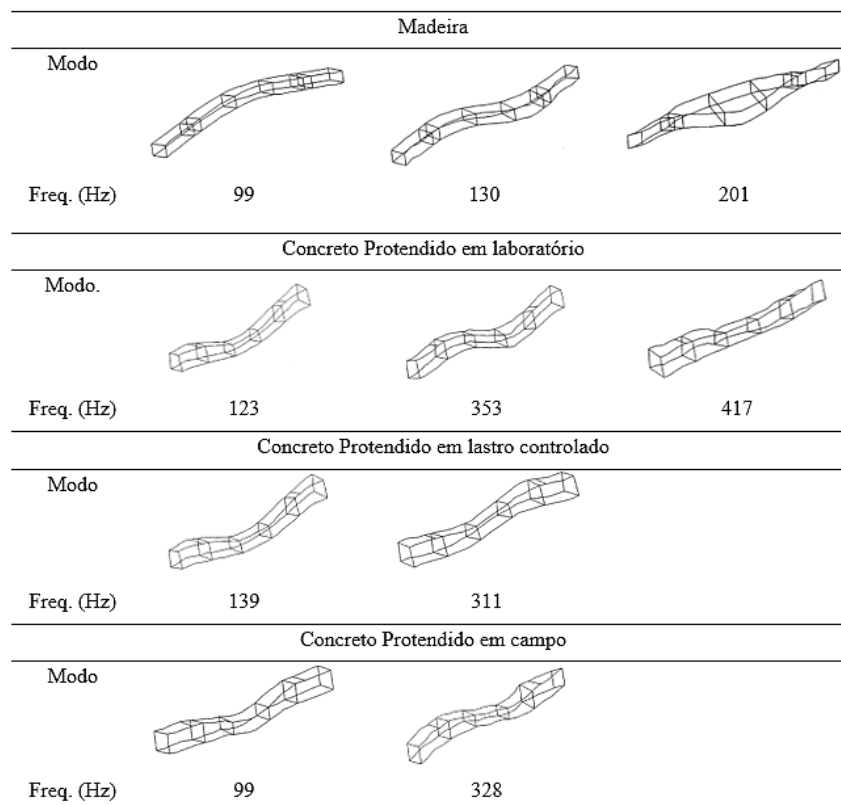
A partir da literatura, Sadeghi (2010) indica que as investigações sobre o comportamento dinâmico de dormentes de concreto protendido podem ser organizadas em três grupos principais: a determinação de propriedades dinâmicas em dormentes; a avaliação da capacidade de impacto e dos mecanismos de falha; e a quantificação dos fatores dinâmicos associados aos padrões de carregamento em via. Essa classificação diferencia os estudos voltados à caracterização modal dos dormentes daqueles direcionados à resposta ao impacto e à amplificação dinâmica das cargas ferroviárias.

Um dos estudos iniciais sobre propriedades dinâmicas de dormentes e vias ferroviárias foi desenvolvido por Sadeghi (1997), que combinou modelagem numérica e ensaios experimentais para avaliar frequências naturais, formas modais e amortecimento de dormentes de madeira, dormentes de concreto protendido e sistemas de via. Na etapa experimental, o autor realizou ensaios modais em dormentes isolados em laboratório, em uma pista experimental com lastro e em trechos de via em campo. A comparação entre as diferentes condições de ensaio mostrou que os resultados obtidos na pista experimental apresentaram boa aproximação com os resultados de campo, enquanto as formas modais medidas em campo foram menos suaves, devido à não uniformidade das condições de apoio dos dormentes.

Na etapa numérica, o autor analisou 6 modelos computacionais de via, variando parâmetros geométricos e materiais do sistema ferroviário, incluindo a largura e a profundidade do lastro, o número de dormentes e o tipo de dormente, comparando elementos de madeira e de concreto protendido. Os resultados indicaram baixa diferença na frequência natural quando se altera propriedades do lastro, porém há uma alteração significativa nas propriedades dinâmicas quando os elementos são alterados de madeira para dormentes de concreto protendido (aproximadamente 100%).

Os resultados comparativos entre as frequências naturais e os modos de vibração obtidos dos dormentes de madeira e concreto, além das diferentes condições de exposição desses últimos, estão apresentados no Figura 7 .

Figura 7: Comparação entre modos de vibração em diferentes condições



Fonte: Adaptado de Sadeghi (1997).

Embora o trabalho demonstre que as frequências naturais e os modos de vibração são sensíveis ao tipo de dormente e à condição de instalação, ele não permite estabelecer como diferentes mecanismos de dano influenciam a resposta modal em cada configuração de ensaio.

Sadeghi (2010) também contribuiu para a definição de faixas típicas de frequências naturais associadas aos principais modos de vibração de dormentes de concreto. Segundo o autor, as frequências características desses elementos situam-se aproximadamente entre 120 Hz e 150 Hz para o primeiro modo de flexão, entre 330 Hz e 360 Hz para o segundo modo de flexão e entre 440 Hz e 520 Hz para o primeiro modo de torção. Além disso, o estudo indicou que a inserção de palmilhas entre trilho e dormente tende a reduzir as frequências naturais, assim como a deterioração do lastro. Esses resultados reforçam que a resposta modal dos dormentes não depende apenas das propriedades do elemento, mas também da rigidez dos componentes de interface e das condições de apoio.

Nielsen e Palmer (2021), avaliaram a influência do tipo de dormente e das condições de apoio na resposta dinâmica de dormentes de concreto protendido. Os autores compararam

elementos retirados de vias antigas, dormentes rejeitados por baixa resistência à compressão e dormentes produzidos sob condições controladas, considerando ensaios sobre solo argiloso e em condição *in situ*. Os ensaios foram realizados com martelo de impacto, microfone piezoelétrico e acelerômetro, variando os pontos de impacto e de medição ao longo do dormente. Os resultados indicaram que impactos aplicados nas extremidades, com medição na extremidade oposta, produziram respostas mais adequadas para comparação. Também foram observados aumento do amortecimento em condição *in situ* e alterações de frequência nos dormentes com menor resistência à compressão.

Dentro da classificação proposta por Sadeghi, o estudo de Xe, Wang e Mindess (1994) enquadra-se principalmente na segunda linha de investigação, relacionada à capacidade de impacto e os mecanismos de falha dos dormentes. Os autores investigaram o efeito da taxa de carregamento e das condições de apoio no modo de falha de dormentes de concreto protendido submetidos a impacto. Os ensaios foram realizados por meio da queda de uma massa de 345 kg a partir de 1,52 m de altura, com medição da força de impacto por célula de carga e monitoramento da resposta dinâmica por acelerômetros. Os resultados indicaram que a rigidez do sistema é influenciada pelas condições de apoio e pelas palmilhas utilizadas, enquanto o modo de propagação das fissuras depende da força de impacto no ensaio dinâmico e da taxa de carregamento no ensaio estático. O mesmo é evidenciado por Taherinezhad *et al.* (2013), que destacam que as respostas dinâmicas de dormentes de concreto são significativamente influenciadas pelas condições de contorno impostas ao elemento.

Kumaran, Menon e Nair (2003) avançaram na terceira linha de investigação ao avaliar fatores de amplificação dinâmica em dormentes de concreto protendido. Os autores investigaram a resposta dinâmica de dormentes em laboratório com o objetivo de alimentar um modelo detalhado por elementos finitos e avaliar os efeitos da excitação sobre deflexão, pressão de lastro e momentos fletores no apoio do trilho.

A influência das condições de apoio sobre a formação de fissuras também foi evidenciada por Kaewunruen e Remennikov (2010). Os autores avaliaram dormentes apoiados sobre lastros com diferentes rigidezes e observaram que a formação e a propagação de fissuras sob carregamentos repetidos de impacto dependem da rigidez do apoio. Apoios mais rígidos favoreceram fissuras mais rápidas e extensas, com maior penetração no interior do material. Esse resultado mostra que a fissuração dos dormentes não depende apenas da intensidade do

carregamento aplicado, mas também da forma como o apoio restringe ou redistribui a resposta dinâmica do elemento.

A aplicação da análise modal para avaliação de manifestações patológicas em dormentes de concreto protendido foi explorada por Kaewunruen e Remennikov, (2008), que investigaram o efeito de fissuras nas assinaturas vibratórias desses elementos. Os autores compararam dormentes íntegros e fissurados por meio de ensaios de impacto com martelo instrumentado, utilizando um acelerômetro em posição fixa e pontos de excitação distribuídos ao longo da face superior do dormente (Figura 8). Os resultados indicaram que a presença de fissuras modificou principalmente o comportamento flexional dos dormentes, com redução das frequências associada à perda de rigidez global. Além disso, os autores observaram aumento do amortecimento modal em dormentes fissurados, atribuído à maior dissipação de energia provocada pela abertura e fechamento das fissuras e pelo atrito entre suas faces.

Figura 8: Arranjo de ensaio modal em dormente de concreto protendido



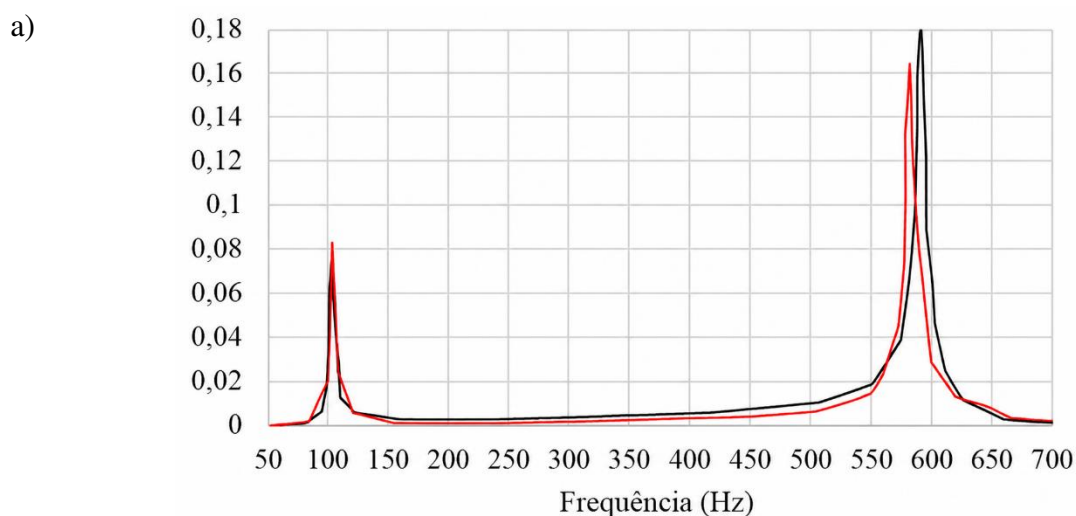
Fonte: Kaewunruen e Remennikov (2008).

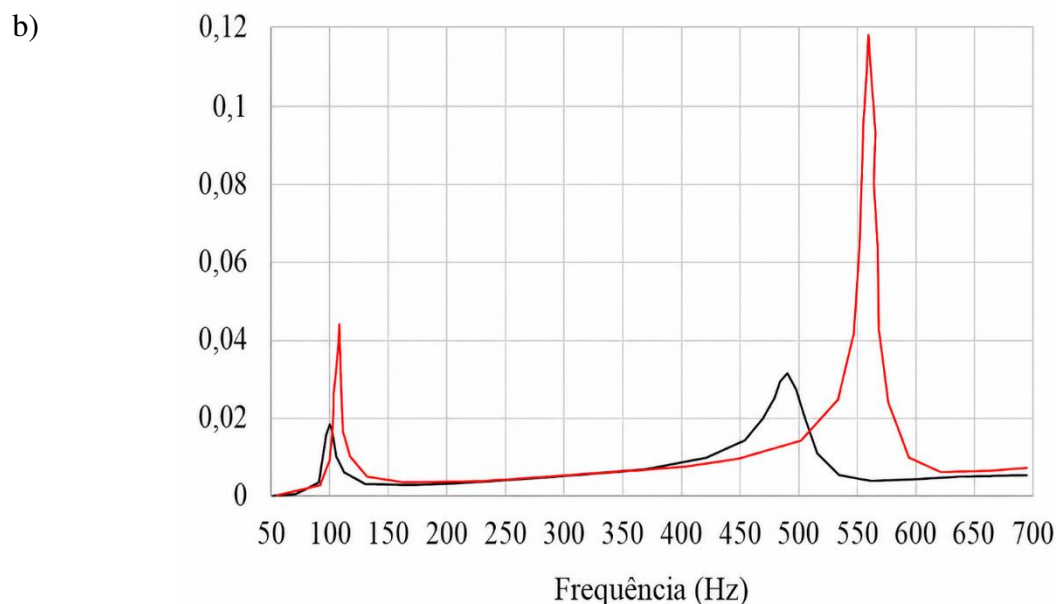
Além da análise direta das frequências naturais, métodos derivados das formas modais têm sido utilizados para melhorar a localização de danos. Janeliukstis *et al.* (2019) aplicaram o método das curvaturas dos modos de vibração ao quadrado para detecção de fissuras em dormentes de concreto protendido. Os dormentes foram submetidos a carregamentos controlados até a primeira fissura e, posteriormente, até 1,5 vez essa carga, conforme critérios normativos britânicos. Os resultados indicaram que a primeira fissura produziu redução limitada da rigidez estrutural, com pequenas alterações nas frequências naturais e nas formas

de deflexão. A curvatura modal isolada não foi suficiente para indicar de forma clara a formação das fissuras; contudo, a aplicação de um índice de dano padronizado, associado a limiares de confiança, permitiu localizar fissuras principalmente na região central dos dormentes. O estudo mostra que indicadores baseados em formas modais podem ampliar a capacidade de localização de danos, mas sua aplicação depende da densidade de sensores, da qualidade dos sinais e da sensibilidade do método a pequenas reduções de rigidez.

Estudos recentes têm buscado avaliar a resposta modal de dormentes com diferentes condições de dano e histórico de serviço, Çeçen *et al.* (2022), compararam dormentes B70 de concreto protendido com dormentes LCR-6, reforçado com fibra de carbono e poliuretano, sem processo de protensão. A análise modal foi realizada antes e após 50 impactos repetidos de aproximadamente 330 kN, utilizando excitação por martelo de impacto e acelerômetros posicionados nas extremidades e na região central dos dormentes. Após os impactos, os dormentes de concreto protendido apresentaram fissuras fechadas e não visíveis devido ao efeito da protensão, enquanto os dormentes reforçados apresentaram fissuras inferiores a 0,05 mm. Eles concluíram que o aparecimento de fissuras não causou perda mecânica significativa, mas aumentou a taxa de amortecimento em até 274% (Figura 9) nos dormentes de concreto reforçado.

Figura 9: Gráfico obtido do acelerômetro central do dormente a) concreto protendido b) concreto reforçado (em vermelho ensaio antes da carga repetitiva; após a aplicação da repetição de carga, linha preta).





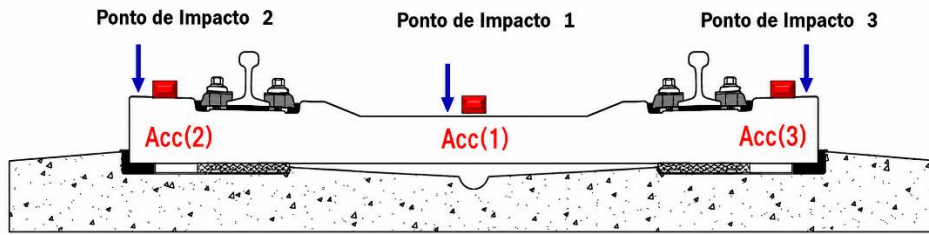
Fonte:Çeçen *et al.* (2022).

O aumento da razão de amortecimento pode ser considerado favorável quando está associado à maior dissipação de energia e à redução da amplificação vibratória, sem perda significativa de rigidez ou capacidade resistente. Em dormentes ferroviários, essa condição pode reduzir a energia transmitida às fixações, ao lastro e aos demais componentes da via. No entanto, em elementos de concreto, o aumento do amortecimento também pode estar relacionado à fissuração e à degradação interna. Assim, esse parâmetro deve ser interpretado em conjunto com as frequências naturais, a condição visual e o desempenho mecânico residual.

Choi *et al.* (2023) por sua vez avaliaram 20 dormentes de concreto protendido retirados da via, devido a presença de danos, combinando ensaios com martelo de impacto, medições com acelerômetros e análise numérica. Os resultados indicaram que a alteração das propriedades dinâmicas foi compatível com os graus de dano observados, mostrando que a análise modal pode fornecer indicadores quantitativos da perda de integridade estrutural.

Choi *et al.* (2024) realizaram ensaios numéricos e experimentais em dormentes de concreto utilizando o martelo de impacto instrumentado como um método de avaliação da rigidez. Os impactos foram aplicados no centro e nas extremidades dos dormentes, enquanto acelerômetros posicionados na face superior mediram a aceleração vertical (Figura 10). A comparação entre resultados experimentais e numéricos apresentou boa aproximação para dormentes íntegros, enquanto os dormentes danificados apresentaram reduções expressivas das frequências naturais em relação aos elementos sem danos.

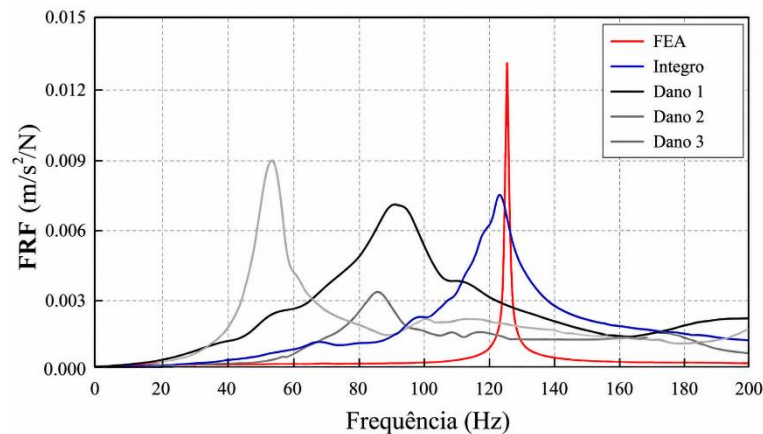
Figura 10: Arranjo de ensaio de dormente em via de metrô



Fonte: Choi *et al.* (2024).

Eles chegaram a uma comparação de aproximadamente de 1,87% de erro entre as frequências naturais simuladas e obtidas no ensaio em dormentes íntegros. Para os dormentes danificados houve uma queda nos valores das frequências naturais de 27 a 57% em relação aos dormentes não danificados (Figura 11).

Figura 11: Gráfico comparativo entre as frequências naturais de dormentes de concreto



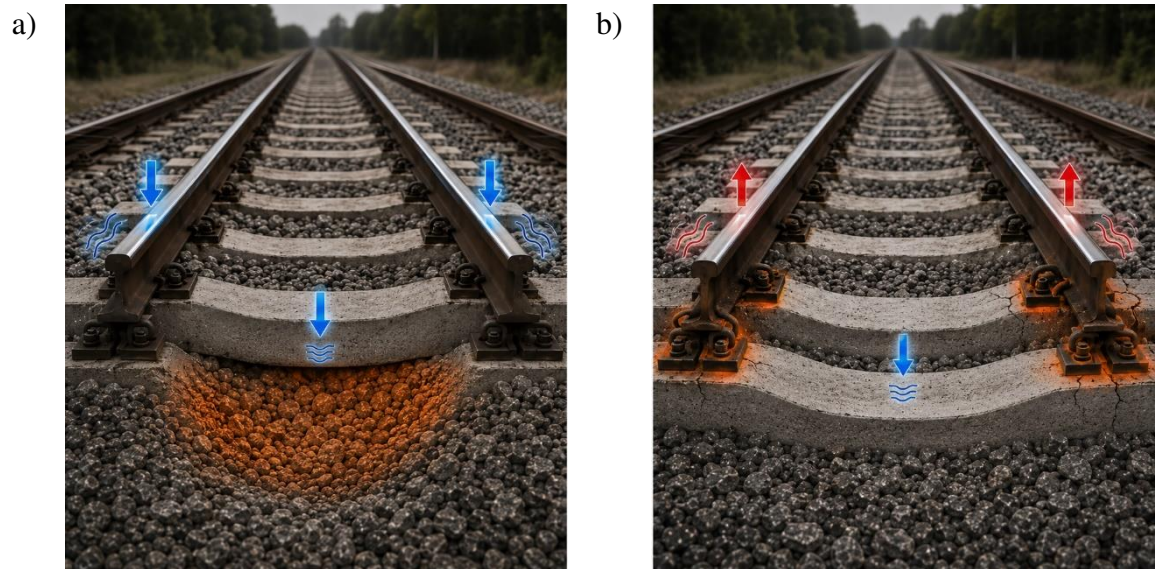
FEA – Frequência natural numérica (modelagem numérica); Íntegro - dormente íntegro; (dano #1#2#3) – Dormentes danificados.

Fonte: Choi *et al.* (2024)

A interpretação da resposta modal dos dormentes também deve considerar a possibilidade de interação entre os modos próprios do dormente e a resposta dinâmica da via. Kaewunruen e Remennikov (2007) discutiram que a ressonância da via permanente pode coincidir com modos de vibração dos dormentes, resultando em amplificação de tensões e aceleração da degradação estrutural. Na condição de ressonância *in-phase*, dormentes e trilhos vibram de forma sincronizada (Figura 12a), geralmente associada ao primeiro modo de flexão. Na condição *out-of-phase*, dormentes e trilhos oscilam em direções opostas, característica relacionada ao

segundo modo de flexão (Figura 12b). Essas condições podem favorecer a formação e a propagação de fissuras em regiões críticas, devido concentração de tensões, acelerando a degradação estrutural dos dormentes, comprometendo a estabilidade da via e exigindo intervenções corretivas mais frequentes.

Figura 12: Ilustração comportamento *in-phase* e *out-of-phase* ferrovia

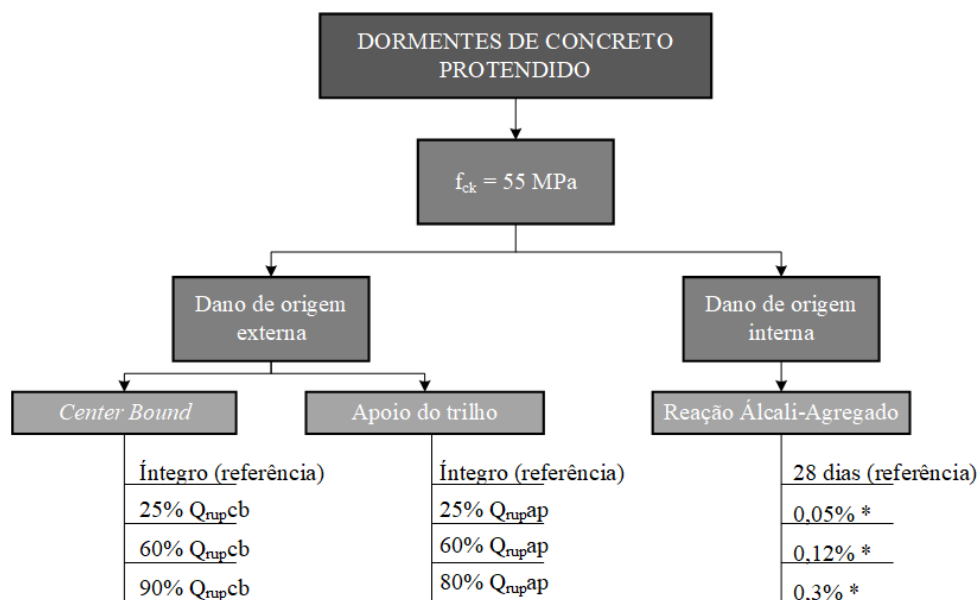


Fonte: Autora (2026)

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Três categorias de dano foram investigadas em dormentes de concreto protendido a partir do uso da análise modal: (I) fissura central por *center bound*, (II) fissura no assento do trilho e (III) deterioração causada por reações expansivas internas, com foco em Reação Álcali-Agregado (RAA). Os níveis de dano de cada situação estão expostos na Figura 13. Os níveis de danos para os ensaios de *center bound* e alta carga de impacto tiveram como referência as cargas obtidas em ensaios de caracterização dos dormentes.

Figura 13: Programa experimental



Q_{rupcb} – Carga de ruptura obtida por center bound

Q_{rupap} – Carga de ruptura obtida por momento fletor positivo no apoio do trilho

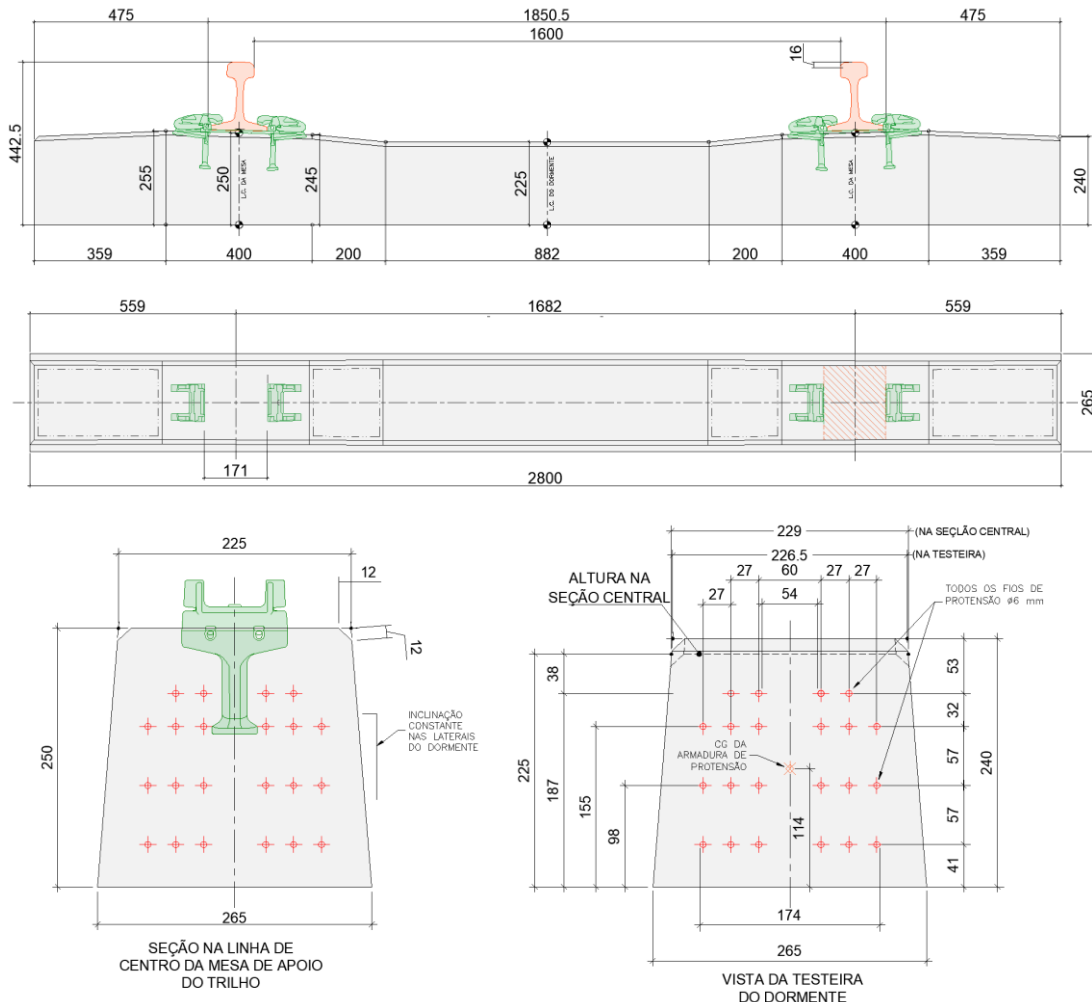
*Valor de expansão referente ao concreto

Fonte: Autora (2026).

Os dormentes empregados neste estudo são do tipo monobloco de concreto protendido, desenvolvidos para aplicação em linhas ferroviárias de bitola larga (1,6 m). As dimensões aproximadas de cada dormente são de 2,8 m de comprimento, 0,24 m de largura média e 0,23 m de altura média, considerando variações ao longo da peça conforme Figura 14. O concreto possui resistência mínima à compressão aos 28 dias de 55 MPa, com resistência mínima à compressão na transferência de 30 MPa. O dormente possui 22 fios de protensão $\varnothing 6,0$ mm tipo

CP 175RB entalhado com carga nominal inicial de protensão de 32,4 kN por fio e carga inicial total $P_i=712,8$ kN.

Figura 14: Dimensões dormentes de concreto protendido bitola larga



*medidas do projeto em mm

Fonte: Grupo de pesquisa DurAE (2025).

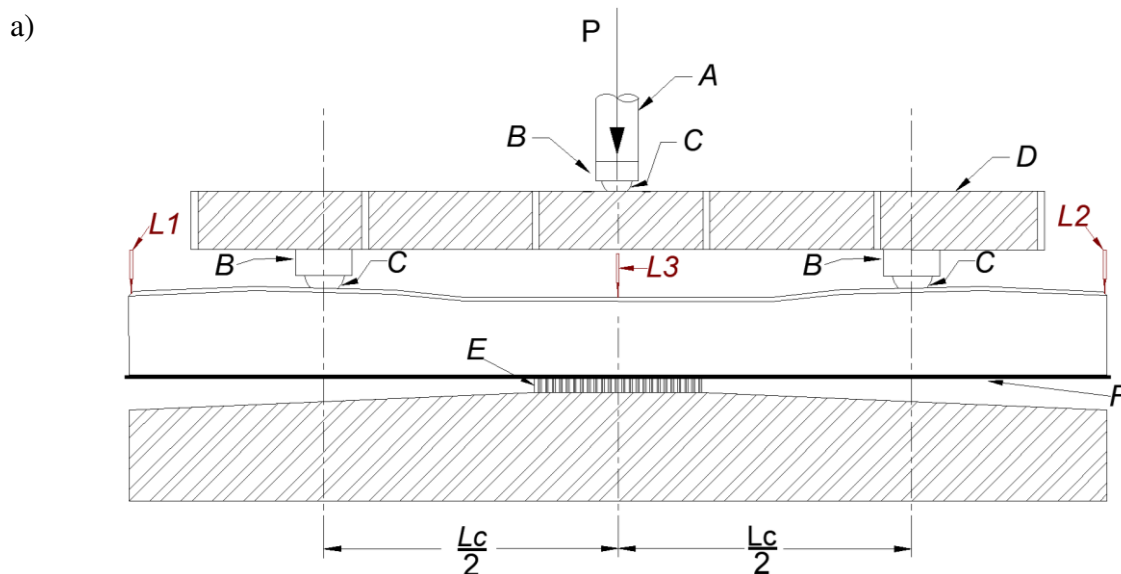
Para os ensaios de indução/avaliação de danos mecânicos, foram utilizados dormentes de concreto protendido de bitola larga fornecidos por empresa concessionária de ferrovias. Adicionalmente, para representar a terceira categoria de dano, foram moldados em laboratório dormentes de concreto protendido de mesma bitola e mesmas características especificadas anteriormente, utilizando materiais específicos para a indução controlada do mecanismo de deterioração em estudo.

3.1 INDUÇÃO DE DANOS

3.1.1 Fissuras centrais por center bound:

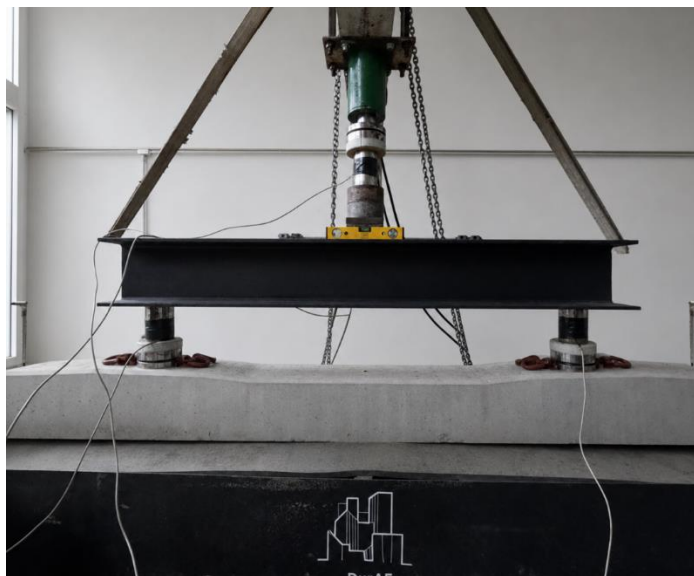
Para determinação da carga de ruptura por *center bound* (Q_{rupcb}), três dormentes foram ensaiados até ruptura seguindo a configuração especificada na Figura 15a e Figura 15b. Já os níveis de danos foram induzidos em outros três dormentes com o uso de mesmo aparato. Para esse grupo de ensaio foi utilizado um apoio efetivo de 20 cm, simulando situações reais já citadas pela concessionária ferroviária. O nível de carga estipulado na Figura 13 refere-se a carga aplicada pelo pistão no *set up* do ensaio. Os níveis escolhidos visaram compreender o comportamento dinâmico da estrutura sem danos (íntegro), antes do surgimento da primeira fissura (25%), após o surgimento e extensão das fissuras (60%) e como último nível, carga próxima a ruptura (90%).

Figura 15: Configuração do ensaio de center bound



Fonte: Autora (2026)

b)



Fonte: Autora (2026)

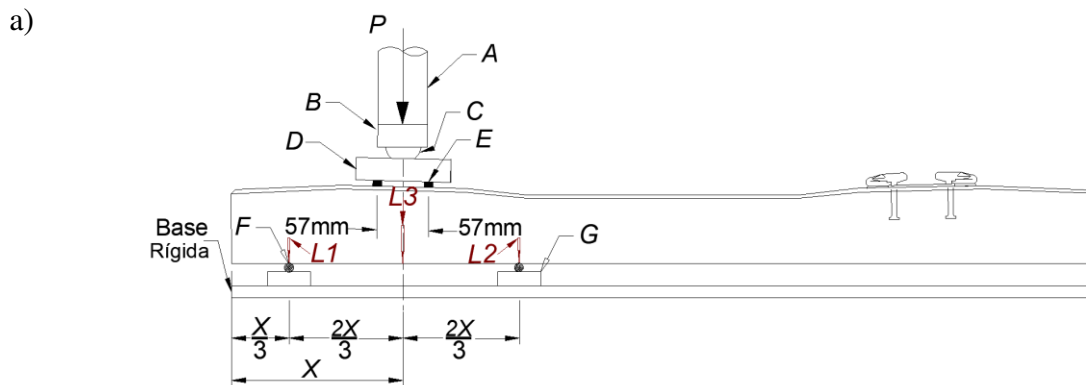
Legenda:

- A – Atuador hidráulico para aplicação do carregamento especificado;
- B – Célula de carga com capacidade de medição de acordo com carregamento especificado;
- C – Rótula;
- D – Viga de transferência dimensionada para suportar o carregamento especificado;
- E – Apoio efetivo do dormente durante realização de ensaio;
- F – Manta de borracha;
- L1, L2, L3 – Transdutor de deslocamento (LVDT).

3.1.2 Fissuras no assento do trilho por alta carga de impacto:

O ensaio de caracterização também foi realizado para o momento positivo no apoio em três dormentes seguindo a configuração do ensaio (Figura 16a e Figura 16b). As fissuras no assento do trilho foram então, geradas em outros três dormentes através do ensaio de momento fletor no apoio do trilho, conforme ABNT NBR 11709 (2016). Os níveis de carga estipulados na Figura 13 para esse ensaio refere-se a carga aplicada pelo pistão no *set up*. Os níveis escolhidos visaram compreender o comportamento dinâmico da estrutura sem danos (íntegro), antes do surgimento da primeira fissura (25%), após o surgimento e extensão das fissuras (60%) e como último nível, carga próxima a ruptura (80%).

Figura 16: Set up ensaio Momento fletor no apoio do trilho



Fonte: Autora (2026) adaptado de NBR 11709 (2016).



Fonte: Autora (2026)

Legenda:

A – Atuador hidráulico para aplicação do carregamento especificado;

B – Célula de carga com capacidade de medição de acordo com carregamento especificado;

C – Rótula;

D – Placa de aço, suficientemente robusta para distribuir o carregamento sobre as tiras de borracha sem sofrer qualquer deflexão significativa;

E – Tira de borracha com largura de (25 ± 1) mm, espessura de $(12,5 \pm 0,5)$ mm, comprimento mínimo igual à largura do dormente e dureza de (50 ± 5) Shore A;

F – Apoio fixo metálico circular;

G – Placa de aço com largura e espessura apropriadas e comprimento mínimo igual à largura do dormente;

F – Placa de aço com largura e espessura apropriadas e comprimento mínimo igual à largura do dormente;

L1, L2, L3 – Transdutor de deslocamento (LVDT).

3.1.3 Fissuras por degradação química expansiva (RAA):

A reação álcali-sílica nos dormentes de concreto foi induzida e acelerada de forma controlada por meio da infraestrutura experimental e dos equipamentos disponíveis no campo tecnológico da universidade, permitindo reproduzir, em menor intervalo de tempo, as condições necessárias ao desenvolvimento da reação e à evolução dos danos associados.

3.1.3.1 Materiais

Para que fosse gerado esse mecanismo, foi utilizado na composição do traço, brita 1 potencialmente reativa de origem granítica e proveniente da região de Vitória de Santo Antão/PE. Enquanto os agregados miúdos foram areias industriais (grossa e média) provenientes da região de Contagem/MG e as mesmas utilizadas na produção de dormentes na fábrica.

A caracterização dos índices físicos dos agregados, determinadas em laboratório, seguiu as normas abaixo, e seus respectivos resultados estão apresentados na Tabela 1:

- Composição granulométrica, conforme ASTM C136/C136M:2019;
- Teor de material pulverulento, conforme ASTM C117:2017;
- Massa específica conforme ASTM C127:2015 para os agregados graúdos e ASTM C128:2022 para os agregados miúdos.

Tabela 1: Índices físicos dos agregados miúdos e graúdos

Propriedades	Unidades	Areia grossa industrial	Areia média industrial	Brita 1 reativa
Módulo de finura	-	2,40	1,60	6,97
Dimensão máxima	mm	4,00	2,00	19,1
Teor de material pulverulento	%	5,20	11,9	0,52
Massa específica aparente	g/cm ³	2,39	2,38	2,62

Fonte: Grupo de pesquisa DurAE (2024) e Perin (2024).

O cimento utilizado foi o CP V-ARI com o ensaio de concentração de óxidos de cinco amostras retiradas aleatoriamente, realizado por meio da norma ASTM C114 (2022) equivalente ABNT NBR NM 11-2 (2012) exposto na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados de perda ao fogo (LOI) e Fluorescência de raio x do cimento

(%)	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
CaO	58,70	58,53	58,21	57,64	57,76
SiO₂	15,77	15,68	15,60	15,40	15,49
Al₂O₃	4,04	4,02	4,01	3,94	3,98
Fe₂O₃	2,39	2,40	2,37	2,35	2,35
SO₃	2,14	2,02	2,17	2,05	2,32
K₂O	0,75	0,75	0,74	0,75	0,74
MgO	0,51	0,51	0,50	0,51	0,50
P₂O₅	0,24	0,24	0,23	0,23	0,23
TiO₂	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
Na₂O	0,17	0,15	0,15	0,14	0,16
Br	0,12	0,14	0,13	0,11	0,12
Mn₂O₃	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
LOI*	8,7	8,4	9,0	9,0	9,8

LOI* - Ensaio de perda ao fogo realizado a partir da norma ABNT NBR NM 18 (2012).

Fonte: Autora (2026).

Após a caracterização química dos materiais, e com o objetivo de induzir a reação álcali-agregado (RAA), foi adicionado hidróxido de sódio P.A. (NaOH) à água de amassamento, de modo que o teor alcalino equivalente da mistura atingisse 1,25% de Na₂O_{eq} em relação à massa de cimento, conforme o procedimento adotado pela ASTM C1293 (2020). Para esse cálculo, foram utilizados os valores médios obtidos nas seis amostras analisadas, correspondentes a 0,15% de Na₂O e 0,75% de K₂O.

O teor de álcalis equivalente já presente no cimento foi determinado pela Equação 2:

$$\text{Na}_2\text{O}_{eq} = \text{Na}_2\text{O} + (0,658 \times \text{K}_2\text{O}) \quad \text{Equação 2}$$

A partir desse valor, calculou-se a massa de Na₂O_{eq} já existente na mistura, multiplicando-se o teor obtido pela massa de cimento prevista para a concretagem. Em seguida, determinou-se a massa total de Na₂O_{eq} necessária para atingir o limite de 1,25%, também em

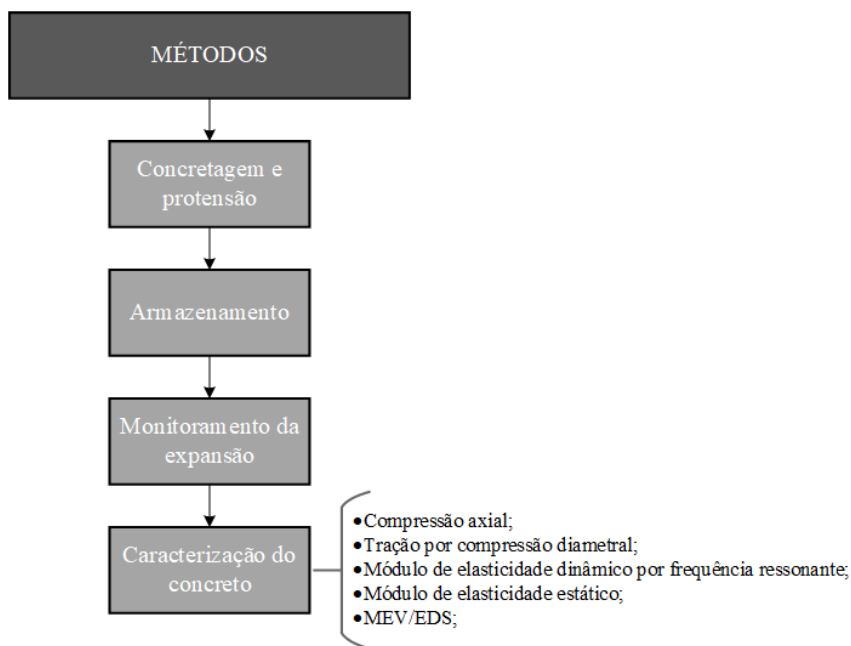
função da massa de cimento. A diferença entre o teor alcalino requerido e o teor já presente no cimento correspondeu à massa adicional de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ a ser incorporada à mistura.

Como a adição alcalina foi realizada por meio de NaOH , foi necessário aplicar um fator de conversão estequiométrico (1,291) para transformar a massa requerida de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ na massa correspondente de NaOH . Esse procedimento permitiu ajustar o teor alcalino da mistura ao valor especificado, garantindo a condição necessária para favorecer o desenvolvimento da RAA durante o período de exposição.

3.1.3.2 Métodos

Os métodos empregados para gerar reação expansiva nos dormentes foram realizados em etapas distintas, conforme Figura 17 e incluem: concretagem e protensão dos elementos, armazenamento com temperatura e umidade controladas, monitoramento da expansão do concreto e caracterização do concreto nos níveis especificados.

Figura 17: Etapas metodológicas para gerar a reação



Fonte: Autora (2026).

A seguir, serão descritas as principais informações de cada uma dessas etapas:

• Concretagem e protensão

A fabricação do concreto seguiu o traço apresentado na Tabela 3.

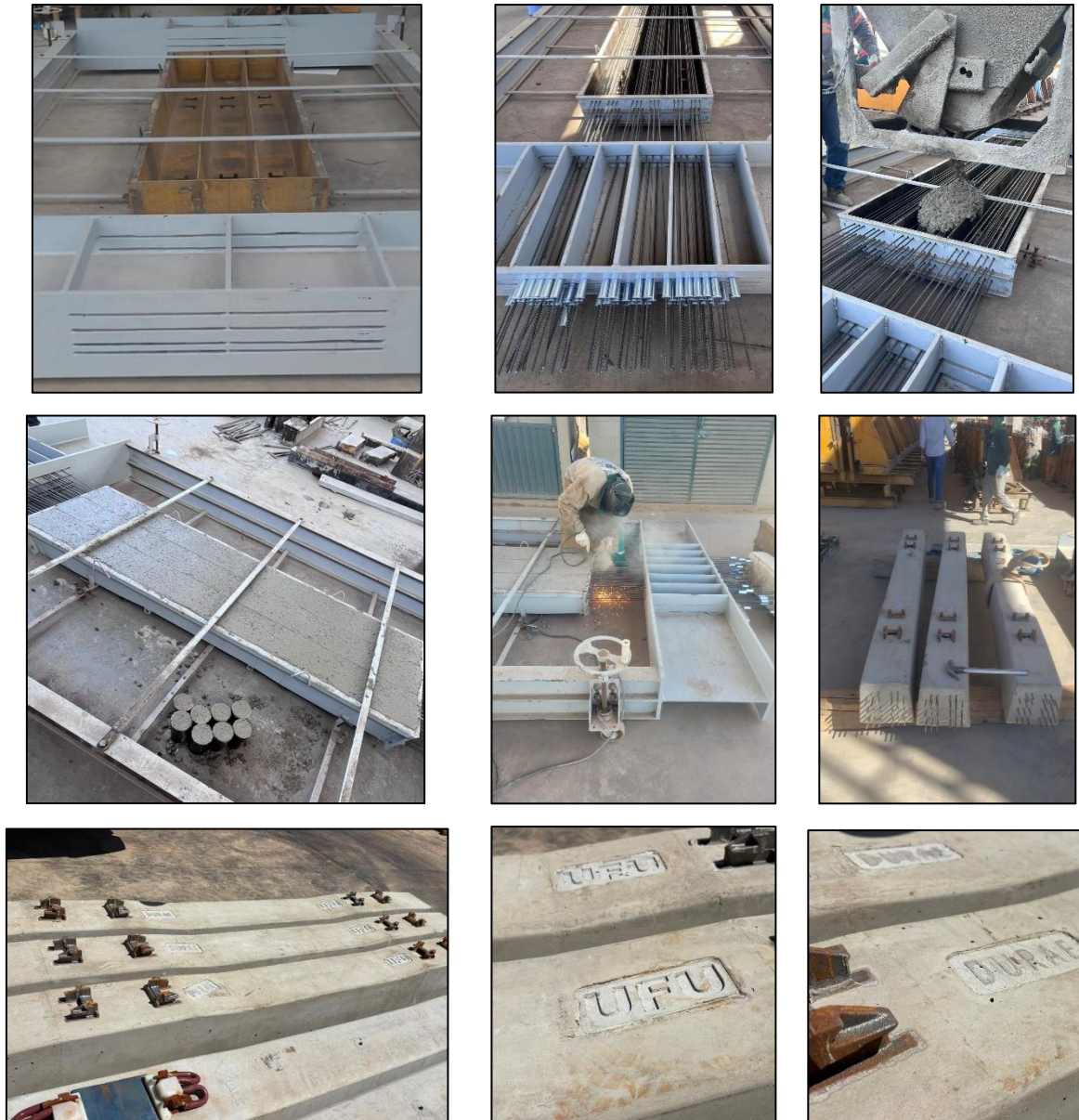
Tabela 3: Quantidade de materiais do traço

Material	Quantidade (kg/m³)	Traço
Cimento	442	1,00
Areia Grossa	396	0,90
Areia Média	398	0,90
Brita 1 reativa	911	2,06
Aditivo	4,86	0,01
Água	170	0,38

Fonte: Autora (2026).

O processo de protensão refere-se à fabricação de dormentes de concreto protendido, moldados em forma com capacidade para três unidades (Figura 18) utilizando 22 fios de aço de 6 mm de diâmetro cada, tensionados por pré-tração. Os fios foram passados pelos porta-cunhas instalados nas cabeceiras da forma, posicionados conforme o gabarito do dormente, e utilizado um macaco hidráulico acoplado a cada fio, com controle por manômetro. Cada fio foi tensionado até a carga especificada e alongamento de 35mm, e então, foi ancorado mecanicamente nas cabeceiras por meio de cunhas alojadas nos porta-cunhas, mantendo a força de protensão sem necessidade de manter o macaco acoplado ao sistema. O concreto foi lançado nas formas e adensado mecanicamente (por meio de vibradores). O processo de cura foi realizado ao ar, sem processo de molhagem. Corpos de prova cilíndricos foram moldados em paralelo à produção, inclusive para verificação da resistência. A liberação da força de protensão só ocorreu após a confirmação laboratorial dentro de 48 horas de que o concreto atingiu mínimo de 30 MPa, conforme o critério de projeto. Com 24 horas o resultado de resistência à compressão foi de 26,37 MPa e com 48 horas, a resistência foi de 32,93 MPa.

Figura 18: Processo de protensão e concretagem dos dormentes



Fonte: Grupo de pesquisa DurAE (2025).

• Armazenamento

Após 28 dias, os dormentes e corpos de prova moldados foram imersos em solução de 1N de NaOH (Figura 19) e posicionados em câmara de temperatura a 60 ± 2 °C. As amostras foram mantidas no tanque até as idades/níveis de expansão de ensaio. A temperatura de 60 °C com imersão em solução de NaOH foi utilizada com bases em estudo que comprova o aumento da velocidade da reação álcali-agregado nessas condições (Baret *et al.*, 2025).

Figura 19: Dormentes imersos em solução na câmara de temperatura



Fonte: Autora (2026).

• Monitoramento da expansão

Para acompanhar o desenvolvimento das reações, foram realizadas medições dimensionais quinzenais/semanais a partir do 7 dia após as amostras serem colocadas em exposição. Foram utilizados corpos de prova cilíndricos 10 cm x 20 cm com parafusos metálicos fixados com resina epóxi tixotrópica em suas faces como pinos de referência. Para a medição, foi utilizado um micrômetro de 30 cm, com precisão de 0,001 mm (Figura 20).

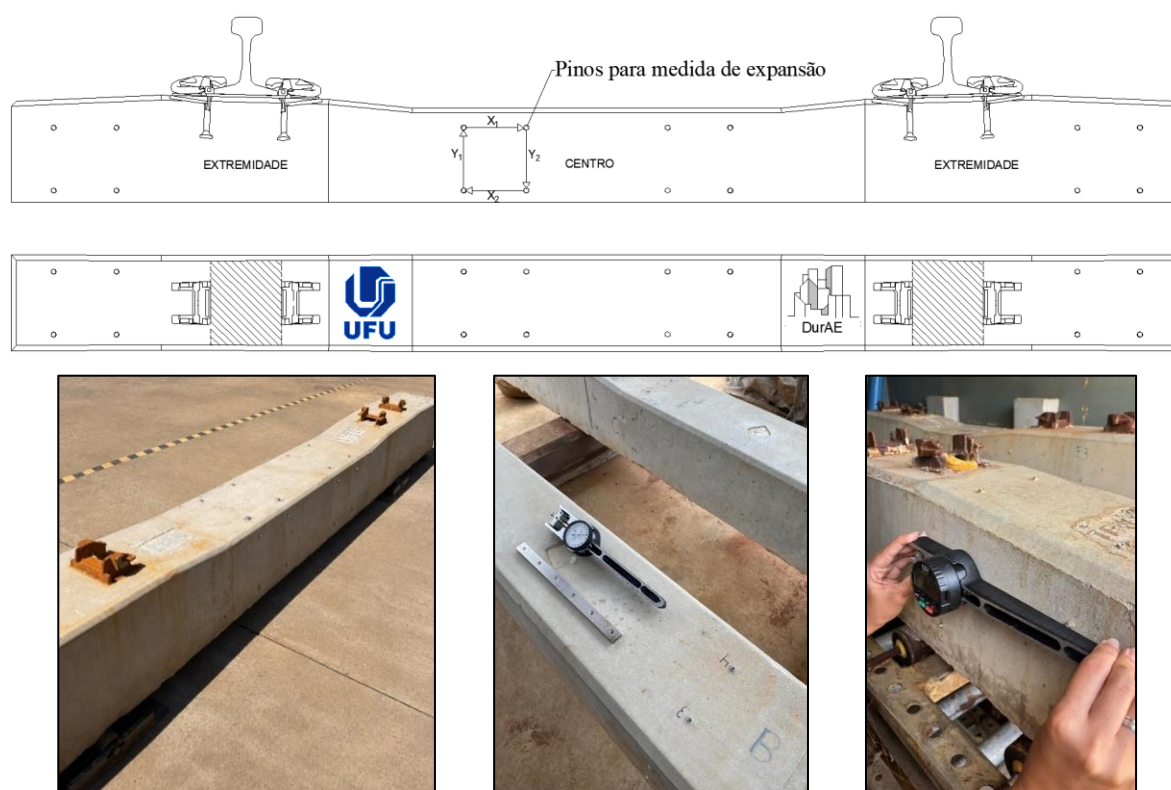
Figura 20: Medição de expansão em corpos de prova



Fonte: Autora (2026)

Além das medições de expansão realizadas nos corpos de prova, um dos dormentes produzidos foi instrumentado com pinos metálicos de aço inoxidável, posicionados em regiões previamente definidas ao longo do elemento, conforme apresentado na Figura 21. Os pinos foram organizados em conjuntos quadrangulares nas três faces monitoradas do dormente, contemplando regiões de centro e de extremidade. Em cada conjunto, as variações dimensionais foram medidas com o dormente íntegro, e quando a expansão nos corpos de prova atingiu 0,05% e 0,12%. Para cada região avaliada, a expansão em x foi obtida pela média das quatro leituras na direção x da região, enquanto a expansão em y foi obtida pela média das leituras na direção y da região.

Figura 21: Monitoramento de expansão no dormente



Fonte: Autora (2026).

• Caracterização do concreto

As amostras foram ensaiadas em todos os níveis de expansão especificados e aos 28 dias, visando a caracterização do concreto em diferentes estágios de degradação. Os ensaios realizados estão apresentados no Quadro 1 e na Figura 22.

Quadro 1: Ensaios de caracterização e normas técnicas

	Ensaio	Norma utilizada	Norma brasileira equivalente
Caracterização mecânica	Compressão axial	ASTM C39/C39M:2021	ABNT NBR 5739:2018
	Tração por compressão diametral	ASTM C496/C496M:2017	ABNT NBR 7222:2011
	Módulo de elasticidade estático	ASTM C469/C469M:2022	ABNT NBR 8522-1:2021
Ensaio não destrutivo	Módulo de elasticidade dinâmico por frequência ressonante	ASTM C215:2019	ABNT NBR 8522-2:2021
Avaliação do nível de dano	<i>Stiffness Damage Test</i> (SDT)	-	-
	<i>Damage Rating Index</i> (DRI)	-	-
Microscopia	Microscopia eletrônica de varredura/ Espectroscopia de energia dispersiva (MEV – EDS)	-	-

Fonte: A autora (2026).

• *Stiffness Damage Test* (SDT)

O *Stiffness Damage Test* (SDT) é um ensaio laboratorial no qual uma amostra de concreto é submetida a cinco ciclos de carregamento, com tensão máxima correspondente a 40% da resistência à compressão do concreto e taxa de carregamento de 0,1 MPa/s. O resultado primário do ensaio é a curva tensão-deformação, obtida a partir da carga registrada por uma célula de carga e da deformação calculada com base no deslocamento médio medido por três transdutores lineares de deslocamento (LVDTs) posicionados na amostra. A partir dessa resposta, são determinados o *Stiffness Damage Index* (SDI) e o *Plastic Deformation Index* (PDI). O SDI representa a parcela de energia dissipada durante os ciclos de carregamento em relação à energia total aplicada, enquanto o PDI expressa a parcela de deformação plástica acumulada em relação à deformação total registrada no ensaio.

• **Damage Rating Index (DRI)**

O ensaio *Damage Rating Index* (DRI) consiste na quantificação sistemática de feições petrográficas de deterioração em amostras de concreto. O procedimento é realizado em uma superfície previamente cortada e polida, analisada com o auxílio de um estereomicroscópio com ampliação entre 15 e 16 vezes. Após a preparação da amostra, uma malha de 10 × 10 milímetros é traçada sobre a superfície de análise, permitindo a avaliação individual de cada área. Em cada quadrícula, as feições petrográficas observadas são identificadas e classificadas conforme os critérios apresentados no Quadro 2. O valor final do DRI é então calculado pela soma ponderada das ocorrências de cada tipo de dano, multiplicando-se a quantidade registrada pelo respectivo fator de ponderação.

Quadro 2: Tipos de danos considerados para o DRI e seus fatores de peso para ponderação do dano

Característica dos mecanismos de deterioração	Abreviação	Fator de ponderação
Fissura fechada no agregado	CCA	0,25
Fissura aberta no agregado	OCA	2
Fissura aberta no agregado com produto de reação	OCAG	2
Agregado graúdo descolado	CAD	3
Partícula de agregado desagregada/ corroída	DAP	2
Fissura na pasta de cimento	CCP	3
Fissura na pasta de cimento com produto de reação	CCPG	3

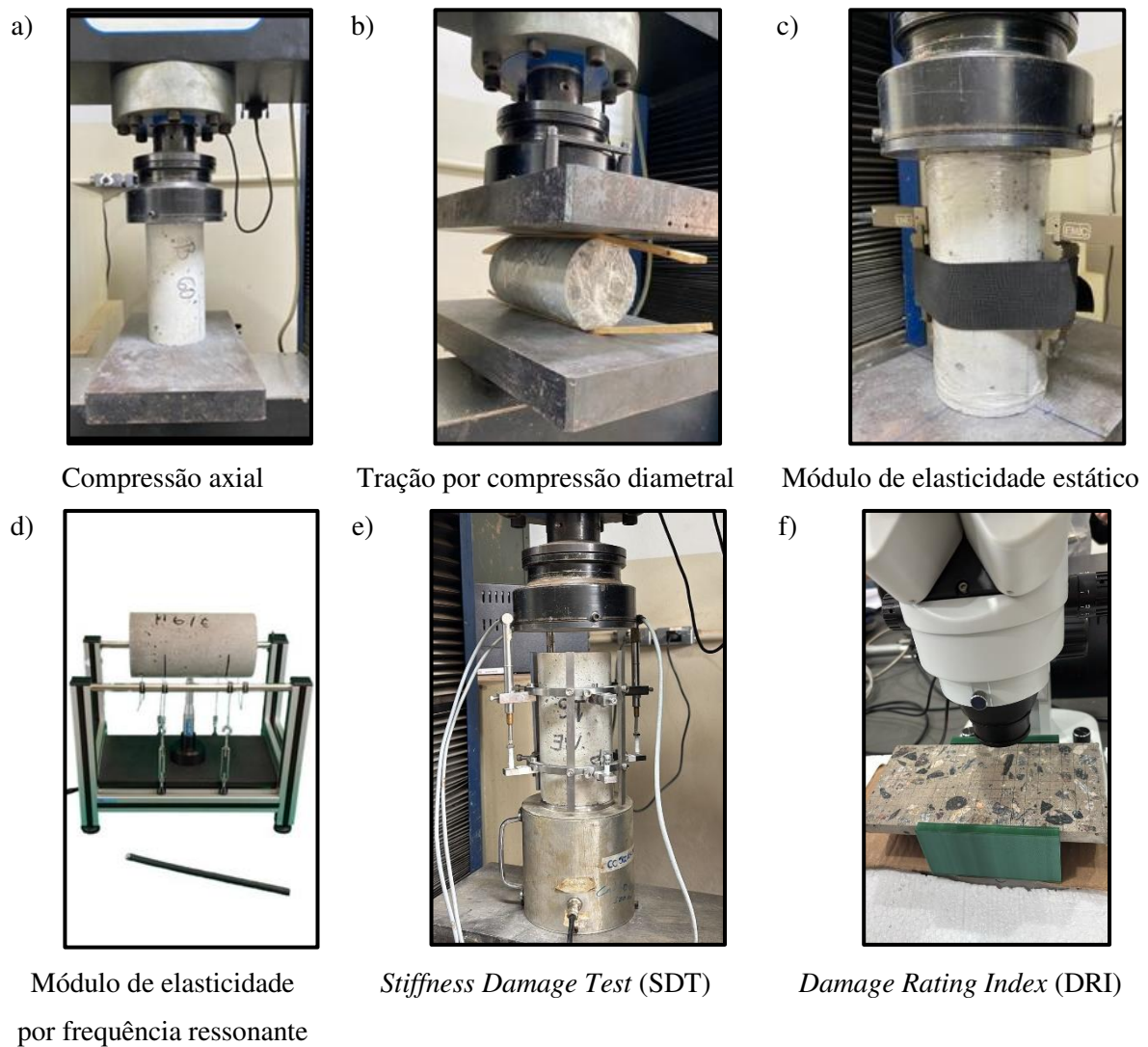
Fonte: A autora (2026).

• **Microscopia eletrônica de varredura – MEV/EDS**

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplada à Espectroscopia por Energia Dispersiva de Raios X (EDS) é um método de ensaio visual, capaz de registrar a microestrutura do concreto e identificar qualitativamente a composição química de produtos formados nos poros, fissuras e interfaces pasta-agregado. Neste estudo, o MEV/EDS foi utilizado para localizar regiões com possível presença de gel álcali-sílica e identificar padrões de fissuração no agregado. A análise concentrou-se em fragmentos representativos do concreto, especialmente nas interfaces pasta-agregado, poros preenchidos e fissuras internas nos grãos

retirados de uma metade do corpo de prova. Ao cortar o CP de 10x20 mm longitudinalmente foi possível identificar essas fases de interesse e fragmentar em amostras menores para essa análise. As imagens de MEV permitiram observar a morfologia dos produtos e a trajetória das fissuras, enquanto o EDS foi aplicado em pontos selecionados para verificar elementos compatíveis com gel, principalmente silício, cálcio, sódio e potássio.

Figura 22: Ensaios de caracterização



Fonte: DurAE (2025) e Autora (2026).

A quantidade de corpo de prova ensaiado por nível de dano está exposta na Tabela 4.

Tabela 4: Quantidade de corpo de prova cilíndrico 10 cm x 20 cm por ensaio

Ensaio	28 dias	0,05%	0,12%	0,3%
Compressão axial	2	2	2	2
Tração por compressão diametral	1	1	1	1
Módulo de elasticidade dinâmico	3*			
Módulo de elasticidade estático	1	1	1	1
SDT	2	2	2	2
MEV/DRI	1	1	1	1
Expansão	6			
Total:	37			

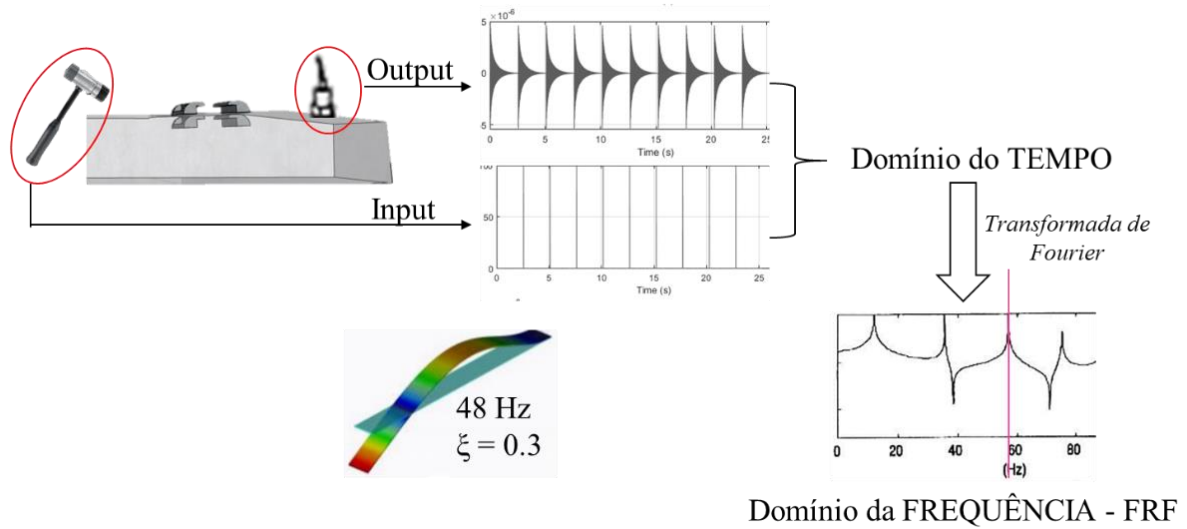
*Por se tratar de um ensaio não destrutivo, os corpos de prova são os mesmos para todos os níveis.

Fonte: Autora (2026).

3.2 ENSAIOS DE ANÁLISE MODAL

Após a caracterização e indução dos danos nos níveis especificados, foi realizada a análise modal experimental nos dormentes de concreto para extração das propriedades dinâmicas referente a cada nível/tipo de dano conforme resumo da Figura 23.

Figura 23: Etapas resumidas da análise modal em dormentes de concreto



Fonte: Autora (2026)

3.2.1 Configuração experimental

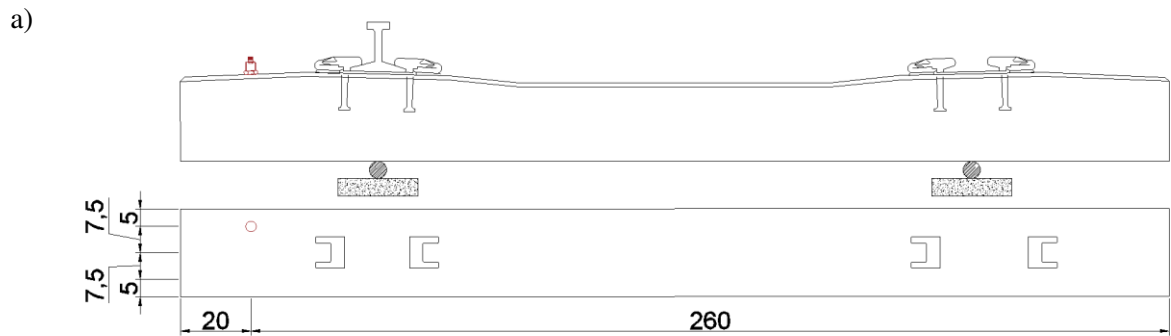
Cada dormente foi posicionado sobre apoios rígidos metálicos com superfície de contato mínima, de modo que o sistema de apoio interferiu minimamente nos resultados. Um martelo instrumentado de 1,4 quilogramas foi utilizado para excitar o dormente em pontos definidos, enquanto 1 acelerômetros piezoelétricos uniaxial de sensibilidade de 1.000mV/g foi posicionado na região de extremidade do dormente para captar a resposta vibratória. A aquisição de dados foi feita através do aquisitor de dados HBM *Quantum MX840b*, enquanto o sistema de leitura a utilizado foi o *Catman Easy AP 5.4* com aquisição de dados em 9.600 Hz.

Mais detalhes do posicionamento do acelerômetro e escolha da ponteira do martelo podem ser encontrados no APÊNDICE A – DEFINIÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DE ENSAIO DE ANÁLISE MODAL EM DORMENTES.

3.2.2 Pontos de excitação e medição:

Foi posicionado, conforme Figura 24, o ponto de medição de aceleração. O local de posicionamento do acelerômetro foi mantido constante entre os diferentes grupos de dormentes para garantir a comparabilidade dos dados modais entre grupos similares.

Figura 24: Posicionamento do acelerômetro no dormente



Medidas em centímetro (cm).



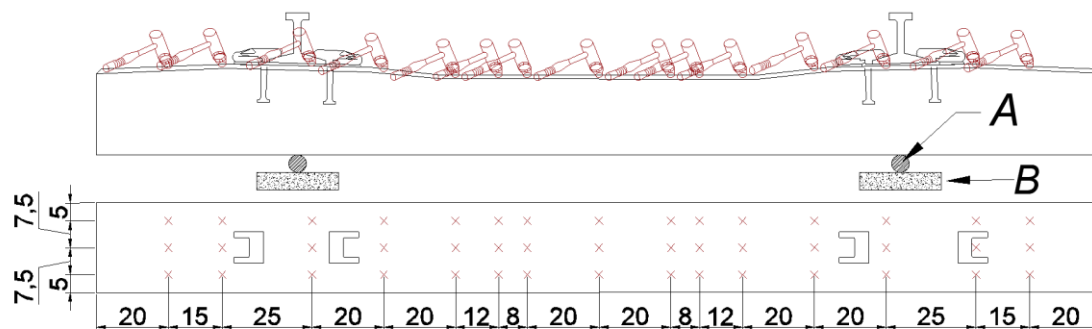
Fonte: Autora (2026).

A localização dos impactos que foram aplicados no dormente está disposta na Figura 25, sendo ao total 45 pontos distribuídos ao longo do elemento com 5 batidas por ponto.

O local selecionado para o posicionamento do acelerômetro e para os impactos do martelo foram escolhidos de modo a evitar os nós modais, nos quais não há deslocamento mensurável.

Figura 25: Localização das batidas de martelo no dormente

a)



Medidas em centímetro (cm).

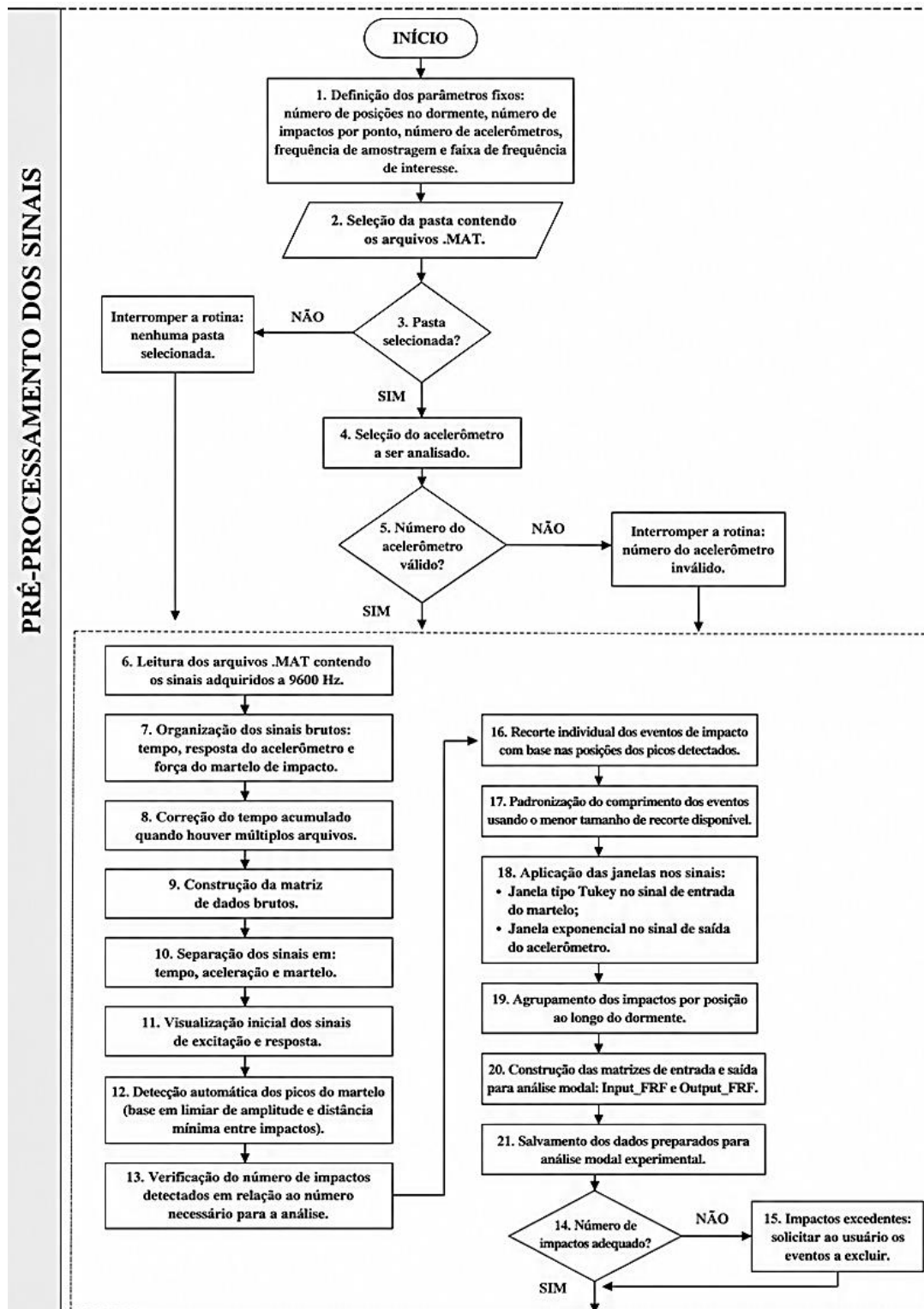
Legenda:

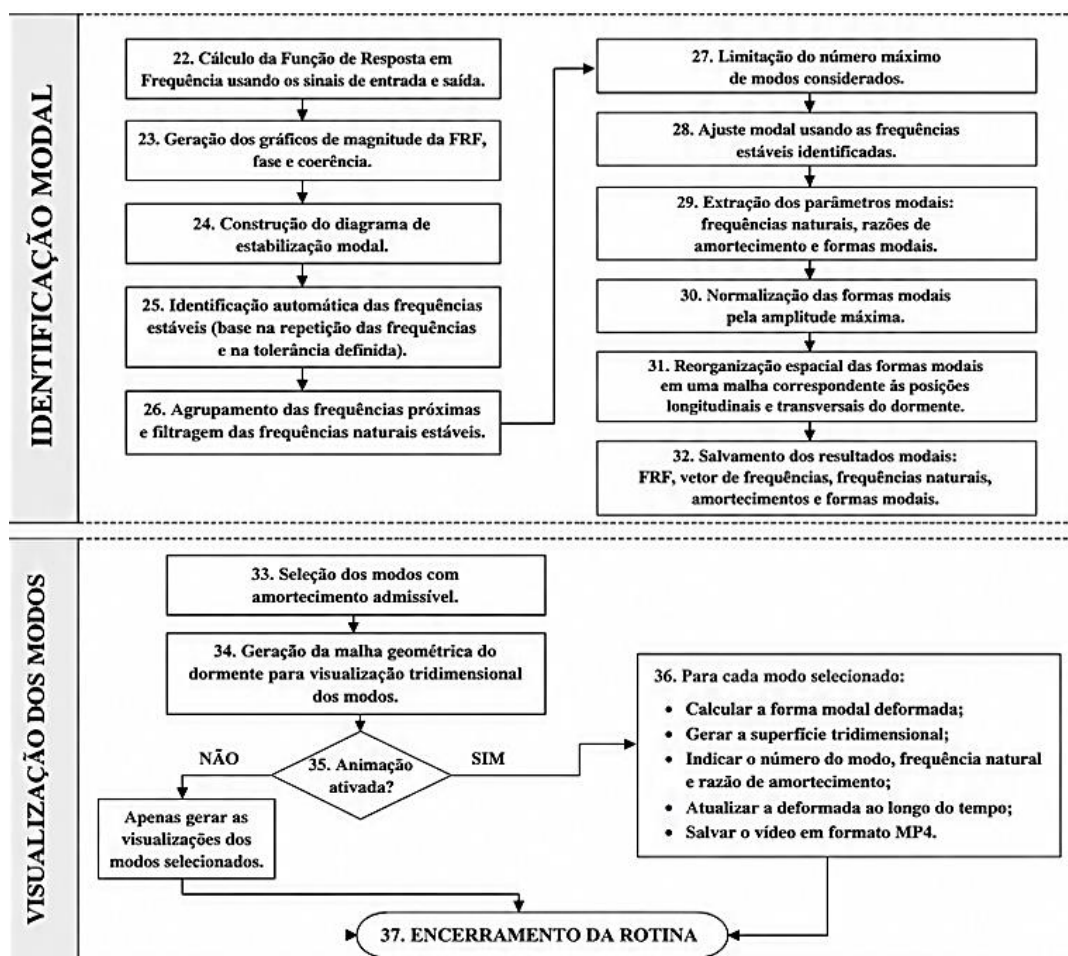
A – Apoio metálico rígido;

B – Apoio de concreto rígido.

3.2.3 Processamento dos sinais e identificação das propriedades dinâmicas

Figura 26: Resumo processamento de sinais - análise modal





Fonte: Autora (2026).

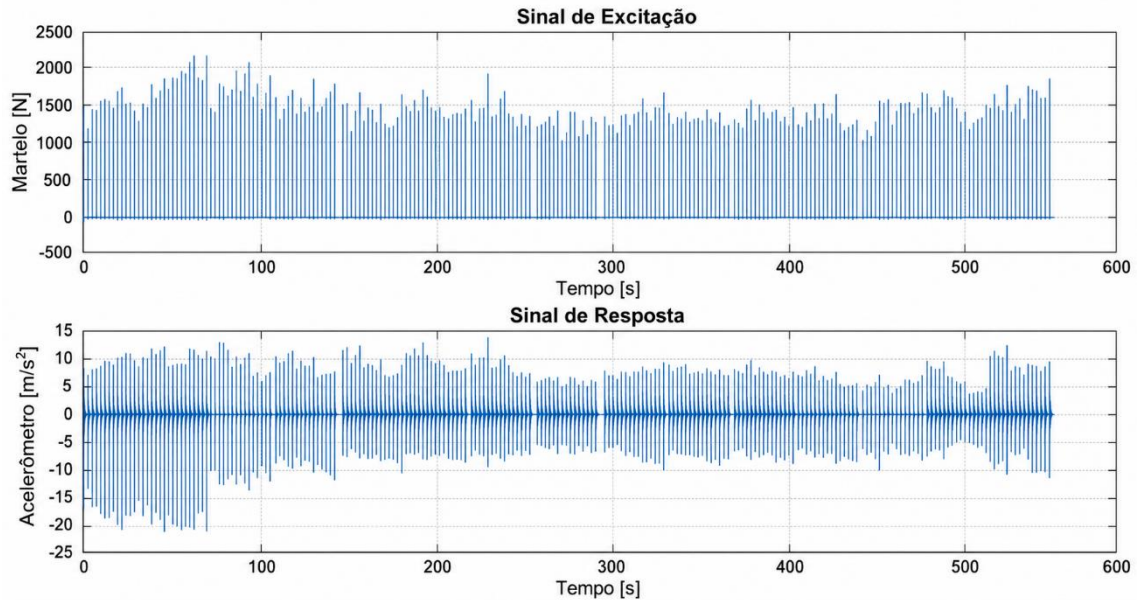
Os sinais obtidos nos ensaios dinâmicos foram processados em ambiente MATLAB, versão 2024a, por meio de um software nomeado *Modal Sleepers* desenvolvido para automatizar a leitura, segmentação e análise dos registros experimentais, conforme resumo da Figura 26.

Para cada dormente, foram importados arquivos no formato *.MAT*, contendo o vetor de tempo, o sinal de resposta do acelerômetro e o sinal de excitação do martelo de impacto. A frequência de amostragem adotada foi de 9600 Hz, e a faixa de frequência de interesse foi limitada entre 100 Hz e 1500 Hz, de modo a concentrar a análise nos modos de vibração relevantes para a resposta dinâmica dos dormentes.

A rotina foi estruturada considerando uma malha experimental composta por 45 posições de impacto, com cinco repetições por posição, totalizando 225 eventos de excitação para cada dormente (Figura 27). A resposta foi registrada por acelerômetro fixo, enquanto a

excitação foi aplicada em diferentes posições ao longo do dormente. Essa configuração corresponde a uma análise modal experimental com entrada móvel e resposta fixa.

Figura 27: Sinais de excitação e de resposta



Fonte: Autora (2026)

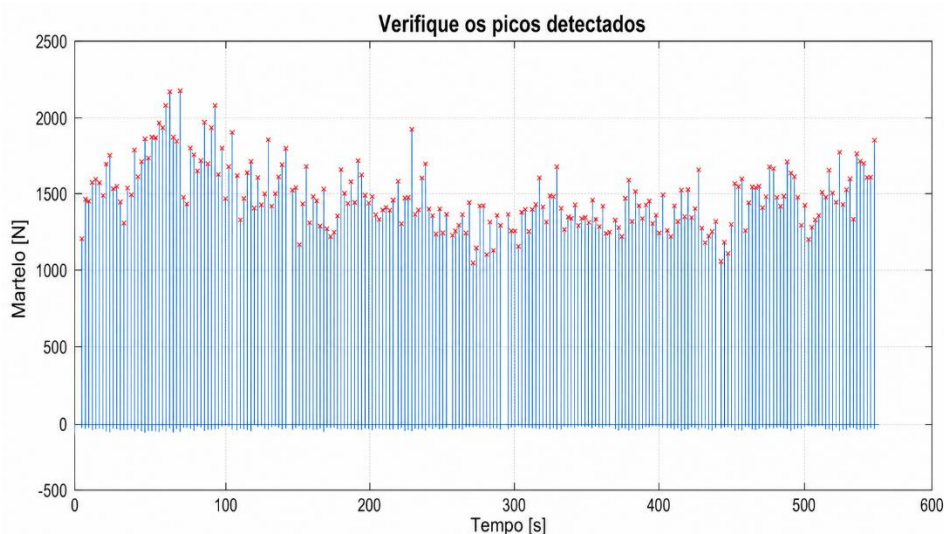
A identificação dos impactos foi realizada automaticamente a partir do sinal do martelo instrumentado. Foram considerados impactos válidos os picos com amplitude superior a 20% da amplitude máxima registrada no sinal de excitação, respeitando uma distância mínima entre eventos equivalente a 0.5 segundo. Após essa etapa, os picos detectados foram representados graficamente sobre o sinal original para permitir verificação visual (Figura 28). Quando necessário, eventos excedentes foram removidos manualmente, garantindo a correspondência entre a sequência dos impactos e a malha de ensaio definida.

Após a detecção dos impactos, os sinais de excitação e resposta foram segmentados em eventos individuais. Cada evento foi recortado a partir de uma pequena janela anterior ao pico do martelo e encerrado antes do impacto subsequente. Em seguida, todos os eventos foram padronizados com base no menor comprimento de sinal registrado entre os impactos. Esse procedimento garantiu que todos os sinais utilizados no cálculo das funções de resposta em frequência apresentassem o mesmo número de amostras.

Antes da análise espectral, foram aplicadas janelas aos sinais processados. O sinal de entrada, correspondente ao martelo, foi multiplicado por uma janela localizada do tipo Tukey,

concentrando a contribuição da excitação no intervalo do impacto. O sinal de saída, correspondente ao acelerômetro, foi multiplicado por uma janela exponencial, com o objetivo de reduzir os efeitos de truncamento e atenuar oscilações residuais no final do registro. Após esse tratamento, as cinco repetições de cada posição foram concatenadas e utilizadas para o cálculo das funções de resposta em frequência.

Figura 28: Picos identificados como válidos



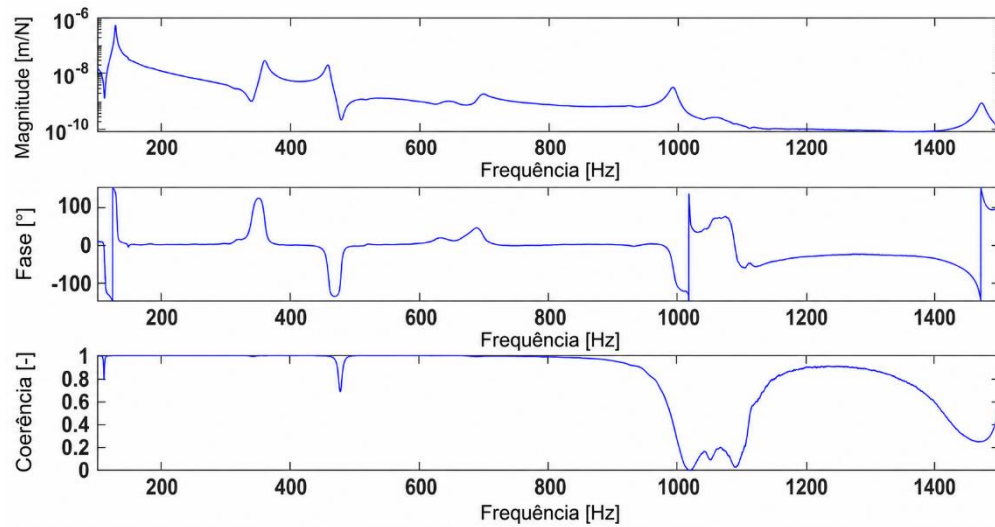
Fonte: Autora (2026)

As funções de resposta em frequência foram calculadas na plataforma MATLAB 2026a por meio da função *modalfrf*, considerando o sinal de força como entrada e o sinal de aceleração como saída. Foi adotado o estimador Hv, com configuração de sensor do tipo acelerômetro e medição do tipo entrada móvel. A qualidade dos sinais foi avaliada pela análise conjunta da magnitude da função de resposta em frequência, da fase e da coerência (Figura 29). A magnitude permitiu identificar regiões associadas a possíveis frequências naturais, enquanto a fase e a coerência auxiliaram na verificação da consistência física e experimental dos dados.

A identificação preliminar dos modos foi realizada por meio de diagramas de estabilização (Figura 30), utilizando o método dos mínimos quadrados complexos exponenciais. Foram consideradas ordens modais crescentes até um máximo de 25 modos, dentro da faixa de frequência entre 100 Hz e 1500 Hz. As frequências candidatas foram filtradas com base em um critério de estabilidade, sendo consideradas estáveis aquelas que se repetiram em pelo menos quatro ordens consecutivas, com variação inferior a 1 Hz. Frequências próximas

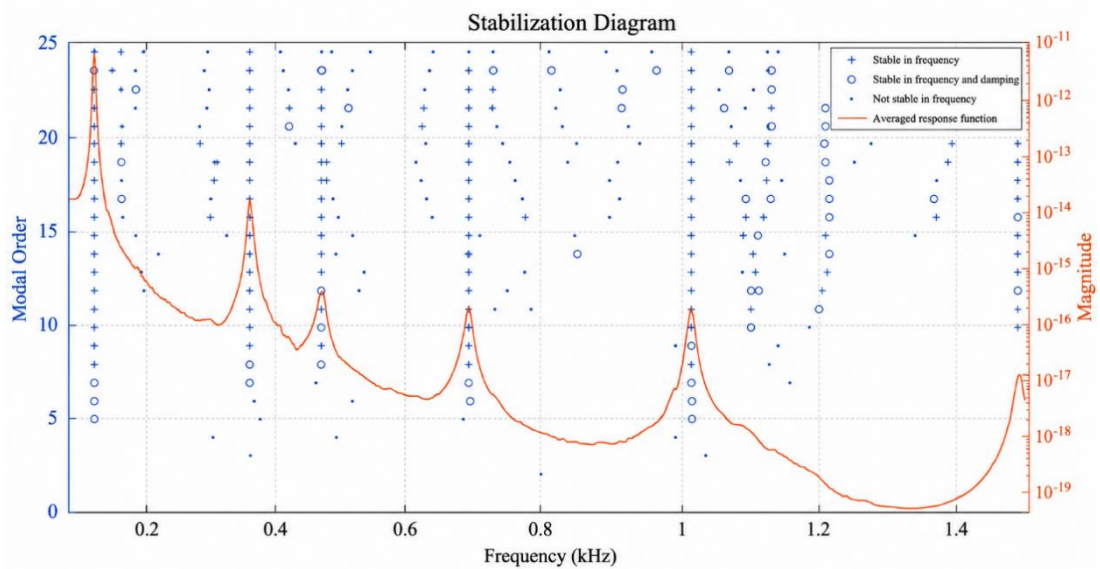
foram agrupadas e representadas pelo valor médio do grupo. Após essa filtragem, foram mantidos os três modos estáveis para o ajuste modal final.

Figura 29: Magnitude, fase e coerência da FRF



Fonte: Autora (2026)

Figura 30: Diagrama de estabilização

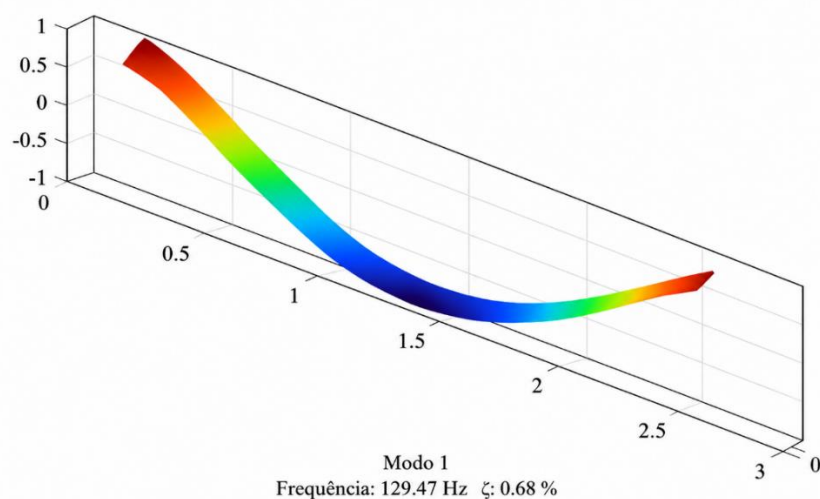


Fonte: Autora (2026)

O ajuste modal final foi realizado com a função *modalfit*, utilizando como entrada as funções de resposta em frequência e as frequências previamente classificadas como estáveis. A partir desse ajuste, foram obtidas as frequências naturais, as razões de amortecimento e as formas modais dos dormentes. As formas modais foram extraídas em termos de magnitude e fase e reorganizadas em uma malha de 3 por 15 pontos, correspondente à distribuição espacial das posições de medição no dormente. A magnitude de cada forma modal foi normalizada pelo maior valor absoluto do respectivo modo, permitindo interpretar a distribuição relativa da resposta ao longo do dormente.

Por fim, as formas modais identificadas foram representadas graficamente em uma malha tridimensional construída a partir das coordenadas dos pontos de medição, conforme Figura 31. Para auxiliar a interpretação dos modos, foram geradas animações harmônicas das deformadas modais, considerando a magnitude e a fase associadas a cada ponto. Apenas modos estáveis com razão de amortecimento inferior ou igual a 5% foram selecionados para essa representação, de modo a priorizar modos com maior consistência experimental. Esse procedimento permitiu relacionar as propriedades dinâmicas obtidas com o comportamento global do dormente, incluindo frequências naturais, amortecimento e configuração espacial das formas modais.

Figura 31: Configuração espacial das formas modais



Fonte: Autora (2026)

3.2.4 *Análise estatística dos parâmetros modais*

A análise estatística foi realizada com o objetivo de verificar se os parâmetros modais obtidos no ensaio de análise modal experimental foram influenciados pelo tipo e pelo nível de dano aplicado ao dormente de concreto. Foram considerados dois parâmetros de resposta: a variação da frequência natural e o amortecimento. Inicialmente, os resultados foram agrupados conforme o tipo de dano, considerando as condições de *center bound*, dano no apoio do trilho e expansão. Em seguida, as análises foram conduzidas separadamente para cada tipo de dano, considerando os respectivos níveis de severidade.

Para avaliar o efeito dos fatores investigados, aplicou-se análise de variância de um fator (ANOVA), adotando-se nível de significância de 5%. A hipótese nula considerou que as médias dos grupos comparados eram estatisticamente iguais, enquanto a hipótese alternativa considerou a existência de diferença significativa entre pelo menos dois grupos. Quando a ANOVA indicou efeito significativo, realizou-se o teste de comparações múltiplas de Duncan, também ao nível de significância de 5%, para identificar quais grupos apresentavam diferenças estatisticamente significativas entre si.

Os resultados foram apresentados por meio de tabelas contendo soma dos quadrados, graus de liberdade, quadrado médio, valor de F, p-valor e F crítico. Para os casos em que o teste de Duncan foi aplicado, as médias foram organizadas em grupos homogêneos, nos quais letras iguais indicam ausência de diferença estatística significativa, enquanto letras distintas indicam diferença significativa entre os grupos. Essa abordagem permitiu avaliar se as alterações observadas nos parâmetros modais estavam associadas ao tipo de dano, ao aumento do nível de dano ou à variabilidade experimental do ensaio.

4 RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS DANOS INDUZIDOS

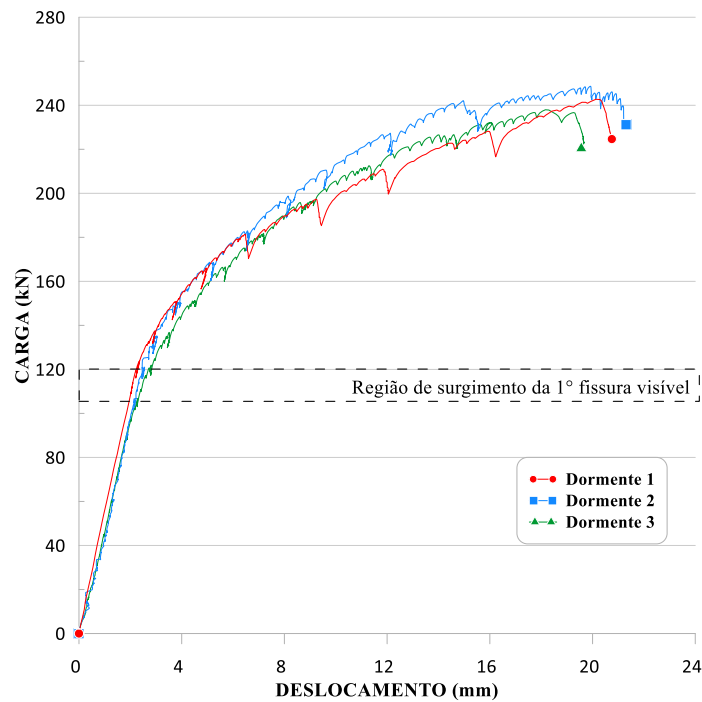
Este capítulo apresenta os resultados obtidos no programa experimental, organizados em dois conjuntos. O primeiro conjunto corresponde à caracterização dos danos induzidos nos dormentes, incluindo as cargas de referência, os níveis de carregamento adotados, os mapas de fissuração, a expansão do concreto e os ensaios de caracterização associados à reação expansiva. O segundo conjunto apresenta os parâmetros modais identificados experimentalmente, incluindo frequências naturais, razões de amortecimento e formas modais dos três primeiros modos de vibração.

4.1.1 *Center Bound*

A carga máxima de ruptura na condição de *center bound* foi determinada a partir do ensaio de três dormentes submetidos ao carregamento até a ruptura no aparato experimental. As curvas carga *versus* deslocamentos correspondentes são apresentadas na Figura 32. Os valores de deslocamento apresentados no gráfico referem-se a média dos LVDT's posicionados nas extremidades direita e esquerda do dormente. Esses valores foram corrigidos pela remoção dos deslocamentos associados à deformabilidade da borracha e do conjunto de apoio, permitindo isolar a resposta estrutural do dormente.

Os dormentes de caracterização apresentaram cargas máximas de 242,72 kN, 248,62 kN e 237,96 kN, com deslocamentos máximos de 20,75 mm, 21,30 mm e 19,65 mm, respectivamente. A média das cargas resultou em Q_{rupCB} igual a 243,1 kN. Com base nesse valor, os níveis de carregamento adotados para a indução de dano por *center bound* foram: 60,77 kN, 145,80 kN e 218,79 kN, correspondentes a 25%, 60% e 90% de Q_{rupCB} . Nos três dormentes ensaiados até a ruptura, observou-se esmagamento localizado do concreto, sem evidência de ruptura dos fios de protensão.

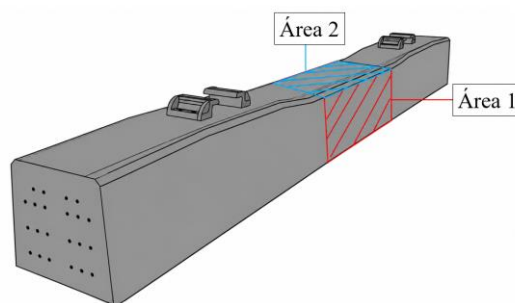
Figura 32: Curva carga *versus* deslocamento - Dormentes de caracterização *center bound*



Fonte: Autora (2026)

O mapa de fissuração foi monitorado nas áreas de interesse indicadas na Figura 33 , correspondentes à face lateral central e à face superior central.

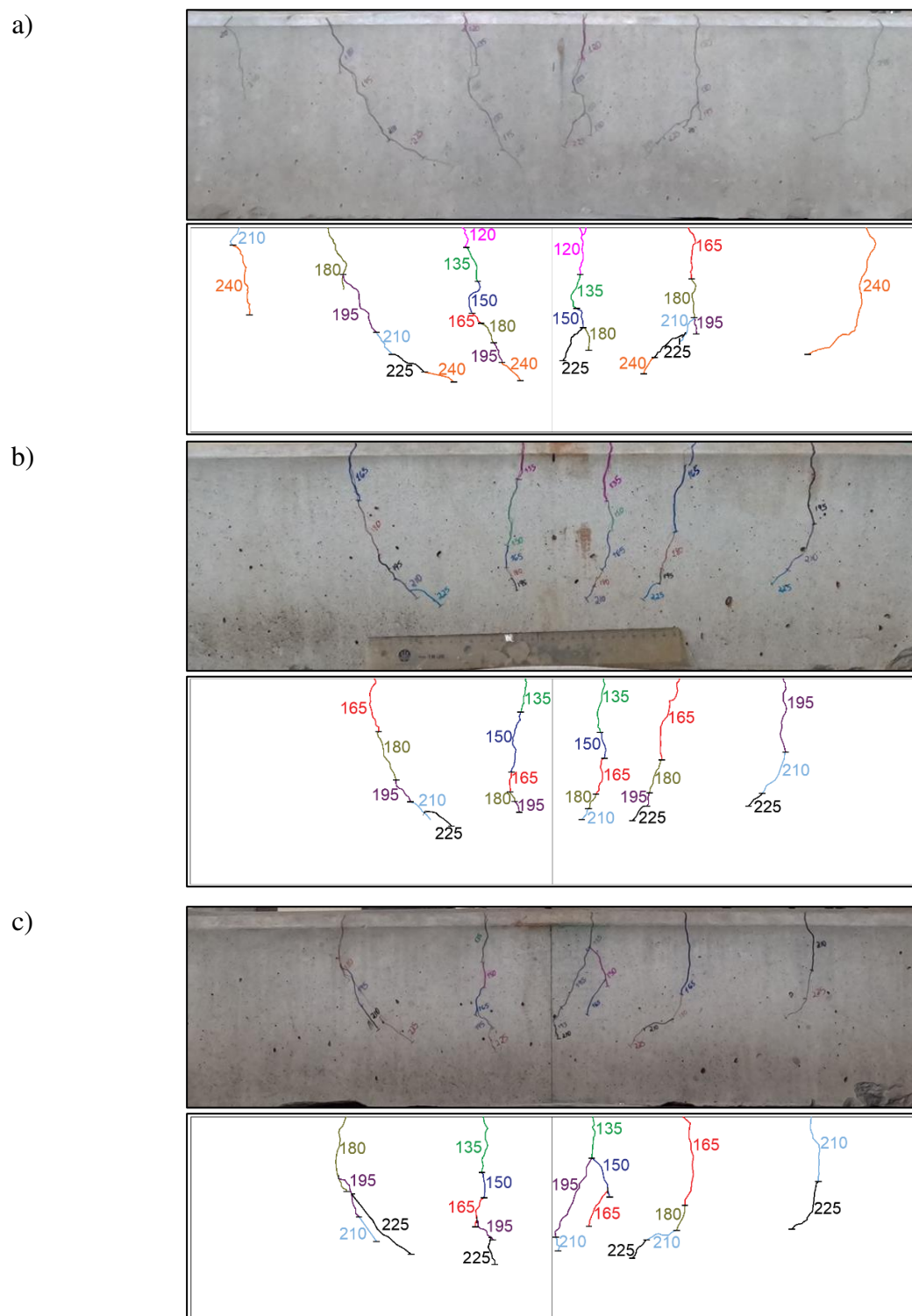
Figura 33: Áreas de interesse para mapa de fissuração por *center bound*



Fonte: Autora (2026)

A Figura 34 apresenta a evolução dos padrões de fissuração dos três dormentes ensaiados até a ruptura na condição de *center bound*, na área 1 de interesse. Os registros foram organizados em diferentes níveis de carregamento (a cada 15 kN) até a ruptura. As fissuras para esse dano, iniciaram-se na região lateral do dormente e se propagaram ao longo da altura e topo da seção.

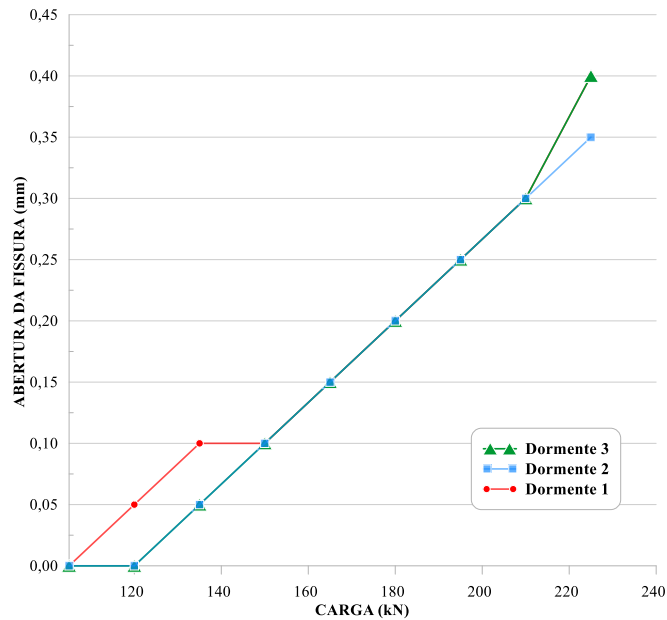
Figura 34: Mapa de fissuração dos dormentes até ruptura em carga (kN) por dano de *center bound* – a) D1 b) D2 c) D3



Fonte: Autora (2026)

A abertura da primeira fissura foi monitorada a cada nível de carga através de um fissurômetro. Os dados da largura da abertura em mm encontram-se na Figura 35.

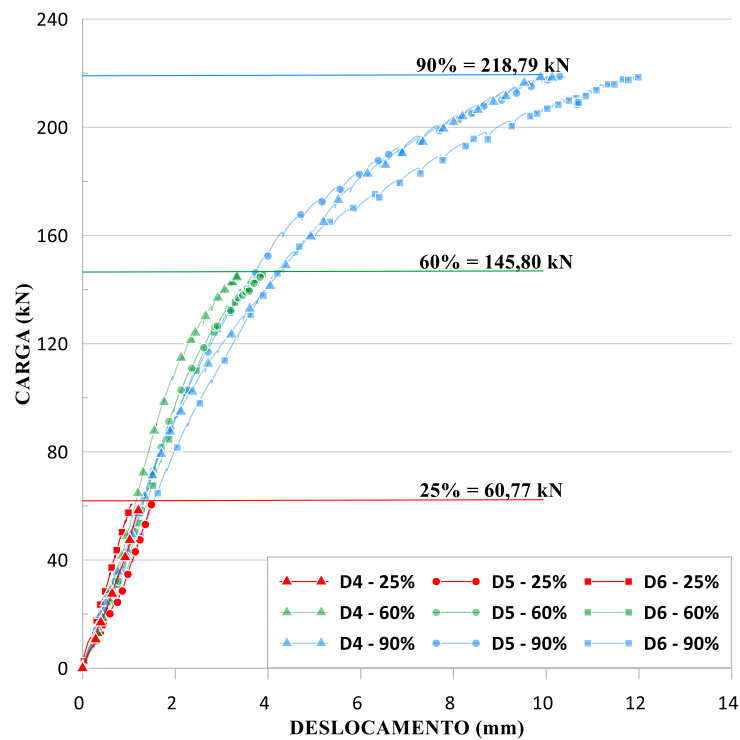
Figura 35: Monitoramento da abertura da primeira fissura por *center bound*



Fonte: Autora (2026)

Após a definição dos níveis de carregamento, três novos dormentes foram submetidos aos patamares de carga estabelecidos. As curvas carga *versus* deslocamento desses ensaios são apresentadas na Figura 36.

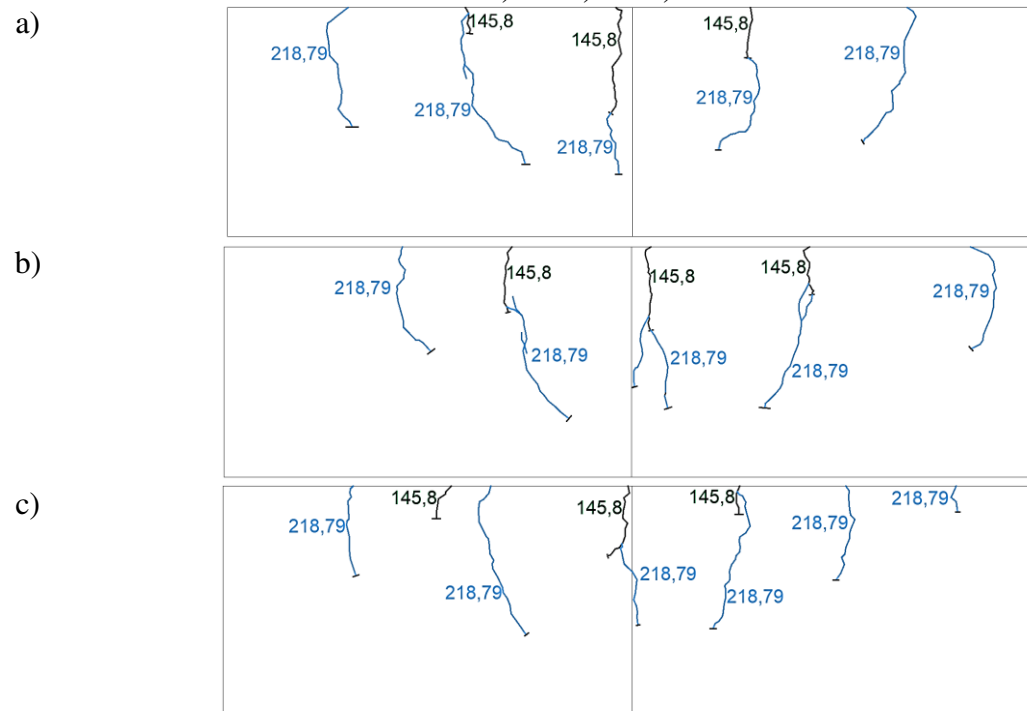
Figura 36: Curva carga *versus* deslocamento dos dormentes nos níveis de carga estabelecidos – *center bound*



Fonte: Autora (2026)

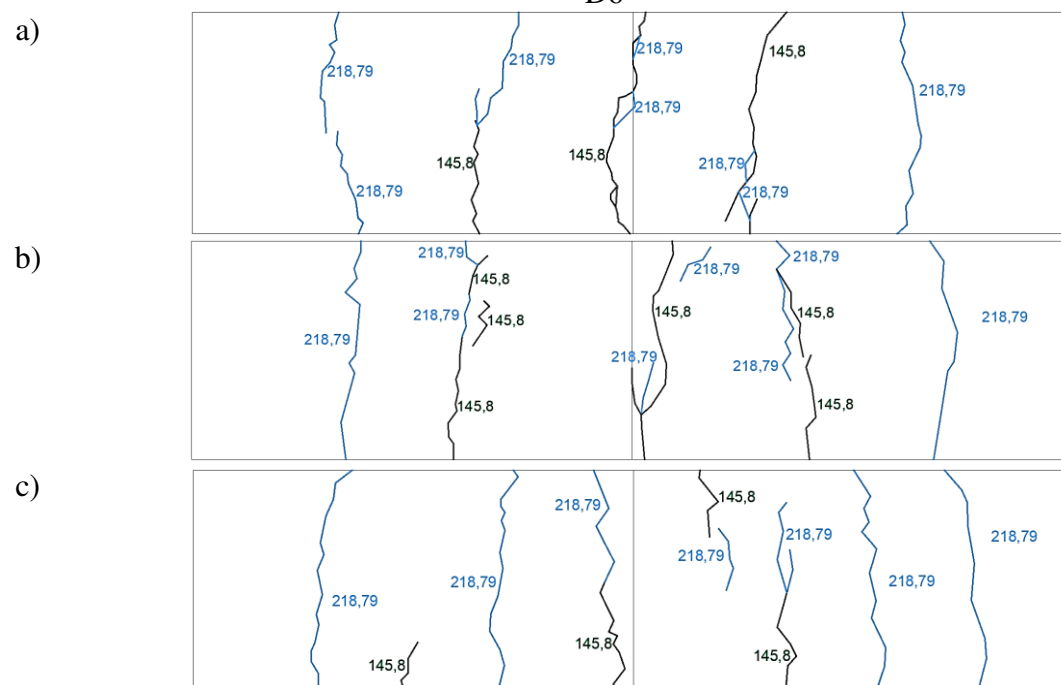
Nos dormentes submetidos a 25% de Q_{rupCB} , não foram observadas fissuras visualmente aparentes. Nos níveis de 60% e 90%, os mapas de fissuração registrados nas faces lateral (área 1) e superior (área 2) são apresentados nas Figura 37 e Figura 38.

Figura 37: Evolução das fissuras pela face lateral nos níveis de carga (kN) estabelecidos –
a) D4 b) D5 c) D6



Fonte: Autora (2026)

Figura 38: Evolução das fissuras na face superior para os níveis de carga– a) D4 b) D5 c) D6

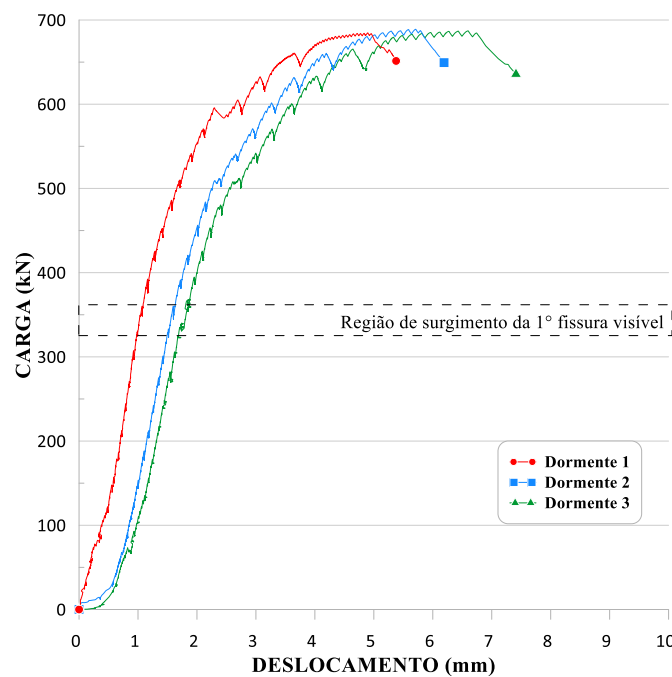


Fonte: Autora (2026)

4.1.2 Fissuração no apoio do trilho

A carga máxima de ruptura na condição de apoio do trilho foi determinada a partir do ensaio de três dormentes ensaiados até a ruptura na configuração desse ensaio. As curvas carga *versus* deslocamentos são apresentadas na Figura 39. Os deslocamentos correspondem às leituras obtidas pelo transdutor posicionado no centro da região de apoio do trilho.

Figura 39: Curva carga versus deslocamento - Dormentes de caracterização apoio do trilho

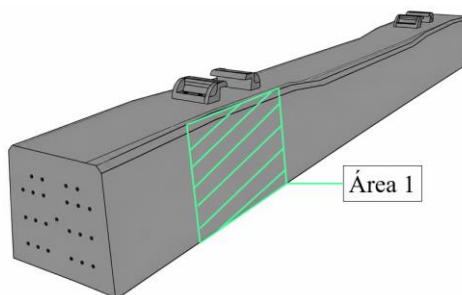


Fonte: Autora (2026)

Os dormentes de caracterização apresentaram cargas máximas de 684,73 kN, 688,96 kN e 687,05 kN, com deslocamentos máximos de 5,37 mm, 6,19 mm e 7,41 mm, respectivamente. A média das cargas máximas resultou em Q_{rupAP} igual a 686,91 kN. Com base nesse valor, os níveis de carregamento adotados foram de 171,73 kN, 412,15 kN e 549,52 kN, correspondentes a 25%, 60% e 80% de Q_{rupAP} .

Nos três dormentes ensaiados até a ruptura, observou-se esmagamento localizado do concreto, sem evidência de ruptura dos fios de protensão. A área de interesse para o mapeamento da fissuração é indicada na Figura 40.

Figura 40: Áreas de interesse para mapa de fissuração no apoio do trilho

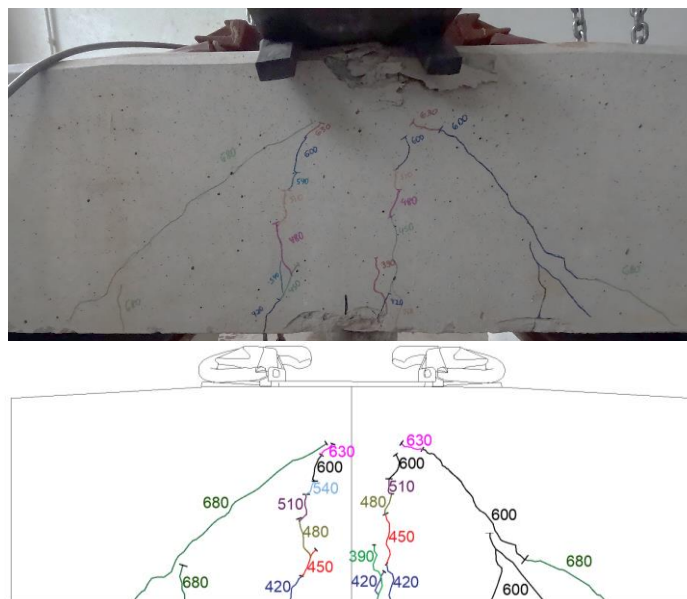


Fonte: Autora (2026)

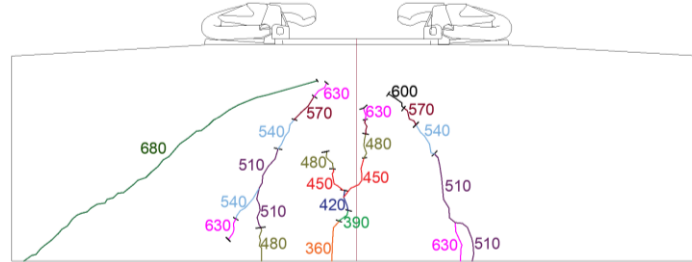
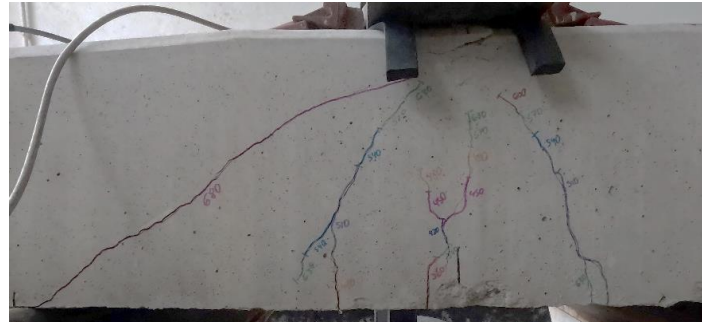
A evolução dos mapas de fissuração dos dormentes de caracterização é apresentada na Figura 41. Os registros foram organizados em diferentes níveis de carregamento (a cada 30 kN) até a ruptura.

Figura 41: Mapa de fissuração dos dormentes até ruptura apoio do trilho – a) D1 b) D2 c) D3

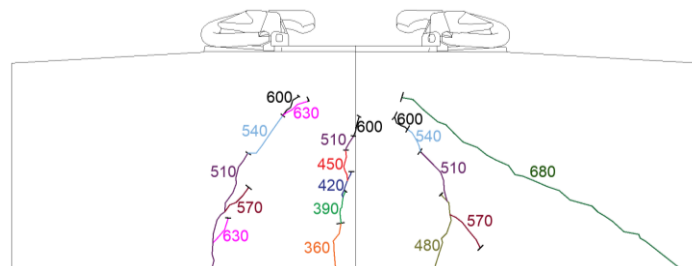
a)



b)



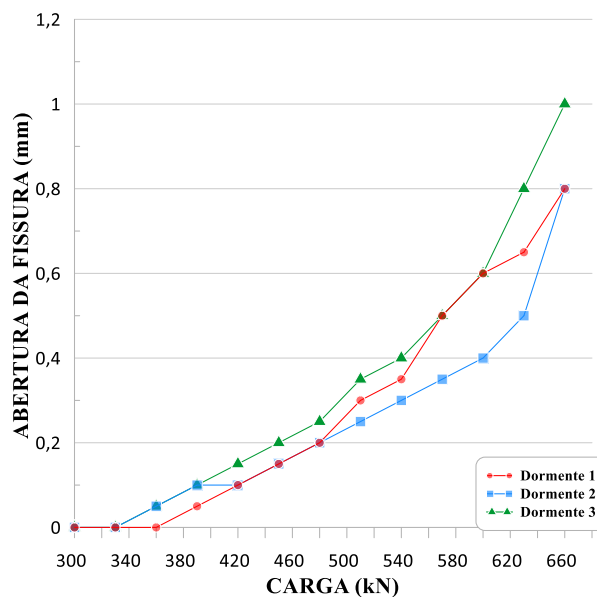
c)



Fonte: Autora (2026)

A abertura da primeira fissura foi monitorada a cada nível de carga através de um fissurômetro. Os dados da largura da abertura em mm encontram-se na Figura 42.

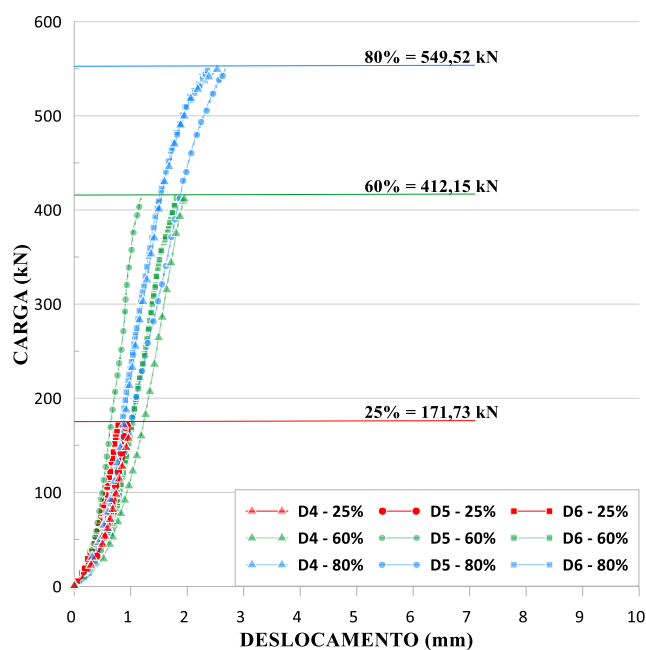
Figura 42: Monitoramento da abertura da primeira fissura apoio do trilho



Fonte: Autora (2026)

Após a definição dos níveis de carregamento, três novos dormentes foram submetidos aos patamares de carga estabelecidos. As curvas carga versus deslocamento são apresentadas na Figura 43.

Figura 43: Curva carga *versus* deslocamento dos dormentes nos níveis de carga estabelecidos – apoio do trilho



Fonte: Autora (2026)

Nos dormentes submetidos a 25% de QrupAP, não foram observadas fissuras visualmente aparentes. Nos níveis de 60% e 80%, a evolução da fissuração na região do apoio do trilho é apresentada na Figura 44.

Figura 44: Evolução das fissuras pelo apoio do trilho – a) D4 b) D5 c) D6

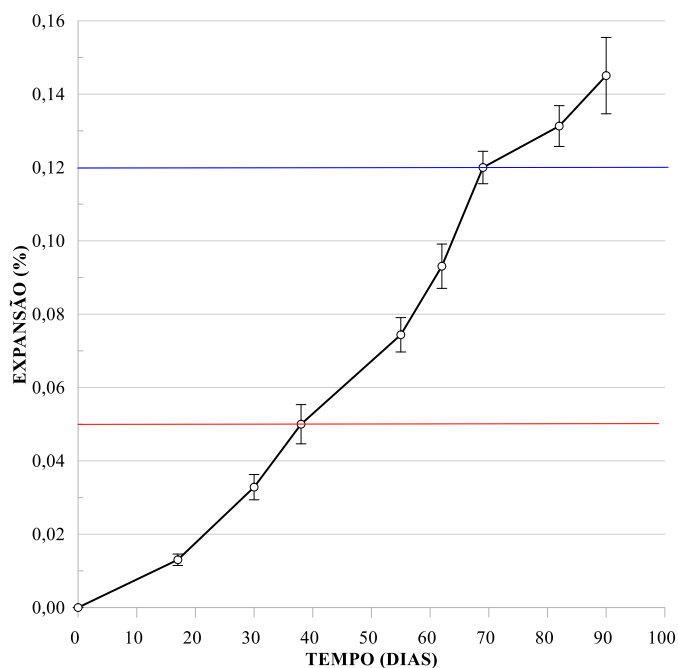


Fonte: Autora (2026)

4.1.3 Fissuração por reação expansiva interna

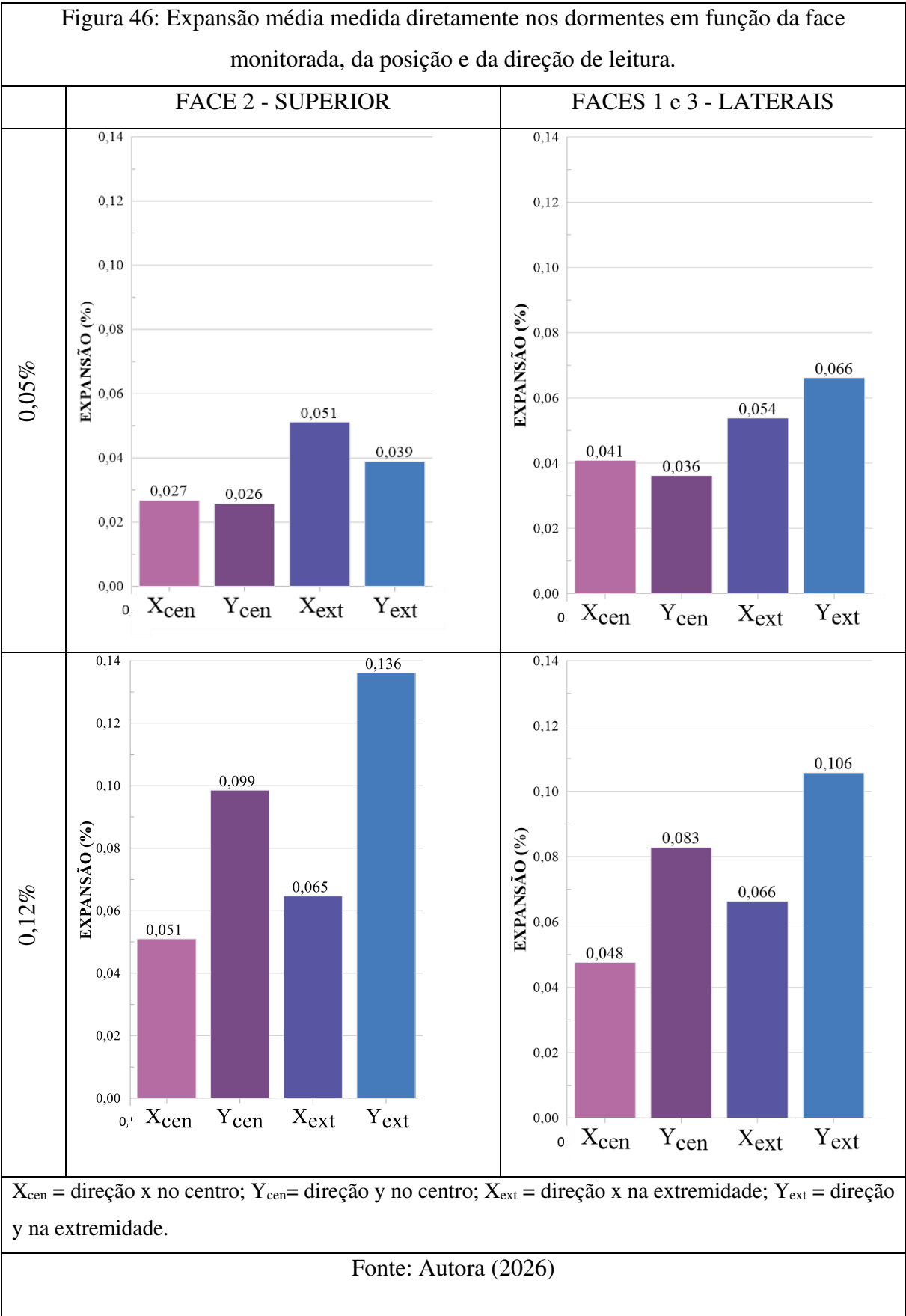
Os dormentes e corpos de prova moldados com agregado reativo foram mantidos em condição acelerada de exposição, imersos em solução de 1N de NaOH a 60°C. Os níveis de expansão avaliados até esta etapa foram 0,05% e 0,12%. O nível inicialmente previsto de 0,30% não foi atingido no período considerado. A evolução da expansão medida nos corpos de prova é apresentada na Figura 45:

Figura 45: Monitoramento da expansão em corpos de prova



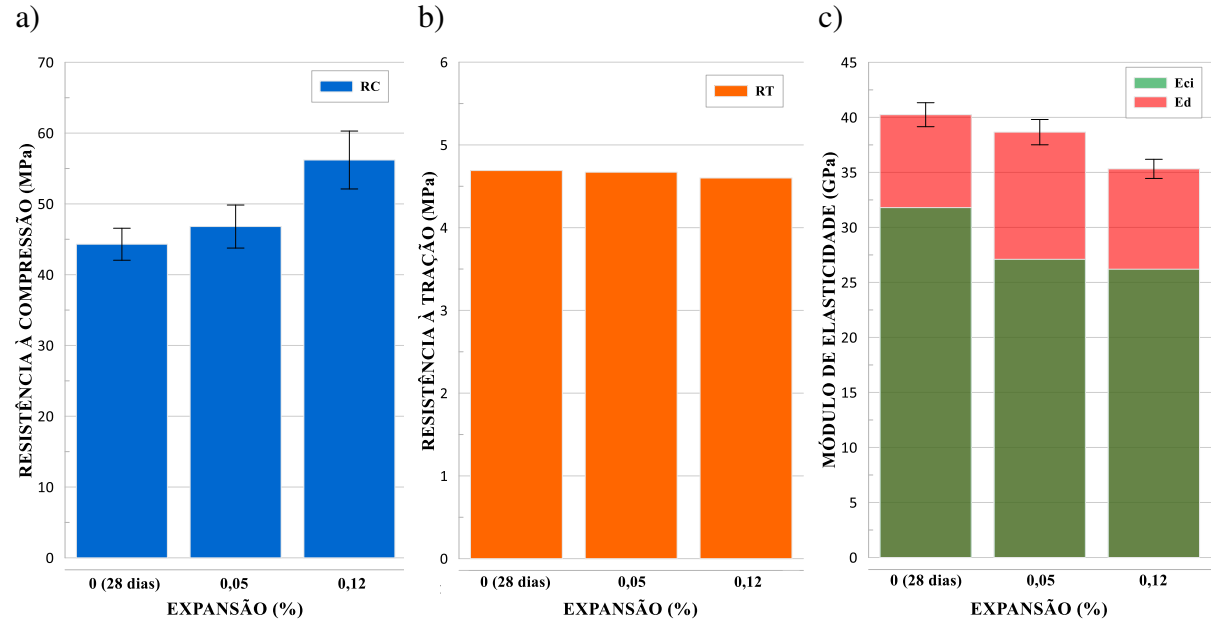
Fonte: Autora (2026)

A expansão monitorada diretamente no dormente foi obtida a partir de leituras nas direções x e y, nas regiões de centro e extremidade, em três faces do elemento. Os resultados são apresentados na Figura 46. A maior diferença entre direções foi registrada na Face 2, no nível de 0,12%, em que a leitura Yext atingiu 0,136%, enquanto a leitura Xext foi igual a 0,065%. A Face 2 corresponde a face superior do dormente, enquanto o resultado das faces laterais foi exposto a partir da média da expansão das Faces 1 e 3 devido ao seu comportamento semelhante.



A Figura 47 apresenta os resultados de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico. A Tabela 5 apresenta as variações percentuais dessas propriedades em relação à condição de 28 dias. No nível de 0,05%, foram registrados aumento de 5,6% na resistência à compressão, redução de 0,4% na resistência à tração, redução de 3,9% no módulo de elasticidade dinâmico e redução de 14,8% no módulo de elasticidade estático. No nível de 0,12%, foram registrados aumento de 26,9% na resistência à compressão, redução de 1,9% na resistência à tração, redução de 12,2% no módulo de elasticidade dinâmico e redução de 17,6% no módulo de elasticidade estático.

Figura 47: Resistência a compressão, tração e módulos de elasticidade do concreto



Fonte: Autora (2026)

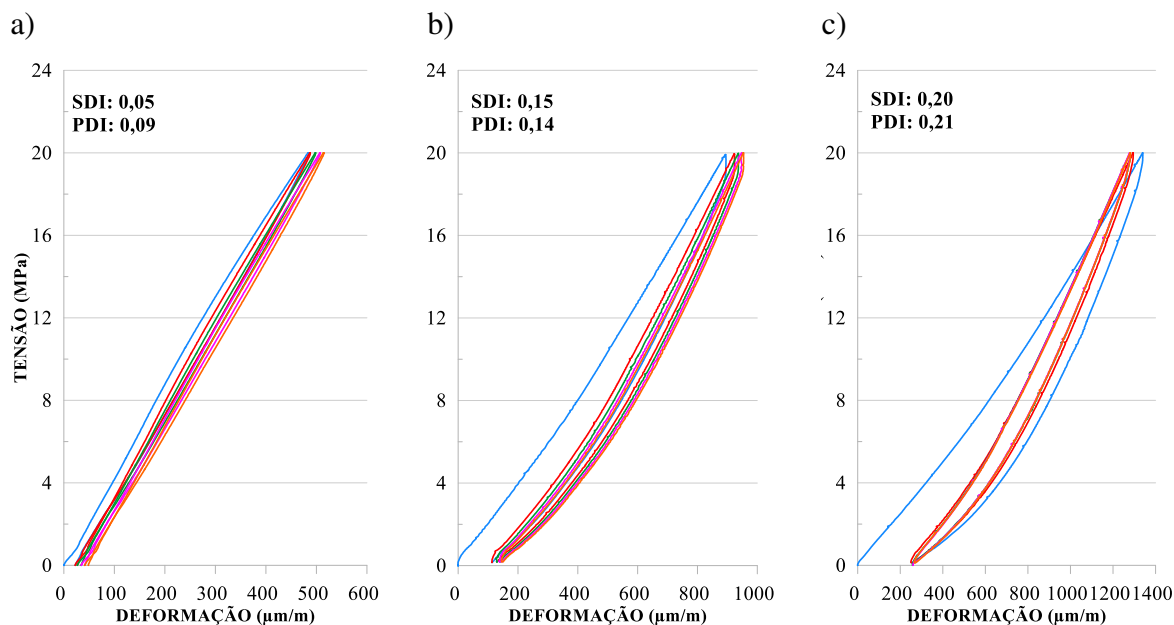
Tabela 5: Variação percentual das propriedades mecânicas em função da expansão do concreto

Expansão /Propriedade	RC	RT	ME dinâmico	ME estático
0% (28 dias)	0	0	0	0
0,05%	+ 5,6%	- 0,4%	- 3,9%	- 14,8%
0,12%	+ 26,9%	- 1,9%	- 12,2%	- 17,6%

Fonte: Autora (2026)

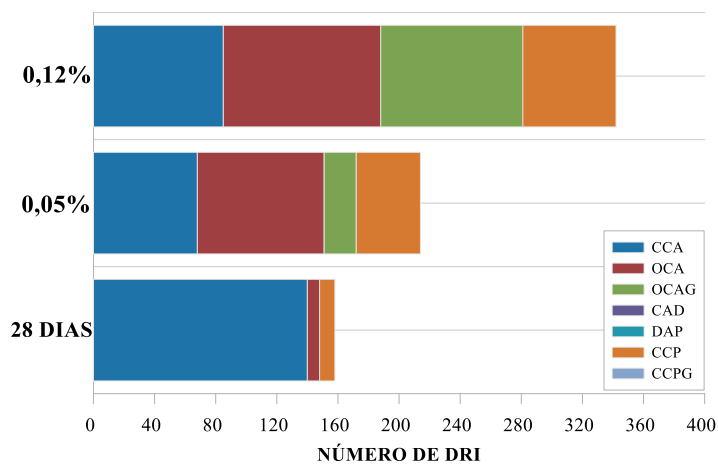
Os resultados do *Stiffness Damage Test* são apresentados na Figura 48 e os resultados do *Damage Rating Index* são apresentados na Figura 49.

Figura 48: Resultados SDT para os níveis atingidos – a) Íntegro; b) 0,05% c) 0,12%.



Fonte: Autora (2026)

Figura 49: Resultado do número de DRI

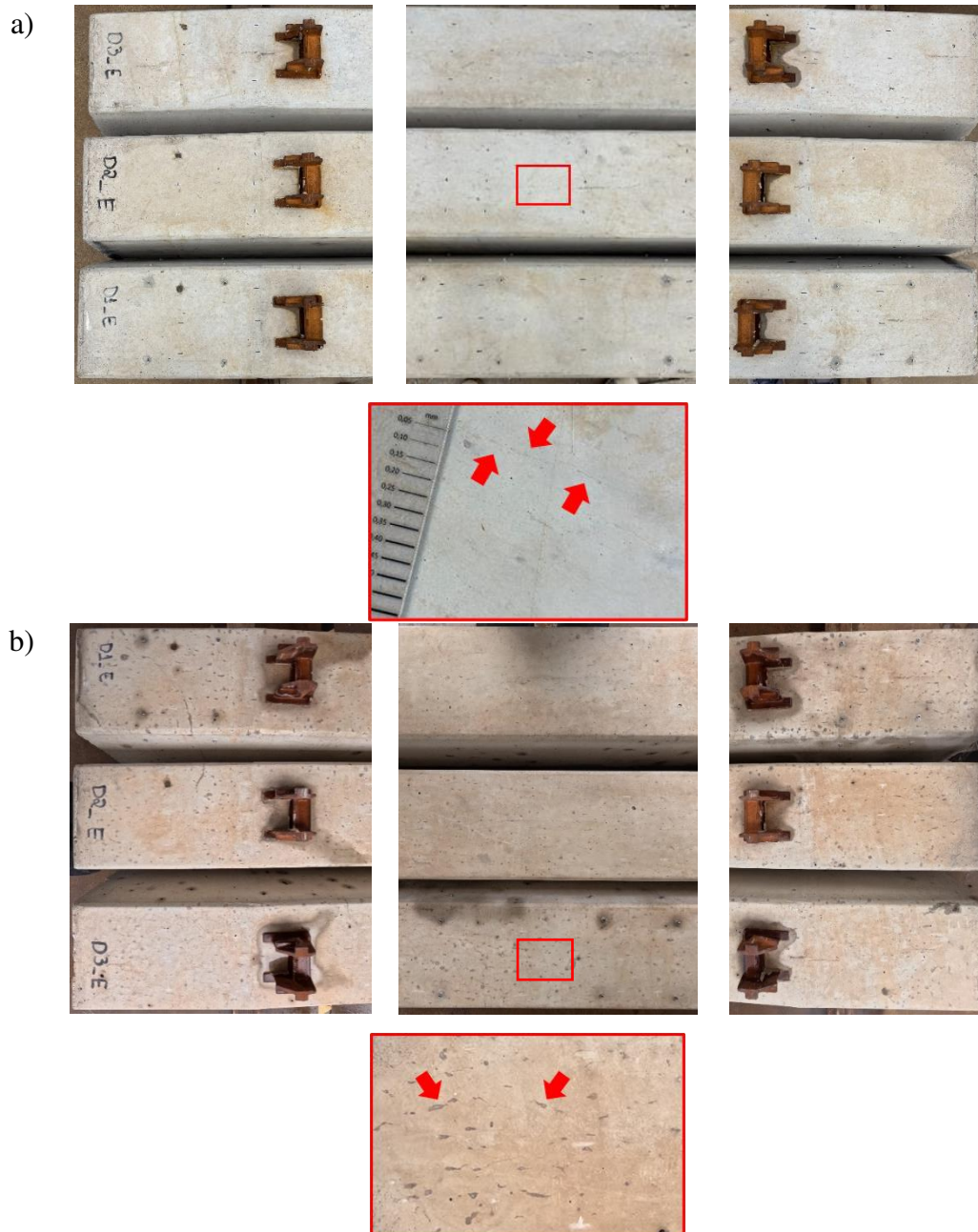


CCA – Fissura fechada no agregado; OCA – Fissura aberta no agregado; OCAG – Fissuras no agregado com produto de reação; CAD – Agregado desagregado; DAP - Agregado descolado/corroído; CCP – Fissura na pasta de cimento; CCPG – Fissura na pasta de cimento com produto de reação.

Fonte: Autora (2026)

A inspeção visual dos dormentes nos níveis de expansão de 0,05% e 0,12% é apresentada na Figura 50. No nível de 0,05%, foram observadas fissuras com abertura máxima de 0,10 mm e comprimento máximo de 5 cm. No nível de 0,12%, foram observadas fissuras com abertura máxima de 0,25 mm, comprimentos de até 7 cm e presença de produtos de reação na superfície.

Figura 50: Inspeção visual dormentes: a) 0,05%; b) 0,12%



Fonte: Autora (2026)

A área total de fissuração visível na face superior dos dormentes é apresentada na Tabela 6. No nível de 0,05%, as áreas medidas foram 327,5 mm², 336,2 mm² e 332,6 mm² para os dormentes D1, D2 e D3, respectivamente. No nível de 0,12%, as áreas medidas foram 795,4 mm², 789,9 mm² e 806,2 mm².

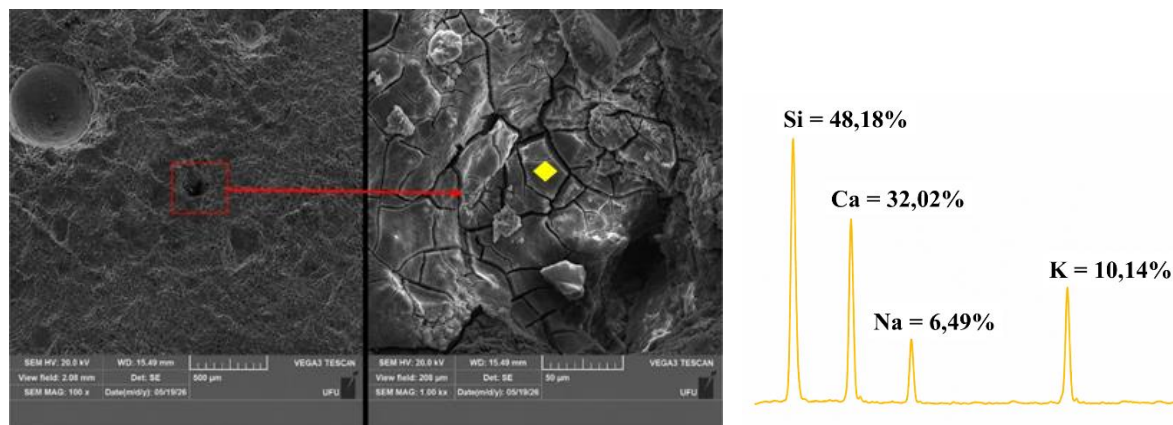
Tabela 6: Área de fissura nos dormentes

Nível de expansão	D1	D2	D3	Média
0,05%	327,5 mm ²	336,2 mm ²	332,6 mm ²	332,1mm
0,12%	795,4 mm ²	789,9 mm ²	806,2 mm ²	797,2mm

Fonte: Autora (2026)

As análises por microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia por energia dispersiva são apresentadas nas Figura 51 e Figura 52. A análise química pontual do gel presente no poro indicou relações atômicas (Na+K)/Si=0,34 e Ca/Si=0,66. Embora o valor de Ca/Si seja superior à faixa típica de 0,2–0,3 reportada para produtos de RAS no interior dos agregados, Leemann *et al.* (2016) indicam que produtos extrudados para a pasta ou acumulados em vazios podem incorporar mais cálcio e se aproximar da composição do C–S–H.

Figura 51: MEV com EDS de gel de reação álcali sílica

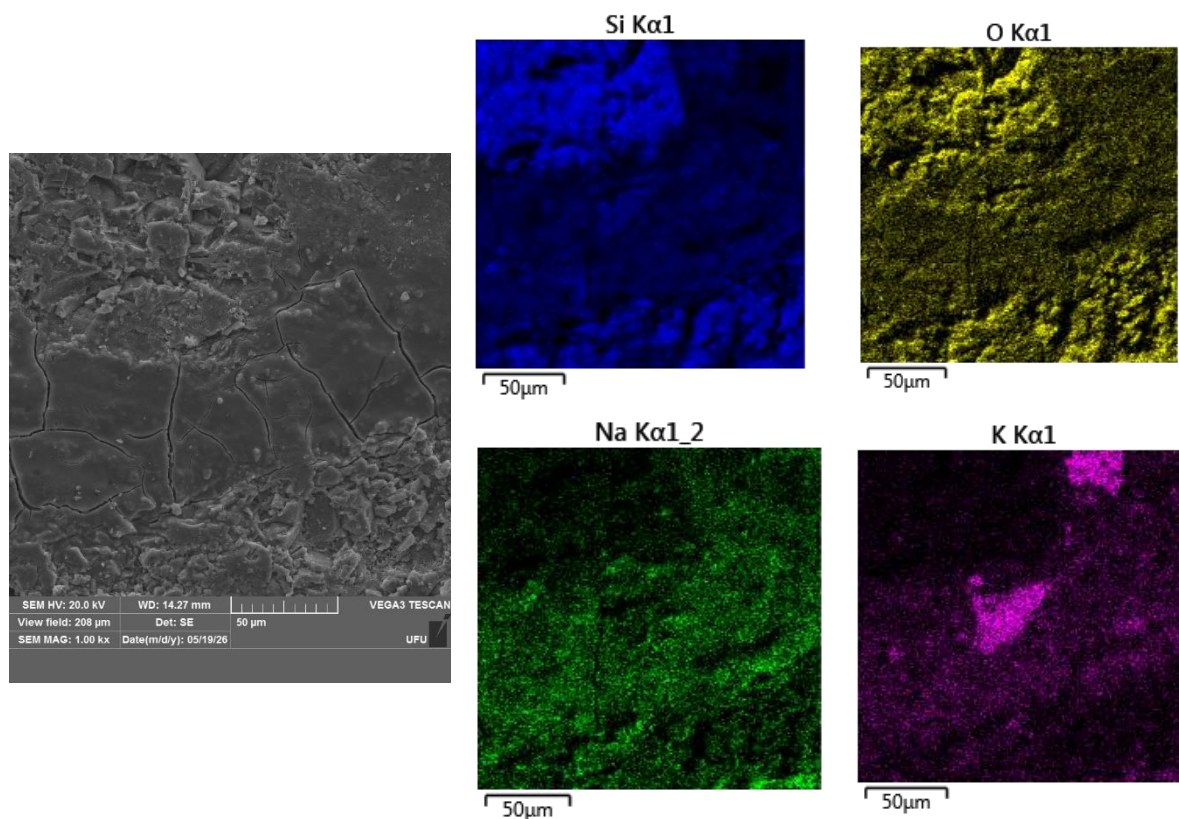


Fonte: Autora (2026)

Além da análise pontual da composição química, uma região da amostra foi submetida ao mapeamento químico por espectroscopia por energia dispersiva (EDS). Essa análise permitiu identificar a distribuição espacial dos principais elementos químicos presentes na área selecionada, por meio da intensidade de cor atribuída a cada elemento. Nas imagens obtidas por

mapeamento químico, observa-se que a região central, onde o material apresenta-se com comportamento quebradiço, apresenta maior concentração de sódio (Na) e potássio (K) conforme Figura 52.

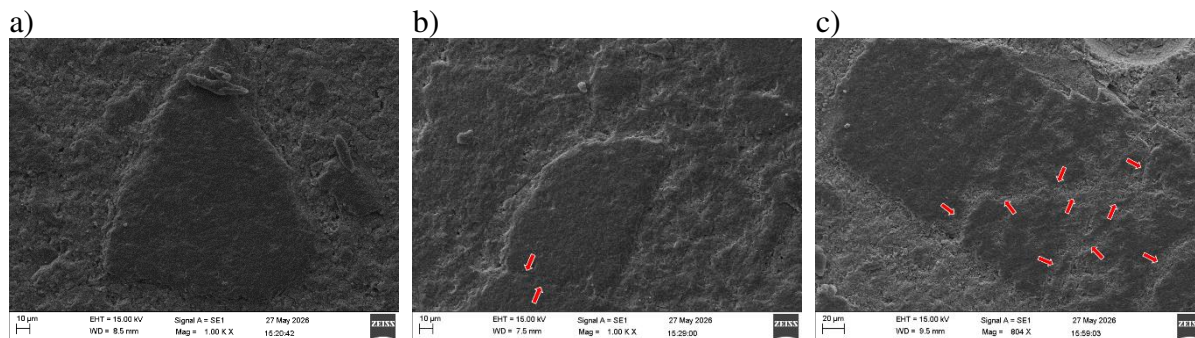
Figura 52: Mapeamento químico por área no EDS



Fonte: Autora (2026)

Na Figura 53, os agregados são avaliados nas condições íntegra, 0,05% e 0,12%, mostrando diferentes níveis de fissuração interna. Na amostra íntegra, observou-se um agregado sem evidências de fissuração aparente (Figura 53a). Para o nível de expansão de 0,05%, foi identificada uma fissura localizada no agregado, indicando o início do desenvolvimento do dano interno (Figura 53b). Já na amostra correspondente à expansão de 0,12%, o agregado apresentou maior grau de deterioração, com aumento da quantidade de fissuras aparentes e maior comprometimento de sua integridade (Figura 53c).

Figura 53: Nível de fissura no agregado - a) íntegro; b) 0,05%; c) 0,12%



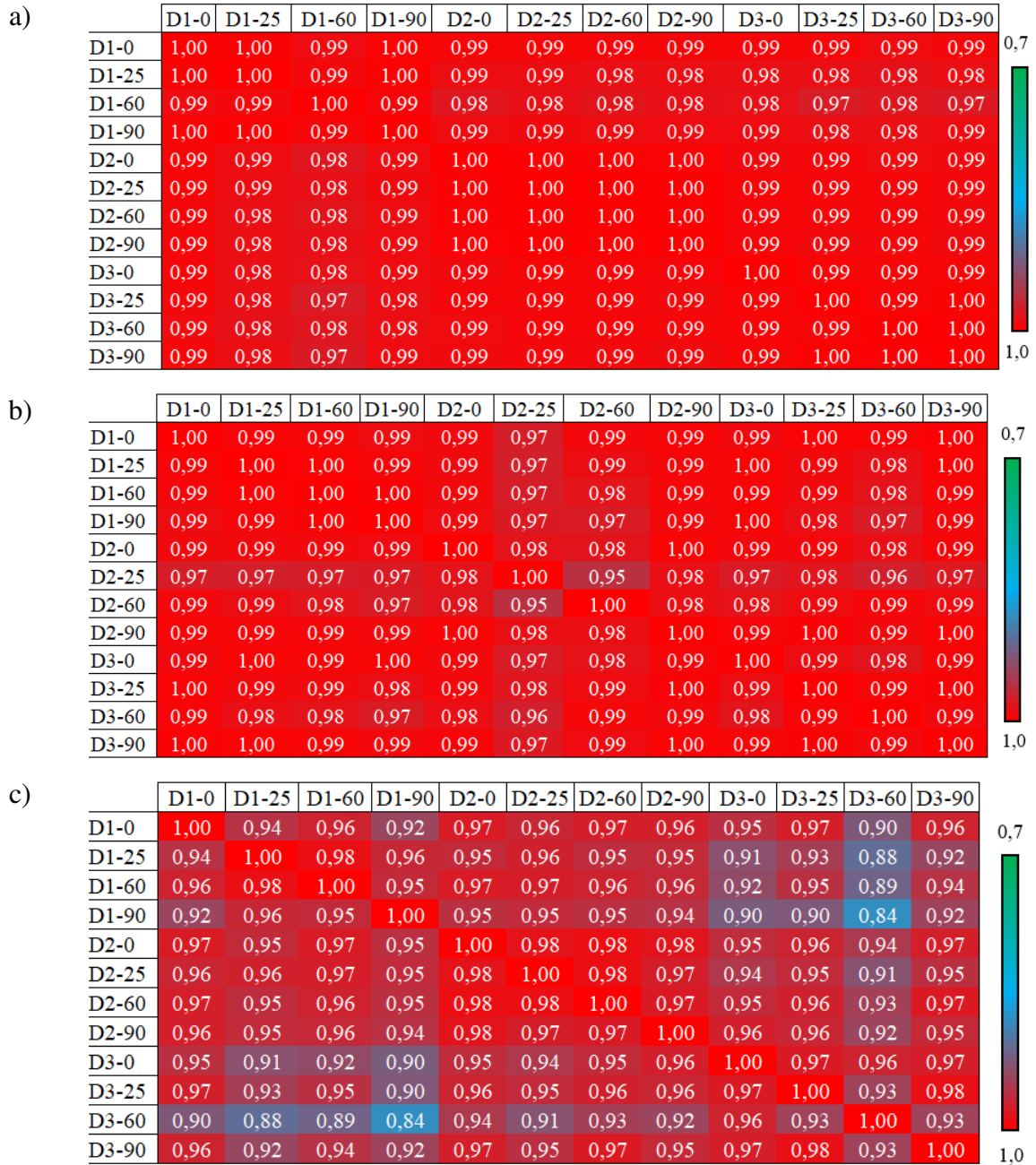
Fonte: Autora (2026)

4.2 PARÂMETROS MODAIS

A correspondência entre os modos de vibração foi avaliada por meio do *Modal Assurance Criterion* (MAC), com o objetivo de verificar se as formas modais identificadas nas diferentes condições de dano representavam os mesmos padrões dinâmicos observados na condição íntegra. Essa verificação foi necessária porque a interpretação comparativa dos parâmetros modais depende do pareamento adequado entre modos equivalentes. Diferenças aparentes entre condições podem decorrer de alterações físicas no dormente, mas também podem ser produzidas por inconsistências experimentais, baixa qualidade de identificação modal, inversão de sinal, troca de modos ou sensibilidade do ensaio às condições de apoio e medição.

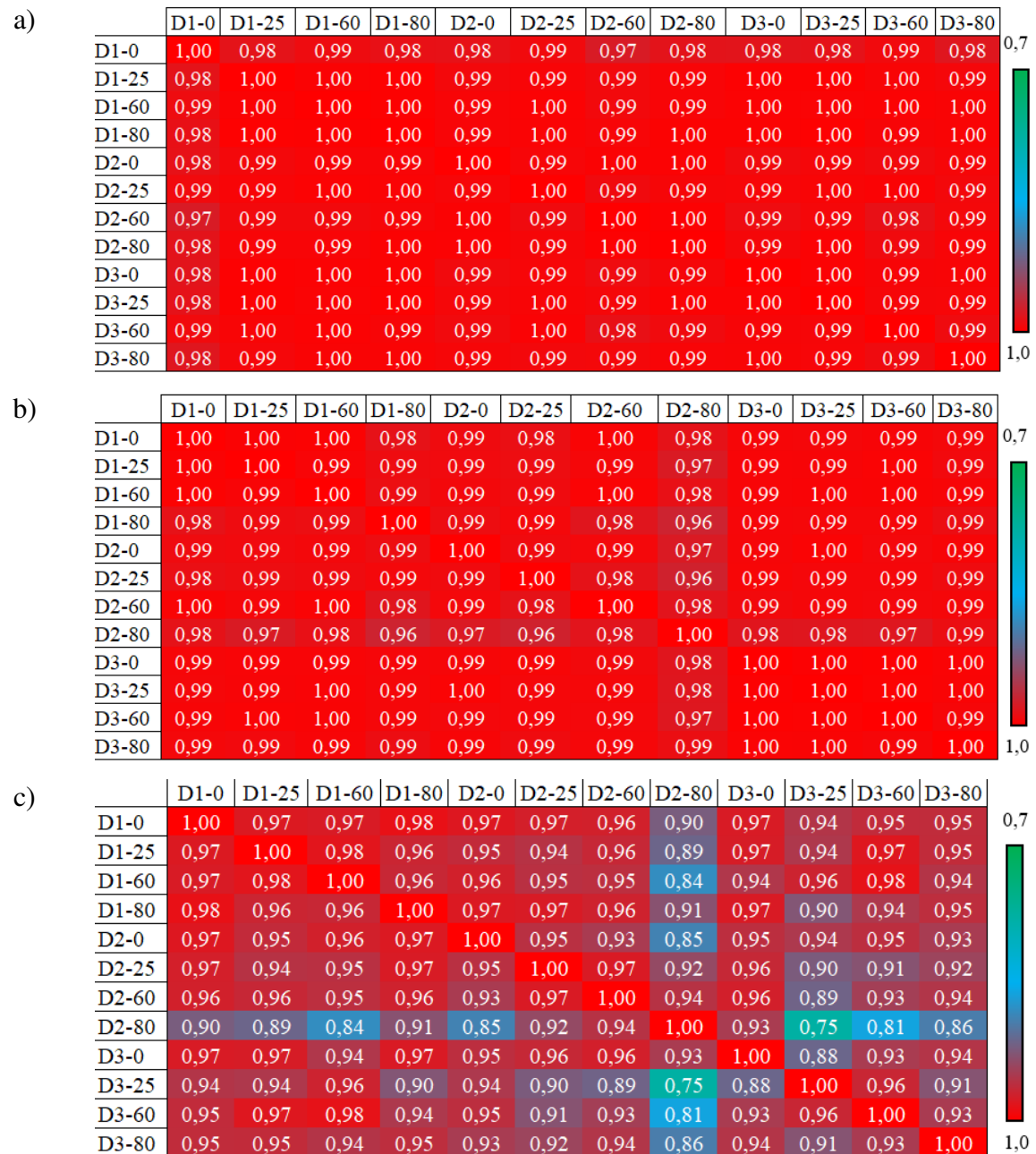
O MAC foi calculado entre os vetores modais da condição íntegra e os vetores modais obtidos para cada nível de dano. Valores próximos de 1 indicam forte similaridade entre as formas modais comparadas, enquanto valores reduzidos indicam perda de correlação modal. Assim, essa análise foi utilizada principalmente como uma etapa de controle da qualidade dos resultados modais, permitindo verificar se os modos identificados nas condições danificadas poderiam ser comparados diretamente aos modos da condição de referência.

Figura 54: MAC - Dados de *Center Bound* – a) Modo 1; b) Modo 2; c) Modo 3



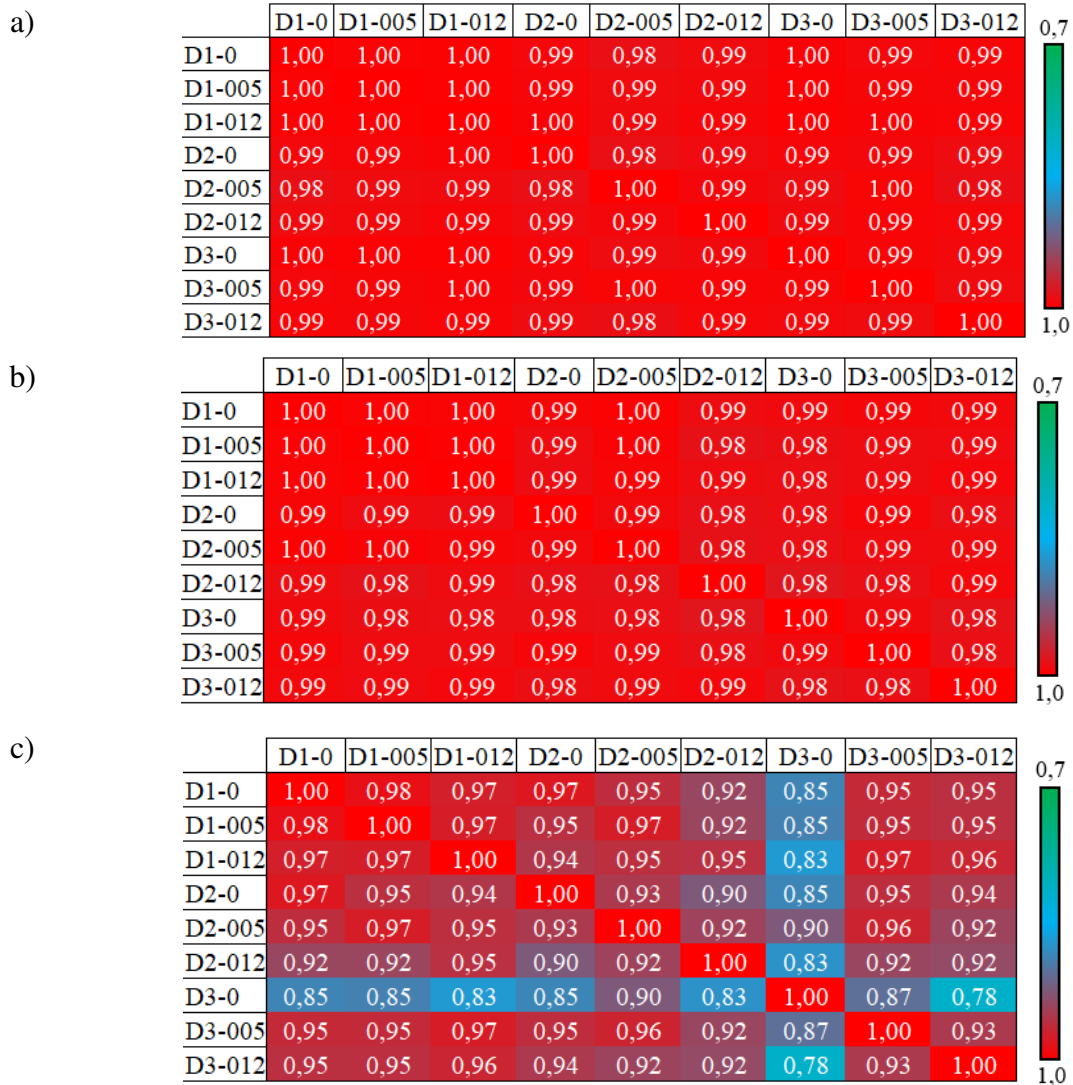
Fonte: Autora (2026)

Figura 55: MAC - Dados de Apoio do trilho – a) Modo 1; b) Modo 2; c) Modo 3



Fonte: Autora (2026)

Figura 56: MAC - Dados de expansão– a) Modo 1; b) Modo 2; c) Modo 3



Fonte: Autora (2026)

A Figura 54, Figura 55 e Figura 56 apresentam as matrizes do *Modal Assurance Criterion* (MAC) para as condições center bound, apoio do trilho e expansão, considerando separadamente os modos 1, 2 e 3. Em todos os casos, os modos 1 e 2 apresentaram elevada correspondência modal entre as condições avaliadas, com valores predominantemente entre 0,97 e 1,00. Para a condição *center bound*, os modos 1 e 2 mantiveram valores de MAC próximos de 1,00 na maior parte das comparações. O modo 3 apresentou maior variação, com reduções localizadas, incluindo valores próximos de 0,84 a 0,91 em algumas combinações. Para a condição de apoio do trilho, os modos 1 e 2 também apresentaram correlações elevadas, em geral superiores a 0,96. O modo 3 mostrou maior dispersão, com valores mínimos próximos

de 0,75 em comparações específicas, embora a maior parte dos coeficientes tenha permanecido acima de 0,90.

Para os dados de expansão, os modos 1 e 2 apresentaram valores de MAC majoritariamente entre 0,98 e 1,00. O modo 3 novamente apresentou maior variabilidade, com reduções pontuais, incluindo valores próximos de 0,78 em algumas comparações.

De modo geral, os resultados mostram elevada consistência modal para os modos 1 e 2 nas três condições avaliadas. O modo 3 apresentou menor uniformidade dos coeficientes de MAC, com reduções localizadas observadas em todos os conjuntos de dados.

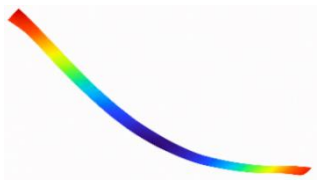
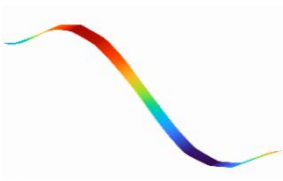
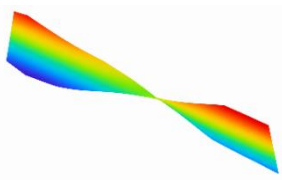
A análise modal foi realizada nos dormentes submetidos aos três mecanismos de dano avaliados neste estudo: fissuração central por *center bound*, fissuração na região do apoio do trilho e fissuração decorrente da expansão induzida por reação álcali-sílica (RAA). Para cada condição, foram obtidas as frequências naturais, as razões de amortecimento e as formas modais associadas aos três primeiros modos de vibração identificados experimentalmente. Os resultados são apresentados nas Tabela 7, 8 e 9.

A Tabela 7 apresenta as frequências naturais e as razões de amortecimento obtidas para os três primeiros modos de vibração dos dormentes submetidos à condição de *center bound*. Para o primeiro modo de flexão, observa-se uma tendência consistente de redução das frequências naturais com o aumento do nível de dano. No dormente D4, a frequência diminuiu de 129,53 Hz na condição íntegra para 127,15 Hz no nível de 90% da carga de ruptura. No dormente D5, a redução foi de 129,21 Hz para 127,63 Hz, enquanto no dormente D6 a frequência diminuiu de 131,90 Hz para 129,89 Hz no maior nível de carregamento avaliado.

No segundo modo de flexão, as frequências não apresentaram uma tendência única com o aumento do nível de carregamento. Embora tenham sido observadas reduções pontuais, os valores oscilaram entre os níveis de dano e permaneceram próximos aos valores obtidos na condição íntegra. Comportamento semelhante foi observado para o terceiro modo de flexão.

As razões de amortecimento apresentaram valores inferiores ou próximos de 1% na maior parte dos registros, com valores pontuais superiores a esse intervalo nos modos superiores. O valor de 0,99% observado no dormente D5 no nível de 90% representa um aumento pontual em relação aos demais resultados, mas não foi acompanhado por comportamento semelhante nos outros dormentes e, portanto, não caracteriza uma tendência geral.

Tabela 7: Resultados de análise modal por *center bound* em cada nível de dano

		1° Modo - Flexão	2° Modo - Flexão	3° Modo - Torção
				
		D4		
0%	F(Hz)	129,53	362,84	476,25
	A(%)	0,57	0,63	0,52
25%	F(Hz)	129,47	363,48	478,44
	A(%)	0,68	0,72	0,96
60%	F(Hz)	127,99	361,07	473,31
	A(%)	0,61	0,68	0,93
90%	F(Hz)	127,15	361,62	456,98
	A(%)	0,59	0,81	0,83
		D5		
0%	F(Hz)	129,21	362,23	460,92
	A(%)	0,59	0,83	0,58
25%	F(Hz)	128,99	363,57	463,22
	A(%)	0,61	0,84	1,86
60%	F(Hz)	128,31	356,71	465,07
	A(%)	0,61	0,76	0,68
90%	F(Hz)	127,63	361,62	456,98
	A(%)	0,99	0,81	0,83
		D6		
0%	F(Hz)	131,9	368,94	463,65
	A(%)	0,62	0,64	0,64
25%	F(Hz)	131,44	369,95	467,17
	A(%)	0,52	0,65	1,3
60%	F(Hz)	131,34	364,35	472,57
	A(%)	0,68	0,86	1,16
80%	F(Hz)	129,89	366,14	458,07
	A(%)	0,60	0,65	1,04

Fonte: Autora (2026)

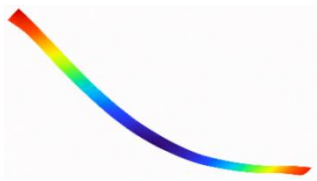
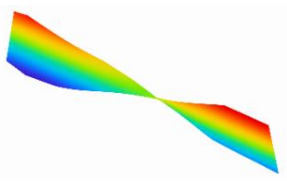
A Tabela 8 apresenta as frequências naturais e as razões de amortecimento obtidas para os três primeiros modos de vibração dos dormentes submetidos à fissuração na região do apoio do trilho. Para o primeiro modo de flexão, as frequências naturais apresentaram pequenas variações entre a condição íntegra e o maior nível de carregamento. Já os níveis intermediários apresentaram oscilações, sem tendência aparente.

No segundo modo de flexão, as reduções foram mais perceptíveis em alguns dormentes, especialmente nos níveis mais elevados de dano. No entanto, os valores intermediários também não seguiram uma evolução contínua em todos os casos. Por exemplo, no dormente D5, os valores permaneceram praticamente constantes até 60%, passando de 359,79 Hz para 359,99 Hz e 359,76 Hz, e diminuíram para 351,99 Hz no nível de 80%.

As razões de amortecimento do primeiro modo apresentaram valores superiores aos da condição íntegra aos níveis danificados dos três dormentes. No dormente D4, os valores variaram de 0,73% na condição íntegra para 0,83%, 0,77% e 0,79% nos níveis de 25%, 60% e 80%, respectivamente. No dormente D5, observou-se aumento gradual de 0,57% para 0,61%, 0,62% e 0,66%. No dormente D6, os valores passaram de 0,62% para 0,66%, 0,71% e 0,73%.

Para o segundo e o terceiro modos, as razões de amortecimento apresentaram maior dispersão. No segundo modo, destaca-se o valor de 3,95% obtido no dormente D4 no nível de 60%, que não foi mantido no nível seguinte. No terceiro modo, também foram observados valores elevados em alguns níveis, como 2,51% no D4 a 25%, 3,01% no D5 a 80% e 3,19% no D6 a 25%. Entretanto, esses aumentos ocorreram de forma localizada e não seguiram uma evolução progressiva com o aumento do dano.

Tabela 8: Resultados de análise modal por fissura no apoio do trilho em cada nível de dano

		1° Modo - Flexão	2° Modo - Flexão	3° Modo - Torção
				
D4				
0%	F(Hz)	127,80	359,49	467,22
	A(%)	0,73	1,01	1,08
25%	F(Hz)	127,87	358,74	463,87
	A(%)	0,83	0,77	2,51
60%	F(Hz)	127,57	354,49	463,32
	A(%)	0,77	3,95	1,38
80%	F(Hz)	126,83	354,73	465,08
	A(%)	0,79	0,89	1,67
D5				
0%	F(Hz)	127,95	359,79	456,77
	A(%)	0,57	1,91	3,24
25%	F(Hz)	128,37	359,99	461,29
	A(%)	0,61	0,83	1,05
60%	F(Hz)	127,85	359,76	456,55
	A(%)	0,62	0,83	0,93
80%	F(Hz)	127,25	351,99	457,25
	A(%)	0,66	1,29	3,01
D6				
0%	F(Hz)	128,15	359,45	452,7
	A(%)	0,62	0,64	1,54
25%	F(Hz)	128,4	359,65	454,86
	A(%)	0,66	1,58	3,19
60%	F(Hz)	129,56	357,88	452,84
	A(%)	0,71	0,75	1,22
90%	F(Hz)	127,73	355,96	458,18
	A(%)	0,73	0,65	2,03

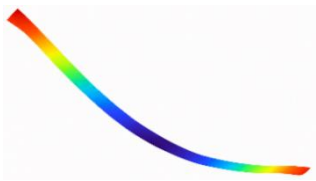
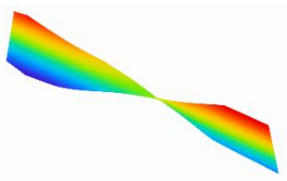
Fonte: Autora (2026)

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos para os três primeiros modos de vibração dos dormentes submetidos à reação expansiva. No primeiro modo de flexão, as frequências aumentaram no nível de 0,05% e reduziram parcialmente no nível de 0,12%. No dormente D1, os valores foram 114,30 Hz, 117,06 Hz e 115,19 Hz para os níveis 0%, 0,05% e 0,12%, respectivamente. No dormente D2, os valores foram 114,64 Hz, 117,14 Hz e 116,34 Hz. No dormente D3, os valores foram 113,26 Hz, 116,30 Hz e 114,86 Hz.

Entre os modos avaliados, o primeiro e o terceiro modo apresentaram comportamento semelhante, com aumento das frequências em 0,05% e redução parcial em 0,12%. No segundo modo, a mesma tendência geral foi observada nos dormentes D1 e D2, enquanto o dormente D3 apresentou maior variação entre os níveis avaliados.

Em relação às razões de amortecimento, o comportamento foi mais consistente. No primeiro modo, os valores aumentaram da condição íntegra para os níveis de 0,05% e 0,12% nos três dormentes analisados. Para o segundo modo, também foram observados aumentos de amortecimento em relação à condição íntegra, principalmente no nível de 0,12% para os dormentes D1 e D2. No terceiro modo, os valores apresentaram maior variabilidade, mas permaneceram, em geral, superiores aos da condição íntegra nos níveis expandidos.

Tabela 9: Resultados de análise modal por reação expansiva em cada nível de expansão

		1° Modo - Flexão	2° Modo - Flexão	3° Modo - Torção
				
		D1		
0%	F(Hz)	114,3	317,06	418,62
	A(%)	0,84	0,89	1,96
0,05%	F(Hz)	117,06	325,04	426,07
	A(%)	1,39	1,30	1,90
0,12%	F(Hz)	115,19	322,42	428,4
	A(%)	1,54	2,46	2,61
		D2		
0%	F(Hz)	114,64	316,94	403,77
	A(%)	0,86	1,33	1,02
0,05%	F(Hz)	117,14	326,89	429,81
	A(%)	1,19	1,27	1,93
0,12%	F(Hz)	116,34	325,82	418,95
	A(%)	1,35	2,28	1,62
		D3		
0%	F(Hz)	113,26	320,55	408,16
	A(%)	0,57	1,22	2,00
0,05%	F(Hz)	116,3	325,69	426,34
	A(%)	1,34	1,49	2,33
0,12%	F(Hz)	114,86	317,02	416,63
	A(%)	1,54	1,41	2,14

Fonte: Autora (2026)

5 DISCUSSÃO

Este capítulo interpreta os resultados apresentados no Capítulo 4 em função dos objetivos específicos. A organização da discussão segue os objetivos definidos para a dissertação, permitindo relacionar os padrões de dano induzidos, os parâmetros obtidos por análise modal, a influência de cada mecanismo de deterioração e a contribuição da técnica para o diagnóstico não destrutivo de dormentes ferroviários.

5.1 IMPACTO DA INDUÇÃO DE TRÊS TIPOS DISTINTOS DE DANOS EM DORMENTES

5.1.1 *Fissuras centrais por center bound*

A condição de *center bound* produziu fissuração concentrada na região central dos dormentes, com propagação pelas faces lateral e superior. Esse padrão é compatível com a configuração de carregamento adotada, na qual o apoio efetivo reduzido concentra esforços de flexão na região central do elemento (Clark *et al.*, 2017). A ausência de fissuras visíveis no nível de 25% indica que esse patamar permaneceu na fase elástica do elemento. Nos níveis de 60% e 90%, a evolução da fissuração registrada nos mapas confirmou o desenvolvimento progressivo de descontinuidades na região central. No entanto, os dormentes foram descarregados antes dos ensaios modais, e por isso, parte da abertura das fissuras foi reduzida pela ação da protensão.

5.1.2 *Fissuras no assento do trilho*

A fissuração no apoio do trilho apresentou caráter mais localizado do que o dano por *center bound*. A região danificada concentrou-se sob o assento do trilho, onde o ensaio induziu atuação combinada de momento fletor e força cortante. Esse comportamento é coerente com estudos sobre dormentes de concreto protendido submetidos a carregamento de impacto, nos quais a região do assento do trilho e os apoios concentraram tensões elevadas, com desenvolvimento de fissuração por mecanismos combinados de flexão e cisalhamento (Kaewunruen; Ngamkhanong; Lim, 2018). Esse padrão de dano afeta a região de transferência de cargas roda-trilho, mas sua influência sobre a rigidez global do dormente depende da participação dessa região em cada forma modal.

A maior abertura das fissuras observada no apoio do trilho, em comparação ao *center bound*, indica maior separação entre as faces fissuradas e menor recuperação aparente após o descarregamento.

5.1.3 Fissuração por reação expansiva interna

A reação expansiva produziu um tipo de dano distinto dos mecanismos mecanicamente induzidos. Enquanto o *center bound* e o dano no apoio do trilho foram gerados por carregamento externo e avaliados após descarregamento, a fissuração por reação expansiva permaneceu associada à degradação interna do material.

A indução da reação expansiva foi acelerada pela combinação entre imersão em solução de NaOH 1N e exposição à temperatura de 60 °C. A solução alcalina aumentou a disponibilidade de álcalis e íons hidroxila na solução dos poros, enquanto a temperatura elevada acelerou sua cinética. Essa condição intensifica o desenvolvimento da expansão e da fissuração, sem alterar o mecanismo principal de dano, que permanece associado à formação de produtos de reação, fissuração dos agregados reativos e propagação das fissuras para a pasta de cimento (Baret *et al.*, 2025).

Nas medidas de expansão dos dormentes, as diferenças observadas entre as faces e entre as direções de medição indicam que a expansão superficial não ocorreu de forma isotrópica. Esse comportamento é associado à interação entre a reação expansiva e o estado de restrição imposto pela protensão em dormentes de concreto protendido (Medeiros *et al.*, 2025). A literatura mostra que a expansão de concretos afetados por reações expansivas internas é influenciada pelo confinamento, tornando-se menos pronunciada nas direções mais restringidas e favorecendo uma resposta anisotrópica (Sellier; Bourdarot; Grimal, 2009). Além disso, a transferência da força de protensão pode favorecer danos localizados nas extremidades dos dormentes, especialmente na interface aço-concreto. Jokūbaitis; Valivonis e Marčiukaitis (2016) observaram maior fissuração ao redor da armadura nessa região e identificaram produtos secundários de reação expansiva apenas nas extremidades, sem ocorrência semelhante na região central. Assim, a variabilidade entre faces e direções pode estar associada ao efeito combinado da expansão química, da restrição imposta pela protensão e da maior susceptibilidade das extremidades à fissuração.

A caracterização mecânica do concreto, apresentada na Tabela 5 indicou comportamentos consistentes com a literatura, segundo a qual o módulo de elasticidade é uma

das propriedades mais sensíveis à reação álcali-sílica em baixos níveis de expansão. Esse comportamento ocorre porque, em estágios iniciais da reação, a microfissuração tende a se desenvolver no interior dos agregados reativos. Como o módulo de elasticidade do concreto é influenciado pela rigidez dos agregados (Sun; Fanourakis, 2022), a fissuração inicial reduz a rigidez do material mesmo em níveis baixos de expansão. A resistência à compressão, por outro lado, apresenta menor sensibilidade nos estágios iniciais, pois a ruptura em compressão depende da formação de uma rede de fissuras suficientemente conectadas para comprometer a capacidade resistente global. Dessa forma, reduções expressivas na resistência à compressão tendem a ocorrer apenas em níveis mais avançados de expansão (Sanchez *et al.*, 2017).

O *Stiffness Damage Index* (SDI) e o *Plastic Deformation Index* (PDI) são parâmetros obtidos a partir da resposta tensão-deformação durante os ciclos de carregamento e descarregamento do SDT. O SDI representa a parcela de energia dissipada durante o ensaio em relação à energia total aplicada e o PDI representa a parcela de deformação plástica acumulada em relação à deformação total. Assim, valores mais elevados de SDI e PDI indicam maior perda de integridade interna e maior irreversibilidade da resposta mecânica (Zahedi *et al.*, 2022). Na condição íntegra, os valores de SDI = 0,05 e PDI = 0,09 indicam baixa dissipação de energia e pequena deformação residual, compatíveis com resposta predominantemente elástica. Com 0,05% de expansão, os índices aumentaram para SDI = 0,15 e PDI = 0,14, indicando o início da degradação interna associada à microfissuração e à formação de produtos de reação. No nível de 0,12%, os valores de SDI = 0,20 e PDI = 0,21 confirmam a progressão do dano, com maior dissipação de energia e maior deformação irreversível durante os ciclos de carregamento e descarregamento.

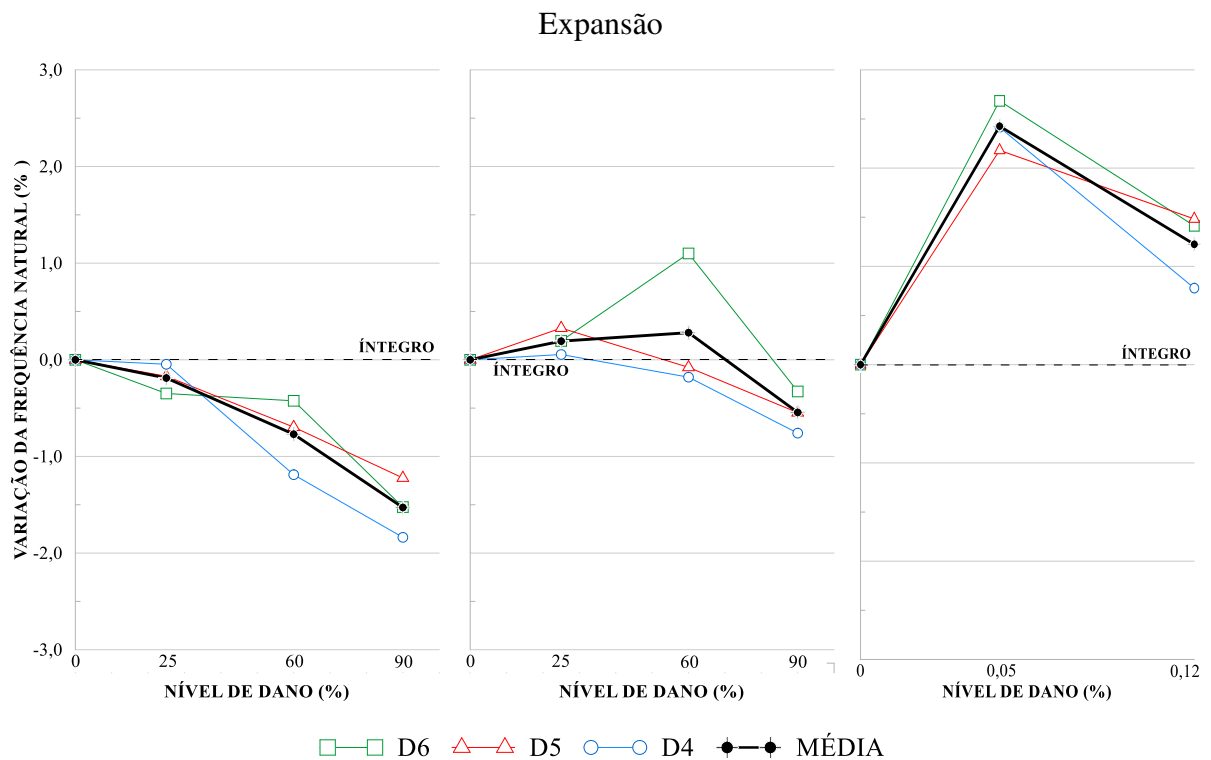
Os valores de DRI apresentados na Figura 49 indicam aumento progressivo do dano com o avanço da expansão. Aos 28 dias, a resposta foi dominada por fissuras fechadas nos agregados, provavelmente associadas ao processamento e à condição prévia das partículas, com contribuição limitada de fissuras na pasta de cimento. No nível de 0,05% de expansão, o aumento do DRI foi associado ao desenvolvimento de fissuras abertas nos agregados e ao início da formação de produtos de reação. No nível de 0,12%, observou-se maior contribuição das fissuras abertas nos agregados, das fissuras com produto de reação e das fissuras na pasta de cimento. Esse comportamento está de acordo com Sanchez *et al.* (2016), que descrevem a progressão da RAA como um processo inicialmente concentrado nos agregados reativos, seguido pela extensão das fissuras para a pasta de cimento em níveis moderados de expansão.

5.2 INFLUÊNCIA DOS PADRÕES DE DANO NOS PARÂMETROS MODAIS EM DORMENTES

A influência dos padrões de danos nos parâmetros modais foi avaliada a partir da normalização dos resultados do primeiro modo de flexão em relação à condição íntegra de cada dormente. Essa abordagem permitiu comparar diretamente a evolução da frequência natural e da razão de amortecimento entre os três mecanismos de dano, reduzindo a influência das diferenças iniciais entre os dormentes e enfatizando a resposta relativa de cada elemento ao dano induzido. A análise concentrou-se no primeiro modo de flexão porque esse modo apresentou a resposta mais consistente entre os parâmetros avaliados e porque estudos prévios em dormentes de concreto protendido indicam que os modos flexurais, sobretudo o primeiro modo, tendem a ser mais sensíveis à fissuração do que modos superiores ou modos predominantemente torcionais (Kaewunruen; Remennikov, 2008b).

Nos dormentes submetidos ao *center bound*, observou-se redução progressiva, embora discreta, da frequência natural com o aumento do nível de carregamento. Esse comportamento indica que a fissuração central afetou a rigidez efetiva mobilizada pelo primeiro modo de flexão. Essa resposta é coerente com o princípio geral dos métodos baseados em vibração, nos quais a redução de rigidez estrutural tende a produzir redução das frequências naturais quando a massa do sistema permanece praticamente inalterada (Doebbling *et al.*, 1996; Avci *et al.*, 2021). A maior coerência desse parâmetro para o *center bound*, em comparação ao dano no apoio do trilho, pode ser atribuída à localização da fissuração na região central, que apresenta participação relevante na deformada do primeiro modo de flexão. Esse resultado é coerente com Kaewunruen e Remennikov (2008b) que observaram, em dormentes de concreto protendido fissurados, redução das frequências de ressonância associada ao enfraquecimento da rigidez flexural. Os autores também verificaram que a maior alteração ocorreu no primeiro modo de flexão. A Figura 57 apresenta a variação percentual da frequência natural do primeiro modo de flexão para os três mecanismos de dano.

Figura 57: Variação percentual da frequência do primeiro modo de vibração em relação ao estado íntegro para os três mecanismos de dano - a) *Center bound*; b) Apoio do trilho; c) Expansão



A baixa magnitude da redução de frequência no *center bound* pode ser associada à condição protendida do elemento. Após o descarregamento, a força de protensão tende a recomprimir parcialmente as fissuras e reduzir sua abertura residual. Çeçen *et al.* (2022) destacam que, em elementos protendidos, as faces das fissuras podem se fechar após a remoção do carregamento, de modo que os modelos usuais de concreto armado fissurado não podem ser transferidos diretamente para elementos protendidos. Os mesmos autores indicam que, quando a capacidade de protensão ainda é suficiente para fechar as fissuras, as alterações nas frequências de ressonância e nas razões de amortecimento tendem a ser pouco expressivas. Assim, embora a fissuração central tenha sido visível nos níveis de 60% e 90%, a resposta modal medida após o descarregamento representa uma condição residual parcialmente fechada, e não a condição de máxima abertura da fissura durante o carregamento.

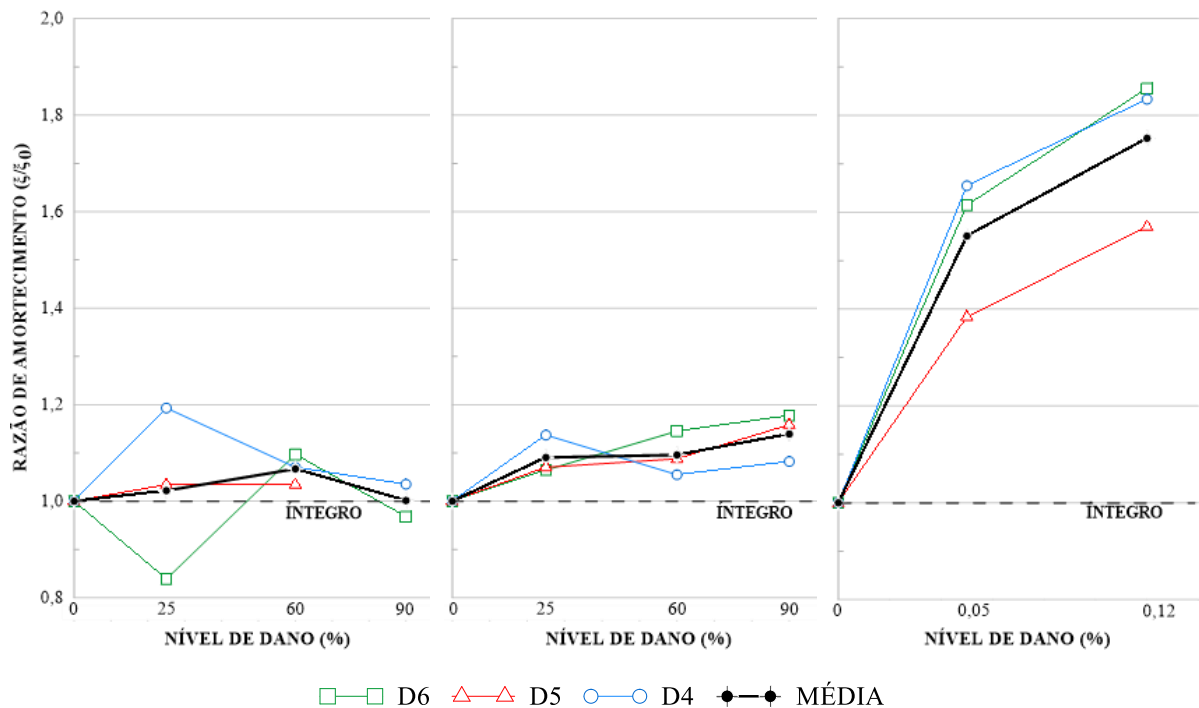
Nos dormentes com fissuração no apoio do trilho, as variações de frequência foram menores e menos regulares, sem tendência progressiva clara ao longo dos níveis de dano. Esse

comportamento indica que a fissuração sob o assento do trilho, embora estruturalmente relevante para a transferência de cargas ferroviárias, não modificou de forma expressiva a rigidez global mobilizada pelo primeiro modo de flexão. Essa interpretação é consistente com a literatura de detecção de dano por vibração, segundo a qual danos localizados podem não produzir alterações significativas nas frequências naturais mais baixas, uma vez que esses parâmetros representam propriedades globais da estrutura (Kaewunruen; Ngamkhanong; Lim, 2018). Assim, a resposta obtida não indica ausência de dano, mas evidencia que a frequência natural do primeiro modo foi menos sensível a esse padrão localizado do que ao dano central por center bound.

Nos dormentes submetidos à reação expansiva interna, a frequência natural aumentou no nível de 0,05% de expansão e reduziu parcialmente no nível de 0,12%, permanecendo acima ou próxima da condição inicial. Esse comportamento indica a atuação simultânea de dois efeitos concorrentes. A exposição em ambiente saturado e sob temperatura elevada favoreceu a continuidade da hidratação do cimento, podendo aumentar a rigidez dinâmica da matriz cimentícia. Esse comportamento é compatível com estudos que relacionam o desenvolvimento inicial de rigidez e resistência em materiais cimentícios ao aumento de frequências próprias medidas por métodos dinâmicos (Wang *et al.*, 2022). Além disso, métodos baseados em propagação de ondas em concreto também indicam que o endurecimento do material influencia propriedades dinâmicas associadas à transmissão de pulsos (Popovics; Rose; Popovics, 1990). Como a frequência natural depende da relação entre rigidez e massa, o ganho inicial de rigidez foi capturado pela frequência antes que a fissuração expansiva se tornasse dominante. No nível de 0,12%, a intensificação da microfissuração interna e superficial reduziu parcialmente esse ganho, indicando maior influência da deterioração expansiva sobre a resposta dinâmica do elemento.

A Figura 58 apresenta a razão de amortecimento normalizada do primeiro modo de flexão em relação à condição íntegra de cada dormente.

Figura 58: Razão de amortecimento normalizada em relação ao estado íntegro para os três mecanismos de dano - a) *Center bound*; b) Apoio do trilho; c) Expansão



Fonte: Autora (2026)

Para o *center bound*, os valores normalizados apresentaram variações reduzidas e sem tendência clara com o aumento do dano. Esse comportamento contrasta com a tendência observada na frequência natural e sugere que, após o descarregamento, o fechamento parcial das fissuras pela protensão reduziu a contribuição dos mecanismos dissipativos associados às descontinuidades abertas. Dessa forma, para esse mecanismo de dano, a frequência natural foi mais coerente do que o amortecimento para acompanhar a alteração induzida no dormente.

Para a fissuração no apoio do trilho, observou-se aumento discreto, porém mais consistente, da razão de amortecimento. Esse comportamento difere daquele observado para a frequência natural, que apresentou variações reduzidas e sem tendência progressiva. A maior abertura residual das fissuras nesse mecanismo, próxima de 1,0 mm, em comparação às fissuras do *center bound*, próximas de 0,4 mm, indica maior separação entre as faces fissuradas e menor recuperação aparente após o descarregamento. Estudos sobre amortecimento em estruturas de concreto mostram que o dano pode modificar a capacidade de dissipação por meio de mecanismos como atrito, contato intermitente e contribuição de interfaces fissuradas (Modena;

Sonda; Zonta, 1999; Curadelli *et al.*, 2008). Çeçen *et al.* (2022) também descrevem que, em elementos fissurados, a dissipação pode envolver mecanismos de atrito e amortecimento equivalente associado à presença de regiões fissuradas. Assim, embora a fissuração no apoio do trilho tenha produzido pouca alteração na frequência global, ela foi mais perceptível na razão de amortecimento.

Nos dormentes submetidos à reação expansiva interna, o aumento do amortecimento foi mais pronunciado, atingindo valores normalizados superiores aos observados nos danos mecânicos. Esse resultado é compatível com a natureza distribuída do dano expansivo, que envolve microfissuração nos agregados, propagação de fissuras para a pasta de cimento e formação de produtos de reação em poros e fissuras (Sanchez *et al.*, 2015). Diferentemente das fissuras mecanicamente induzidas, o dano expansivo tende a permanecer ativo no concreto mesmo após a ausência de carregamento externo, pois resulta da formação de produtos expansivos e do desenvolvimento de pressões internas no material. Embora a protensão possa restringir parte da abertura das fissuras, ela não elimina a origem do processo expansivo nem a presença de dano distribuído no concreto (Multon; Toutlemonde, 2006).

Os resultados estatísticos indicam que a resposta modal do dormente foi influenciada pelo tipo de dano tanto na frequência quanto no amortecimento (Tabela 10 e Tabela 11).

Tabela 10: Efeito do tipo de dano sobre a frequência e agrupamento pelo teste de Duncan

Análise	Variação	n	Média	Grupo	gl	F	p-valor	F crítico
ANOVA	Entre Grupos	-	-	-	2	16,12	< 0,001	3,316
ANOVA	Dentro Grupos	-	-	-	30	-	-	-
ANOVA	Total	-	-	-	32	-	-	-
DUNCAN	CB	12	-0,622	A	-	-	-	-
DUNCAN	Ap	12	-0,018	A	-	-	-	-
DUNCAN	Ex	9	1,217	B	-	-	-	-

Fonte: Autora (2026)

A ANOVA revelou efeito significativo do tipo de dano na frequência ($F(2,30) = 16,12$; $p < 0,001$). O teste de Duncan ($\alpha = 0,05$) indicou que os tipos *center bound* e apoio do trilho

não diferem entre si, enquanto o tipo de dano por expansão apresenta média significativamente superior.

Tabela 11: Efeito do tipo de dano sobre o amortecimento e agrupamento pelo teste de Duncan

Análise	Variação	n	Média	Grupo	gl	F	p-valor	F crítico
ANOVA	Entre Grupos	-	-	-	2	12,99	< 0,001	3,316
ANOVA	Dentro Grupos	-	-	-	30	-	-	-
ANOVA	Total	-	-	-	32	-	-	-
DUNCAN	CB	12	1,0225	A	-	-	-	-
DUNCAN	Ap	12	1,0817	A	-	-	-	-
DUNCAN	Ex	9	1,4333	B	-	-	-	-

Fonte: Autora (2026)

A análise de variância (ANOVA) revelou que o tipo de dano influencia significativamente o amortecimento ($F(2,30) = 12,99$; $p < 0,001$). O teste de comparações múltiplas de Duncan ($\alpha = 0,05$) indicou que os tipos center bound (média = 1,0225) e apoio do trilho (média = 1,0817) pertencem ao mesmo grupo homogêneo (A), enquanto o tipo de dano por expansão (média = 1,4333) apresenta amortecimento significativamente maior, formando um grupo separado (B).

A análise estatística por nível de dano, apresentado no Apêndice B, mostrou que a sensibilidade dos parâmetros depende do mecanismo avaliado. Para o *center bound*, a frequência reduziu significativamente com o aumento do dano, principalmente a partir de 60%, enquanto o amortecimento não apresentou variação estatisticamente significativa. Para o dano no apoio do trilho, a frequência não diferenciou os níveis de dano, mas o amortecimento distinguiu a condição sem danos das condições danificadas. Para a expansão, a frequência apresentou maior capacidade de separar os diferentes níveis de dano, enquanto o amortecimento diferenciou apenas a condição sem expansão das condições expansivas.

Em geral, as variações observadas nas propriedades modais dos dormentes com danos mecânicos foram discretas, embora tendenciais, devido ao efeito da protensão no fechamento parcial das fissuras após o descarregamento. Para o *center bound*, esse comportamento foi mais evidente nas frequências naturais do primeiro modo de vibração, enquanto, para o dano no apoio

do trilho, foi mais perceptível na razão de amortecimento. Nos dormentes submetidos à reação expansiva, a frequência natural e a razão de amortecimento do primeiro modo foram sensíveis à alteração da condição do elemento. Entretanto, a interpretação da frequência natural exigiu considerar a interação entre o ganho inicial de rigidez, associado à continuidade da hidratação, e a perda progressiva de rigidez causada pela fissuração expansiva.

5.3 CONTRIBUIÇÃO PARA A VALIDAÇÃO DA ANÁLISE MODAL COMO FERRAMENTA DE DIAGNÓSTICO NÃO DESTRUTIVO

Os resultados obtidos indicam que a análise modal possui potencial para diagnosticar alterações em dormentes de concreto protendido, mas sua aplicação não deve se basear em um único parâmetro modal. A análise também mostrou que a protensão interfere na interpretação dos resultados. Em danos mecanicamente induzidos, o descarregamento e o fechamento parcial das fissuras podem reduzir a magnitude das alterações modais. Portanto, dormentes fissurados podem apresentar resposta dinâmica próxima à condição íntegra quando avaliados sem carregamento externo. Esse aspecto deve ser considerado no desenvolvimento de protocolos de monitoramento.

Para danos expansivos, a análise modal demonstrou maior capacidade de captar alterações persistentes no material. Como a reação expansiva permanece ativa no interior do concreto, a resposta modal reflete a presença fissuras internas e produtos de reação, mesmo sem carregamento externo aplicado. Essa condição reforça o potencial da técnica para complementar inspeções visuais, principalmente em situações nas quais a deterioração interna precede manifestações superficiais evidentes.

5.4 LIMITAÇÕES DA INTERPRETAÇÃO E IMPLICAÇÕES PARA O MONITORAMENTO

A interpretação dos resultados deve considerar limitações experimentais. Os ensaios modais foram realizados em dormentes isolados e descarregados, com condições de apoio controladas em laboratório. Em via, a resposta dinâmica será influenciada pela interação com trilhos, fixações, lastro, condições de apoio, variabilidade de contato, temperatura, umidade e nível de carregamento. Assim, os resultados obtidos estabelecem uma base experimental para

diferenciar mecanismos de dano, mas não substituem a calibração de protocolos específicos para aplicação em campo.

A utilização dos parâmetros modais como ferramenta complementar de diagnóstico deve ocorrer de forma integrada a outros indicadores de dano, incluindo o padrão de fissuração, a abertura das fissuras, a presença de produtos de reação e os resultados de inspeção visual. Essa abordagem conjunta permite interpretar as alterações dinâmicas em função do mecanismo físico responsável pela deterioração.

6 CONCLUSÕES

- Os três mecanismos investigados produziram padrões distintos de deterioração nos dormentes de concreto protendido. O *center bound* resultou em fissuração concentrada na região central, o carregamento no apoio do trilho produziu fissuras localizadas nessa seção e a reação expansiva gerou fissuração distribuída no dormente.
- O tipo de dano influenciou significativamente tanto a frequência natural quanto a razão de amortecimento ($p < 0,001$). A reação expansiva formou um grupo estatisticamente distinto dos danos por *center bound* e no apoio do trilho, indicando uma alteração modal mais pronunciada para esse mecanismo.
- Para o dano por *center bound*, a frequência natural do primeiro modo de flexão apresentou redução progressiva com o aumento do nível de carregamento. Os níveis de 60% e 90% diferiram estatisticamente da condição íntegra, enquanto o amortecimento não apresentou variação significativa. Assim, a frequência natural foi o parâmetro mais adequado para acompanhar esse mecanismo de dano.
- Para a fissuração no apoio do trilho, a frequência natural não diferenciou estatisticamente os níveis de dano. Em contraste, a razão de amortecimento apresentou aumento significativo após a indução do dano, distinguindo a condição íntegra das condições correspondentes a 25%, 60% e 80% da carga de ruptura. Entretanto, os três níveis danificados não diferiram entre si.
- Nos dormentes submetidos à reação expansiva, a frequência natural foi influenciada pela interação entre ganho inicial de rigidez por continuidade da hidratação e perda progressiva de rigidez por fissuração expansiva representando estaticamente três grupos distintos (0%; 0,05% e 0,12%). Já a razão de amortecimento apresentou resposta mais direta à deterioração expansiva aumentando progressivamente com o dano. Estatisticamente, os resultados de 0,05% e 0,12% se diferenciaram do nível íntegro.
- Para avaliação do dano de *center bound*, a frequência natural do primeiro modo de vibração foi o parâmetro mais sensível devido a participação da área fissurada nesse modo. Já para o dano no apoio do trilho, o parâmetro mais sensível é o amortecimento do primeiro modo de vibração devido a abertura residual das fissuras. Para a reação expansiva, tanto a

frequência natural quanto o amortecimento do primeiro modo de vibração apresentaram sensibilidade para esse tipo de dano.

- A análise modal experimental mostrou-se aplicável como ferramenta complementar para a avaliação não destrutiva de dormentes de concreto protendido. Sua utilização diagnóstica requer a interpretação conjunta das frequências naturais, das razões de amortecimento, das formas modais e da caracterização física do dano.

- Os resultados são válidos para dormentes isolados, descarregados e submetidos a condições controladas de apoio. A aplicação da metodologia em via exige calibração específica para considerar os efeitos dos trilhos, das fixações, do lastro, das condições de contato, da temperatura, da umidade e do carregamento em serviço.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR NM 11-2. **NBR NM 11-2: Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxidos principais por complexometria Parte 2: Método** ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ABNT NBR NM 18. **NBR NM 18: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo**: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

AEC, Assessoria Especial de Comunicação (org.). **Pro Trilhos chega a 21 contratos assinados para criação de novas ferrovias no país**. Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/transito-e-transportes/2022/01/pro-trilhos-chega-a-21-contratos-assinados-para-criacao-de-novas-ferrovias-no-pais>>. Acesso em: 30 abr. 2026.

ALVES, Luiz Henrique Dias. **Mecanismos de desgaste de rodas ferroviárias**. disertación de maestría—[S.l.]: Universidade de São Paulo, 26 set. 2000.

ANDRADE, Tibério *et al.* Diagnóstico de Reação Álcali -Agregado em Blocos de Fundação de um Edifício Público Situado na Cidade do Recife/PE. In: II SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO. **Anais...** 2006.

ASTM C114. **C114: Standard test methods for chemical analysis of hydraulic cement**: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. West Conshohocken: ASTM International, 2022.

AVCI, Onur *et al.* A review of vibration-based damage detection in civil structures: From traditional methods to Machine Learning and Deep Learning applications. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 147, p. 107077, jan. 2021.

AWASTHI, Anupam *et al.* Investigation on possible causes of expansion damages in concrete – a case study of sleepers in Indian Railways. **Journal of Asian Concrete Federation**, v. 3, n. 1, p. 49–66, 5 jul. 2017.

BARET, E. *et al.* Assessment of additional ASR damage resulting from residual expansion tests using the DRI and SDT test methods. **Construction and Building Materials**, v. 489, p. 142325, ago. 2025.

BASTOS, Josué César. **Analysis of the performance and failure of railroad concrete crossties with various track support conditions**. text—[S.l.]: University of Illinois at Urbana-Champaign, 27 abr. 2016.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Análise experimental de dormentes de concreto protendido reforçados com fibras de aço**. tese de doutorado—[S.l.]: Universidade de São Paulo, 19 nov. 1999.

BRASIL, Ministério dos transportes. Transporte Ferroviário. **Novo PAC garante recursos para o transporte ferroviário e acelera retomada do setor no Brasil**. Disponível em:

<<https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/noticias/2024/01/novo-pac-garante-recursos-para-o-transporte-ferroviario-e-acelera-retomada-do-setor-no-brasil>>. Acesso em: 30 abr. 2026.

BRINCKER, Rune; VENTURA, Carlos; ANDERSEN, Pernille. Damping estimation by Frequency Domain Decomposition. *In*: 1 jan. 2001.

CAO, M. S. *et al.* Structural damage identification using damping: a compendium of uses and features. **Smart Materials and Structures**, v. 26, n. 4, p. 043001, 1 abr. 2017.

ÇEÇEN, Ferhat *et al.* Comparative modal analysis of B70 and LCR-6 type railway sleepers after repeated impact loads. **Construction and Building Materials**, v. 336, p. 127563, jun. 2022.

CHEN, Zhe *et al.* Parametric study on damage and load demand of prestressed concrete crosstie and fastening systems. **Engineering Failure Analysis**, v. 46, p. 49–61, nov. 2014.

CHOI, Jung-Youl *et al.* Structural Integrity Assessment of Concrete Sleepers by Modal Test Technique. **Materials**, v. 16, n. 16, p. 5614, 14 ago. 2023.

CHOI, Jung-Youl *et al.* Experimental Study on Dynamic Characteristics of Damaged Post-Tensioning Concrete Sleepers Using Impact Hammer. **Materials**, v. 17, n. 7, p. 1581, 29 mar. 2024.

CHOPRA, Anil K. **Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering**. [S.l.]: Pearson, 2017.

CLARK, A. *et al.* Damage Detection in Railway Prestressed Concrete Sleepers using Acoustic Emission. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 251, p. 012068, out. 2017.

COSTA, Eliane Betânia Carvalho *et al.* Assessment of Premature Failures in Concrete Railway Ties: A Case Study from Brazil. **Materials**, v. 18, n. 13, p. 2994, 24 jun. 2025.

CURADELLI, R. O. *et al.* Damage detection by means of structural damping identification. **Engineering Structures**, v. 30, n. 12, p. 3497–3504, dez. 2008.

DIAS, Emanuel Roza; SERRA, Mayanne Camara; LIMA, Elon Vieira. Desperdícios na manutenção ferroviária: perdas por esperas no terminal ferroviário de ponta da madeira em São Luís, Maranhão. **Revista Produção Online**, v. 21, n. 3, p. 654–679, 16 out. 2021.

DIMRI, Akshat; CHAKRABORTY, Sushanta. Experimental Investigation on Damage Sensitive Dynamic Responses of a Reinforced Concrete Beam. **ASPS Conference Proceedings**, v. 1, n. 1, p. 1019–1023, 19 dez. 2022.

DOEBLING, S. W. *et al.* **Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<http://www.osti.gov/servlets/purl/249299-n4r7Vr/webviewable/>>. Acesso em: 30 abr. 2026.

EL MOUEDDEB, Maryam *et al.* An Efficient Numerical Model to Predict the Mechanical Response of a Railway Track in the Low-Frequency Range. **Vibration**, v. 5, n. 2, p. 326–343, 24 maio 2022.

EWINS, D. J. **Modal Testing: Theory, Practice and Application**. [S.l.]: Wiley, 2000.

FARNAM, S. M.; REZAIE, F. Simulation of crack propagation in prestressed concrete sleepers by fracture mechanics. **Engineering Failure Analysis**, v. 96, p. 109–117, fev. 2019.

FERREIRA, Rondinele Alberto Dos Reis *et al.* Microstructural analysis of concrete ties with granite and carbonate aggregates after 10 years on Brazil railroads. **Engineering Failure Analysis**, v. 152, p. 107429, out. 2023.

GAN, Bing-Zheng *et al.* The effect of prestressing force on natural frequencies of concrete beams – A numerical validation of existing experiments by modelling shrinkage crack closure. **Journal of Sound and Vibration**, v. 455, p. 20–31, set. 2019.

GIDRÃO, Gustavo De Miranda Saleme *et al.* Internal Damping Ratio of Normal- and High-Strength Concrete Considering Mechanical Damage Evolution. **Buildings**, v. 14, n. 8, p. 2446, 8 ago. 2024.

HAMARAT, Mehmet *et al.* The Effect of Unsupported Sleepers/Bearers on Dynamic Phenomena of a Railway Turnout System under Impact Loads. **Applied Sciences**, v. 10, n. 7, p. 2320, 28 mar. 2020.

HASPARYK, N. P.; KUPERMAN, S. C.; TORRES, J. R. Estudo de caso envolvendo ataque combinado da RAA e DEF em concreto de fundação de edificação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Anais...** 2012.

HIME, William G. Delayed Ettringite Formation A Concern for Precast Concrete? **PCI Journal**, v. 41, n. 4, p. 26–30, 1 jul. 1996.

IEZZI, F.; SPINA, D.; VALENTE, C. Damage assessment through changes in mode shapes due to non-proportional damping. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 628, p. 012019, 9 jul. 2015.

JANELIUKSTIS, Rims *et al.* Flexural cracking-induced acoustic emission peak frequency shift in railway prestressed concrete sleepers. **Engineering Structures**, v. 178, p. 493–505, jan. 2019.

JEBLI, M. *et al.* Characterization of the expansion due to the delayed ettringite formation at the cement paste-aggregate interface. **Construction and Building Materials**, v. 289, p. 122979, jun. 2021.

JENKINS, Florence. **Bahn has to close dozens of routes due to defective concrete sleepers**. Disponível em: <<https://themunicheye.com/bahn-has-to-close-dozens-of-routes-due-to-defective-concrete-sleepers-5021>>. Acesso em: 30 abr. 2026.

JEON, Dongho *et al.* Synergetic Influence of Microcrystalline Quartz and Alkali Content in Aggregate on Deterioration of Concrete Railroad Ties Used for 15 Years in High-Speed Railways. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 16, n. 1, p. 57, dez. 2022.

JING, Guoqing *et al.* Smart railway sleepers - a review of recent developments, challenges, and future prospects. **Construction and Building Materials**, v. 271, p. 121533, fev. 2021.

JOKŪBAITIS, Aidas; MARČIUKAITIS, Gediminas; VALIVONIS, Juozas. Damage of prestressed concrete railway sleepers and its impact on durability. In: THE 13TH INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE “MODERN BUILDING MATERIALS, STRUCTURES AND TECHNIQUES”. **Anais...** Vilnius Gediminas Technical University: 3 dez. 2019. Disponível em: <<https://etalpykla.vilniustech.lt/handle/123456789/156169>>. Acesso em: 30 abr. 2026

JOKŪBAITIS, Aidas; VALIVONIS, Juozas; MARČIUKAITIS, Gediminas. ANALYSIS OF STRAIN STATE AND CRACKING OF COCNRETE SLEEPERS. **JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND MANAGEMENT**, v. 22, n. 4, p. 564–572, 27 abr. 2016.

JR, Roy R. Craig; KURDILA, Andrew J. **Fundamentals of Structural Dynamics**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2006.

KAEWUNRUEN, S. *et al.* Dynamic resistance and rational design of railway prestressed concrete sleepers. In: 27 maio 2019. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/Dynamic-resistance-and-rational-design-of-railway-Kaewunruen-Li/00bc90b850a4960ef546462bc24cab0cb606a9a5>>. Acesso em: 30 abr. 2026

KAEWUNRUEN, S.; REMENNIKOV, A. M. Investigation of free vibrations of voided concrete sleepers in railway track system. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, v. 221, n. 4, p. 495–507, 1 jul. 2007.

KAEWUNRUEN, s; REMENNIKOV, A. M. Reliability Assessment of Railway Prestressed Concrete Sleepers. In: AUSTRALASIAN STRUCTURAL ENGINEERING CONFERENCE (ASEC),. **Anais...** 26 jun. 2008a.

KAEWUNRUEN, Sakdirat; NGAMKHANONG, Chayut; LIM, Chie Hong. Damage and failure modes of railway prestressed concrete sleepers with holes/web openings subject to impact loading conditions. **Engineering Structures**, v. 176, p. 840–848, dez. 2018.

KAEWUNRUEN, Sakdirat; REMENNIKOV, Alex M. Dynamic Effect on Vibration Signatures of Cracks in Railway Prestressed Concrete Sleepers. **Advanced Materials Research**, v. 41–42, p. 233–239, 8 abr. 2008b.

KAEWUNRUEN, Sakdirat; REMENNIKOV, Alex M. Progressive failure of prestressed concrete sleepers under multiple high-intensity impact loads. **Engineering Structures**, v. 31, n. 10, p. 2460–2473, out. 2009.

KAEWUNRUEN, Sakdirat; REMENNIKOV, Alex M. Dynamic Crack Propagations in Prestressed Concrete Sleepers in Railway Track Systems Subjected to Severe Impact Loads. **Journal of Structural Engineering**, v. 136, n. 6, p. 749–754, jun. 2010.

KNOTHE, Kl.; GRASSIE, S. L. Modelling of Railway Track and Vehicle/Track Interaction at High Frequencies. **Vehicle System Dynamics**, v. 22, n. 3–4, p. 209–262, jan. 1993.

KUMARAN, G.; MENON, Devdas; KRISHNAN NAIR, K. Dynamic studies of railtrack sleepers in a track structure system. **Journal of Sound and Vibration**, v. 268, n. 3, p. 485–501, nov. 2003.

LEEMANN, Andreas *et al.* Types of alkali–aggregate reactions and the products formed. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials**, v. 169, n. 3, p. 128–135, jun. 2016.

LEEMANN, Andreas *et al.* Alkali silica reaction in concrete - Revealing the expansion mechanism by surface force measurements. **Cement and Concrete Research**, v. 176, p. 107392, fev. 2024.

LI, Dan *et al.* Fatigue life modelling of railway prestressed concrete sleepers. **Structures**, v. 41, p. 643–656, jul. 2022.

LI, Dan; YOU, Ruilin; KAEWUNRUEN, Sakdirat. Crack Propagation Assessment of Time-Dependent Concrete Degradation of Prestressed Concrete Sleepers. **Sustainability**, v. 14, n. 6, p. 3217, 9 mar. 2022a.

LI, Dan; YOU, Ruilin; KAEWUNRUEN, Sakdirat. Mechanisms and Evolution of Cracks in Prestressed Concrete Sleepers Exposed to Time-Dependent Actions. **Applied Sciences**, v. 12, n. 11, p. 5511, 29 maio 2022b.

LIDÉN, Tomas. Railway Infrastructure Maintenance - A Survey of Planning Problems and Conducted Research. **Transportation Research Procedia**, v. 10, p. 574–583, 2015.

LIMA, Eros Henrique de Souza. **Patologias em dormentes de concreto protendido : estudo de caso de uma ferrovia brasileira**. Dissertação (Engenharia Civil)—[S.l.]: Universidade Federal de Pernambuco, 12 ago. 2022.

LIMA JÚNIOR, Wiu José de. **Identificação de danos em vigas via análise modal**. Dissertação—[S.l.]: Universidade Federal de Alagoas, 2020.

LIU, Jianxing *et al.* Comparative analysis of resistance characteristics of composite sleeper and concrete sleeper in ballast bed. **Construction and Building Materials**, v. 300, p. 124017, set. 2021.

LUBEJ, Samo *et al.* ANALYSIS OF THE CAUSES OF DEGRADATION PRESTRESSED REINFORCED CONCRETE RAILWAY SLEEPERS. **Proceedings of International Structural Engineering and Construction**, v. 10, n. 1, ago. 2023.

MAIA, Nuno Manuel Mendes; SILVA, Júlio Martins Montalvão e. **Theoretical and Experimental Modal Analysis**. [S.l.]: Research Studies Press, 1997.

MASCIOTTA, Maria-Giovanna; PELLEGRINI, Daniele. Investigating the relation between complex mode shapes and local damage for structural assessment. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 2647, n. 19, p. 192024, 1 jun. 2024.

MEDEIROS, R. *et al.* Condition assessment of pre-tensioning prestressed concrete sleepers distressed by internal swelling reactions (ISR). **CEMENT**, v. 21, p. 100154, set. 2025.

MEDEIROS, Rennan; SANCHEZ, Leandro; DOS SANTOS, Antonio Carlos. Assessing Alkali-Carbonate Reaction-Induced Damage in Critical Concrete Infrastructure: The First ACR-Affected Field Structure Reported in Brazil. *In*: SANCHEZ, Leandro F. M.; TROTTIER, Cassandra (Orgs.). **Proceedings of the 17th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete**. RILEM Bookseries. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. v. 50 p. 445–452.

MICHEL, Clotaire; GUÉGUEN, Philippe; BARD, Pierre-Yves. Dynamic parameters of structures extracted from ambient vibration measurements: An aid for the seismic vulnerability assessment of existing buildings in moderate seismic hazard regions. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 28, n. 8, p. 593–604, ago. 2008.

MIELENZ, Richard C. *et al.* Investigation of Prestressed Concrete Railway Tie Distress. **Concrete International**, v. 17, n. 12, 12 jan. 1995.

MODENA, Claudio; SONDA, D.; ZONTA, Daniele. Damage Localization in Reinforced Concrete Structures by Using Damping Measurements. **Key Engineering Materials**, v. 167–168, p. 132–141, jun. 1999.

MOHAMMADI, Nader; NASIRSHOAIBI, Mehrdad. Modal parameter identification of a three-storey structure using frequency domain techniques FDD and EFDD and time domain technique SSI: experimental studies and simulations. **Journal of Vibroengineering**, v. 19, n. 4, p. 2759–2776, 30 jun. 2017.

MONTALBÁN DOMINGO, Laura *et al.* Analysis of the Influence of Cracked Sleepers under Static Loading on Ballasted Railway Tracks. **The Scientific World Journal**, v. 2014, p. 1–10, 2014.

MORAIS, Jorge Daniel Pereira. **Deteção e localização de dano em estruturas**. Dissertação—[S.l.]: Universidade Nova de Lisboa, 2014.

MOSTAFAEI, Hasan; GHAMAMI, Mahdi. State of the Art in Automated Operational Modal Identification: Algorithms, Applications, and Future Perspectives. **Machines**, v. 13, n. 1, p. 39, 9 jan. 2025.

MOURA, JÚLIA MARIA DE FRANÇA. **ESTADO-LIMITE DE SERVIÇO DE VIBRAÇÕES EXCESSIVAS EM LAJES DE CONCRETO ARMADO CONSIDERANDO A AÇÃO INDUZIDA POR PESSOAS**. Dissertação—Natal RN: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2022.

MULTON, Stéphane; TOUTLEMONDE, François. Effect of applied stresses on alkali–silica reaction-induced expansions. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 5, p. 912–920, maio 2006.

NIELSEN, D.; PALMER, E. Modal Analysis Experiments on Prestressed Concrete Sleepers. In: WANG, Chien Ming; DAO, Vinh; KITIPORNCHAI, Sritawat (Orgs.). **EASEC16. Lecture Notes in Civil Engineering**. Singapore: Springer Singapore, 2021. v. 101 p. 277–287.

NÓBREGA, Petrus Gorgônio Bulhões da. **Análise dinâmica de estruturas de concreto: estudo experimental e numérico das condições de contorno de estruturas pré-moldadas**. tese de doutorado—[S.l.]: Universidade de São Paulo, 8 dez. 2004.

OBERHOLSTER, R. E.; MAREE, H.; BRAND, J. H. B. CRACKED PRESTRESSED CONCRETE RAILWAY SLEEPERS: ALKALI-SILICA REACTION OR DELAYED ETTRINGITE FORMATION. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE. **Anais...** 1992.

PAVOINE, A.; BRUNETAUD, X.; DIVET, L. The impact of cement parameters on Delayed Ettringite Formation. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 4, p. 521–528, abr. 2012.

PEETERS, Bart; DE ROECK, Guido. Stochastic System Identification for Operational Modal Analysis: A Review. **Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control**, v. 123, n. 4, p. 659–667, 1 dez. 2001.

PLUGIN, Andrii *et al.* INFLUENCE OF CONCRETE CORROSION FROM THE INTERACTION OF ALKALIS OF CEMENT WITH REACTIVE AGGREGATES ON DAMAGE TO REINFORCED CONCRETE SLEEPERS IN A TRACK. **Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport**, n. 196, p. 43–57, 12 out. 2021.

POPOVICS, Sandor; ROSE, Joseph L.; POPOVICS, John S. The behaviour of ultrasonic pulses in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 20, n. 2, p. 259–270, mar. 1990.

QINHUA, Jin; WEIQING, Liu; LIANG, Tong. Investigations on concrete railway ties suffering from alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 1, p. 107–113, jan. 1997.

QU, Chunxu *et al.* Review of Bridge Structure Damping Model and Identification Method. **Sustainability**, v. 16, n. 21, p. 9410, 30 out. 2024.

RAINIERI, Carlo; FABBROCINO, Giovanni. **Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures: An Introduction and Guide for Applications**. New York, NY: Springer New York, 2014.

RAJABIPOUR, Farshad *et al.* Alkali–silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps. **Cement and Concrete Research**, v. 76, p. 130–146, out. 2015.

REN, Wei-Xin; DE ROECK, Guido. Structural Damage Identification using Modal Data. I: Simulation Verification. **Journal of Structural Engineering**, v. 128, n. 1, p. 87–95, jan. 2002.

ROGERS, C. A.; THARMABALA, T. Prestressed concrete members affected by alkali-silica reaction. **ACI Materials Journal**, v. 87, p. 35–39, 1990.

SADEGHI, J. Field Investigation on Dynamics of Railway Track Pre-Stressed Concrete Sleepers. **Advances in Structural Engineering**, v. 13, n. 1, p. 139–151, fev. 2010.

SADEGHI, Javad. **Investigation of characteristics and modelling of railway track system**. thesis—[S.l.]: University of Wollongong, 1997.

SAFIUDDIN, Md. *et al.* Early-Age Cracking in Concrete: Causes, Consequences, Remedial Measures, and Recommendations. **Applied Sciences**, v. 8, n. 10, p. 1730, 25 set. 2018.

SAHU, Sadananda; THAULOW, Niels. Delayed ettringite formation in Swedish concrete railroad ties. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 9, p. 1675–1681, set. 2004.

SANCHEZ, L. F. M. *et al.* Reliable quantification of AAR damage through assessment of the Damage Rating Index (DRI). **Cement and Concrete Research**, v. 67, p. 74–92, jan. 2015.

SANCHEZ, L. F. M. *et al.* The use of the Damage Rating Index (DRI) for the condition assessment of aging distressed concrete. *In*: 15TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE. **Anais...** São Paulo - Brasil: 2016.

SANCHEZ, L. F. M. *et al.* Overall assessment of Alkali-Aggregate Reaction (AAR) in concretes presenting different strengths and incorporating a wide range of reactive aggregate types and natures. **Cement and Concrete Research**, v. 93, p. 17–31, mar. 2017.

SELLIER, A.; BOURDAROT, E.; GRIMAL, E. Combination of Structural Monitoring and Laboratory Tests for Assessment of Alkali-Aggregate Reaction Swelling: Application to Gate Structure Dam. **ACI Materials Journal**, v. 106, n. 3, 2009.

SHAYAN, A.; QUICK, G. Microscopic Features of Cracked and Uncracked Concrete Railway Sleepers. **ACI Materials Journal**, v. 89, n. 4, 1992.

SILVA, A. S.; GONÇALVES, A.; PIPA, M. DIAGNOSIS AND PROGNOSIS OF PORTUGUESE CONCRETE RAILWAY SLEEPERS DEGRADATION – A COMBINATION OF ASR AND DEF. *In*: 2008. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/DIAGNOSIS-AND-PROGNOSIS-OF-PORTUGUESE-CONCRETE-%E2%80%93-A-Silva-Gon%C3%A7alves/a416434799f28f8bbe43adb4e1848c398c1aef76>>. Acesso em: 2 maio. 2026

SILVA, Patricia Neves. **Reação álcali-agregado nas usinas hidrelétricas do Complexo Paulo Afonso/CHESF: influência da reação nas propriedades do concreto**. Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana—São Paulo: Universidade de São Paulo, 11 abr. 2007.

SILVA, R. L. *et al.* Empirical method for structural damage location using dynamic analysis. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, n. 1, p. 19–31, fev. 2020.

SIMS, Ian; POOLE, Alan (ORGS.). **Alkali-Aggregate Reaction in Concrete: A World Review**. London: CRC Press, 2017.

SRINIVAS, V. *et al.* Experimental Investigations on Effect of Damage on Vibration Characteristics of a Reinforced Concrete Beam. **Journal of The Institution of Engineers (India): Series A**, v. 93, n. 1, p. 45–54, fev. 2012.

SUN, Ryan Wok; FANOURLAKIS, George C. An assessment of factors affecting the elastic modulus of concrete. **Structural Concrete**, v. 23, n. 1, p. 593–603, fev. 2022.

TAHERINEZHAD *et al.* A Review of Behaviour of Prestressed Concrete Sleepers. **Electronic Journal of Structural Engineering**, v. 13, n. 1, p. 1–16, 1 jan. 2013.

TANG, Mingshu; DENG, Min (ORGS.). **Alkali-aggregate reaction in concrete: proceedings of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete ; October 15 - 19, 2004, Beijing International Convention Center, Beijing, China**. Beijing: International Academic Publishers, 2004.

TEPPONEN, P.; ERIKSSON, B. Damages in concrete railway sleepers in Finland. **Nordic concrete research**, 1987.

THOMAS, M.; FOURNIER, B.; FOLLIARD, K. Alkali-Aggregate Reactivity (AAR) Facts Book. In: 1 mar. 2013. Disponível em: <[https://www.semanticscholar.org/paper/Alkali-Aggregate-Reactivity-\(AAR\)-Facts-Book-Thomas-Fournier/6d4a5dff120894a36159597c5f4fb25879f0e2e](https://www.semanticscholar.org/paper/Alkali-Aggregate-Reactivity-(AAR)-Facts-Book-Thomas-Fournier/6d4a5dff120894a36159597c5f4fb25879f0e2e)>. Acesso em: 2 maio. 2026

THOMAS, Michael. The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1224–1231, dez. 2011.

TORRES, I. F.; ANDRADE, T. Risk analysis of the delayed ettringite formation in pile caps foundation in the metropolitan region of Recife - PE - Brasil. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 9, n. 3, p. 357–394, jun. 2016.

TROYAN, Vyacheslav; SOVA, Nadiia. Improving the resistance of concrete for sleepers to the formation of delayed and secondary ettringite, the alkali-silica reaction, and electric corrosion. **Eastern-European Journal of Enterprise Technologies**, v. 6, n. 6 (102), p. 13–19, 2 dez. 2019.

WANG, Guocheng *et al.* Monitoring the Early Strength Development of Cement Mortar with Piezoelectric Transducers Based on Eigenfrequency Analysis Method. **Sensors**, v. 22, n. 11, p. 4248, 2 jun. 2022.

XE, Xiang; WANG, Nianzhi; MINDESS, Sidney. Effect of loading rate and support conditions on the mode of failure of prestressed concrete railroad ties subjected to impact loading. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 7, p. 1286–1298, 1994.

YOU, Ruilin *et al.* The Typical Damage Form and Mechanism of a Railway Prestressed Concrete Sleeper. **Materials**, v. 15, n. 22, p. 8074, 15 nov. 2022.

ZAHEDI, Andisheh *et al.* Evaluation of the induced mechanical deterioration of alkali-silica reaction affected concrete under distinct confinement conditions through the Stiffness Damage Test. **Cement and Concrete Composites**, v. 126, p. 104343, fev. 2022.

ZEMAN, John C. **Hydraulic Mechanisms of Concrete-Tie Rail Seat Deterioration**. [S.l.]: University of Illinois at Urbana-Champaign, 20 ago. 2010.

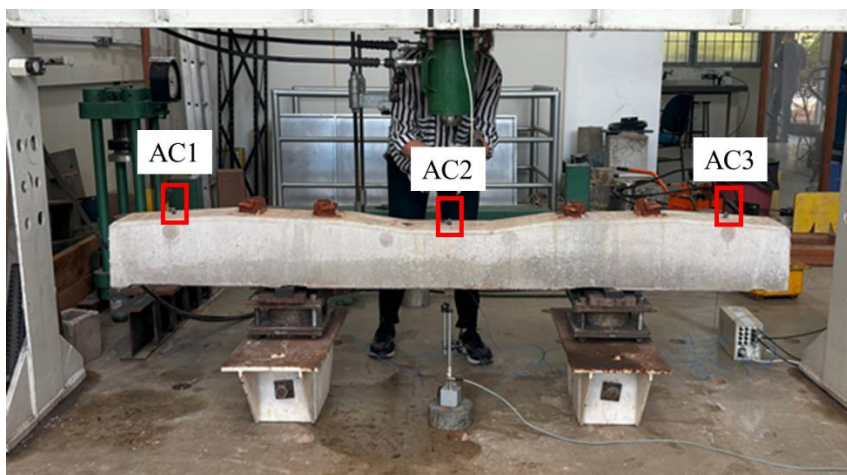
ZHANG, Feng *et al.* An Automatic Baseline Correction Method Based on the Penalized Least Squares Method. **Sensors**, v. 20, n. 7, p. 2015, 3 abr. 2020.

ZHAO, X.; LI, Z.; LIU, J. Wheel–rail impact and the dynamic forces at discrete supports of rails in the presence of singular rail surface defects. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, v. 226, n. 2, p. 124–139, mar. 2012.

APÊNDICE A – DEFINIÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DE ENSAIO DE ANÁLISE MODAL EM DORMENTES

Ao longo do desenvolvimento do referencial teórico, foram realizados testes preliminares no campo laboratorial da Universidade Federal de Uberlândia para definição do set up do ensaio de análise modal em dormentes de concreto protendido. Esses ensaios foram conduzidos em dormentes de bitola métrica, em função da disponibilidade desse tipo de elemento para estudo. Para a avaliação inicial do posicionamento dos sensores, utilizou-se um martelo com massa de 1 kg, sem instrumentação para medição da força aplicada. A resposta dinâmica foi registrada por três acelerômetros, posicionados nas duas extremidades e na região central do dormente (Figura A.1)

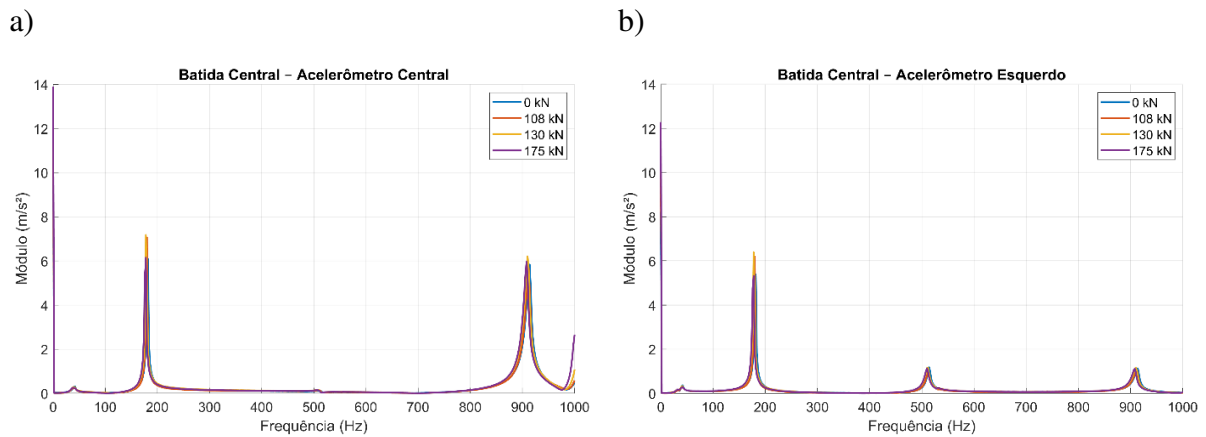
Figura A.1: Posicionamento de acelerômetros



Fonte: Autora (2026)

Em relação ao posicionamento dos acelerômetros, observou-se que os sensores instalados nas extremidades esquerda e direita apresentaram respostas aproximadamente simétricas. Em contrapartida, o acelerômetro posicionado na região central suprimiu a identificação de um dos modos de vibração, associado à frequência de 514 Hz. Esse comportamento ocorreu porque o sensor central coincidiu com uma região próxima ao nó modal do dormente para esse modo, onde a amplitude de deslocamento é reduzida. Dessa forma, os resultados preliminares indicaram que o posicionamento do acelerômetro na extremidade era mais adequado para a identificação modal, conforme apresentado na Figura A.2.

Figura A.2: Resultados dos modos devido ao posicionamento de acelerômetros a) Centro; b) Extremidade



Fonte: Autora (2026)

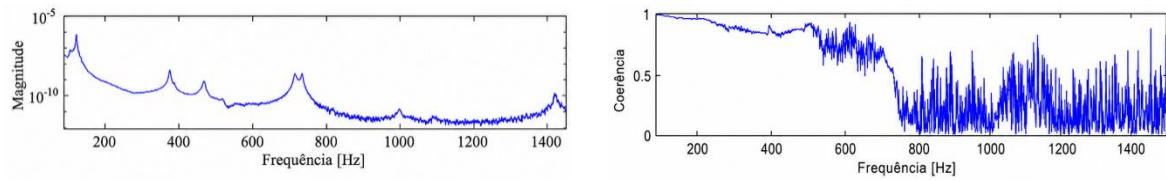
Após a definição da posição de medição, avaliou-se o tipo de sensor mais adequado para a aquisição da resposta dinâmica. Optou-se pelo uso de acelerômetro piezoelétrico devido à sua elevada sensibilidade, ampla faixa de resposta em frequência, baixa massa relativa e capacidade de registrar pequenas amplitudes de vibração com boa estabilidade do sinal. Essas características são relevantes para ensaios modais em dormentes de concreto protendido, pois as variações dinâmicas induzidas pelo dano podem ser discretas, especialmente devido ao fechamento parcial das fissuras pela protensão após o descarregamento. Assim, a escolha de um acelerômetro suficientemente sensível foi necessária para garantir a identificação consistente das frequências naturais, razões de amortecimento e formas modais.

Também foram avaliadas as condições de excitação do dormente. Os testes preliminares indicaram que o martelo de impacto com massa de 3 libras foi capaz de fornecer energia suficiente para excitar os modos de vibração de interesse, sem causar dano adicional ao elemento durante o ensaio. A combinação entre o martelo de 3 libras e o acelerômetro piezoelétrico mostrou-se adequada para produzir sinais com amplitude suficiente, boa relação sinal-ruído e identificação estável dos modos na faixa de frequência analisada. Com base nesses resultados, adotou-se a configuração final com excitação por martelo instrumentado de 3 libras e medição da resposta por acelerômetro piezoelétrico posicionado na extremidade do dormente.

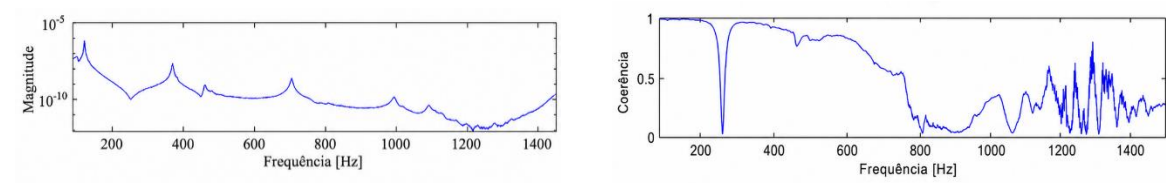
A escolha da ponteira do martelo também foi avaliada a partir de testes preliminares. Foram analisadas as respostas associadas às ponteiros laranja, verde, vermelha e preta, comparando-se a magnitude, a fase e a coerência dos sinais na faixa de frequência de interesse.

Figura A.3: Magnitude e coerência de dados para cada ponteira

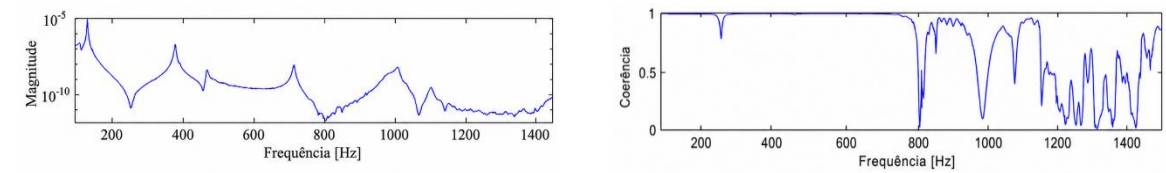
a) Ponteira laranja



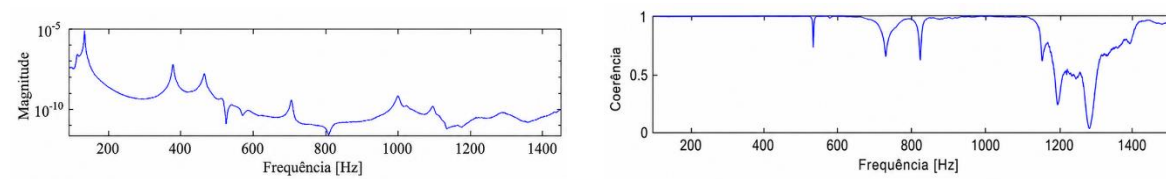
b) Ponteira verde



c) Ponteira vermelha



d) Ponteira preta



Fonte: Autora (2026)

APÊNDICE B – ANÁLISE ESTATÍSTICA

Análise estatísticas para os tipos de dano

- Análise de variância (ANOVA) e teste de comparações múltiplas de Duncan – **Efeito do tipo de dano na frequência.**

Tabela B 1: Anova - Efeito do tipo de dano na frequência

Fonte de variação	SQ	gl	QM	F	p-valor	F crítico
Entre grupos	17,650	2	8,825	16,12	< 0,001	3,316
Dentro dos grupos	16,425	30	0,548			
Total	34,075	32				

Fonte: Autora (2026)

Tabela B 2: Média e agrupamento – Teste de Duncan

Tipo de dano	n	média	Grupo Duncan
<i>Center Bound</i>	12	-0,622	A
Apoio do trilho	12	-0,018	A
Expansão	9	1,217	B

Fonte: Autora (2026)

A ANOVA revelou efeito significativo do tipo de dano na frequência ($F(2,30) = 16,12$; $p < 0,001$). O teste de Duncan ($\alpha = 0,05$) indicou que os tipos *center bound* e apoio do trilho não diferem entre si, enquanto o tipo de dano por expansão apresenta média significativamente superior.

- Análise de variância (ANOVA) e teste de comparações múltiplas de Duncan – **Efeito do tipo de dano no amortecimento.**

Tabela B 3: Anova - Efeito do tipo de dano no amortecimento

Fonte de variação	SQ	gl	QM	F	p-valor	F crítico
Entre grupos	0,972	2	0,486	12,99	< 0,001	3,316
Dentro dos grupos	1,123	30	0,037			
Total	2,095	32				

Fonte: Autora (2026)

Tabela B 4: Média e agrupamento – Teste de Duncan

Tipo de dano	n	média	Grupo Duncan
<i>Center Bound</i>	12	1,0225	A
Apoio do trilho	12	1,0817	A
Expansão	9	1,4333	B

Fonte: Autora (2026)

A análise de variância (ANOVA) revelou que o tipo de dano influencia significativamente o amortecimento ($F(2,30) = 12,99$; $p < 0,001$). O teste de comparações múltiplas de Duncan ($\alpha = 0,05$) indicou que os tipos *center bound* (média = 1,0225) e apoio do trilho (média = 1,0817) pertencem ao mesmo grupo homogêneo (A), enquanto o tipo de dano por expansão (média = 1,4333) apresenta amortecimento significativamente maior, formando um grupo separado (B).

Análise estatísticas para os níveis de dano

- Análise de variância (ANOVA) e teste de comparações múltiplas de Duncan – **Efeito dos níveis de dano de *center bound* na frequência.**

Tabela B 5: Anova - Efeito do tipo de dano na frequência

Fonte de variação	SQ	gl	QM	F	p-valor	F crítico
Entre níveis	4,2533	3	1,417	21,21	<0,001	4,066
Dentro dos níveis	0,5348	8	0,068			
Total	4,7882	11				

Fonte: Autora (2026)

Tabela B 6: Média e agrupamento – Teste de Duncan

Nível de dano	média	Grupo Duncan
0	0	A
25	-0,188	A
60	-0,770	B
90	-1,528	C

Fonte: Autora (2026)

A ANOVA mostrou efeito significativo do nível de dano sobre a frequência para o *center bound* ($F(3,8) = 21,21$; $p < 0,001$). O teste de Duncan ($\alpha = 0,05$) revelou que: (i) os níveis 0% e 25% não diferem entre si (grupo A); (ii) o nível 60% (grupo B) difere de todos os demais; (iii) o nível 90% (grupo C) apresenta a menor frequência média, diferindo significativamente dos outros níveis. Observa-se uma tendência de redução da frequência à medida que o nível de dano aumenta, com diferenças mais acentuadas a partir de 60%.

- Análise de variância (ANOVA) e teste de comparações múltiplas de Duncan – **Efeito dos níveis de dano de center bound no amortecimento.**

Tabela B 7: Anova - Efeito do tipo de dano no amortecimento

Fonte de variação	SQ	gl	QM	F	p-valor	F crítico
Entre níveis	0,0084	3	0,002	0,341	0,796	4,066
Dentro dos níveis	0,0663	8	0,008			
Total	0,0748	11				

Fonte: Autora (2026)

A análise de variância (ANOVA) não indicou efeito significativo do nível de dano sobre o amortecimento para *center bound* ($F(3,8) = 0,341$; $p = 0,796$). Dessa forma, para o tipo de dano 1, o amortecimento permanece estável independentemente do nível de dano aplicado.

- Análise de variância (ANOVA) e teste de comparações múltiplas de Duncan – **Efeito dos níveis de dano de Apoio do trilho na frequência.**

Tabela B 8: Anova - Efeito do tipo de dano no amortecimento

Fonte de variação	SQ	gl	QM	F	p-valor	F crítico
Entre níveis	1,2338	3	0,411	2,88	0,104	4,066
Dentro dos níveis	1,1423	8	0,142			
Total	2,3761	11				

Fonte: Autora (2026)

A análise de variância (ANOVA) não indicou efeito significativo do nível de dano sobre a frequência no tipo de dano do apoio do trilho ($F(3,8) = 2,88$; $p = 0,104$). Conclui-se que os níveis de dano (0%, 25%, 60% e 80%) não produzem diferenças estatisticamente significativas na frequência.

- Análise de variância (ANOVA) e teste de comparações múltiplas de Duncan – **Efeito dos níveis de dano de Apoio do trilho no amortecimento.**

Tabela B 9: Anova - Efeito do tipo de dano no amortecimento

Fonte de variação	SQ	gl	QM	F	p-valor	F crítico
Entre níveis	0,0310	3	0,010	5,73	0,021	4,066
Dentro dos níveis	0,0144	8	0,001			
Total	0,0455	11				

Fonte: Autora (2026)

Tabela B 10: Média e agrupamento – Teste de Duncan

Nível de dano	média	Grupo Duncan
0	1	A
25	1,090	B
60	1,097	B
80	1,140	B

Fonte: Autora (2026)

A análise de variância (ANOVA) revelou efeito significativo do nível de dano sobre o amortecimento para o tipo de dano 2 ($F(3,8) = 5,73$; $p = 0,021$). O teste de comparações múltiplas de Duncan ($\alpha = 0,05$) indicou que o nível 0% (média = 1,000) apresenta amortecimento significativamente menor que os demais níveis. Os níveis 25% (1,090), 60% (1,097) e 80% (1,140) não diferem entre si (grupo B), sugerindo que, a partir de 25% de dano, o amortecimento se estabiliza em patamar superior ao da condição sem danos.

- Análise de variância (ANOVA) e teste de comparações múltiplas de Duncan – **Efeito dos níveis de dano de expansão na frequência.**

Tabela B 11: Anova - Efeito do tipo de dano na frequência

Fonte de variação	SQ	gl	QM	F	p-valor	F crítico
Entre níveis	8,8333	2	4,416	62,00	< 0,001	5,143
Dentro dos níveis	0,4275	6	0,071			
Total	9,2608	8				

Fonte: Autora (2026)

Tabela B 12: Média e agrupamento – Teste de Duncan

Nível de dano	média	Grupo Duncan
0	0	A
0,05	2,427	B
0,12	1,225	C

Fonte: Autora (2026)

A análise de variância (ANOVA) revelou efeito significativo do nível de dano de expansão sobre a frequência ($F(2,6) = 62,00$; $p < 0,001$). O teste de comparações múltiplas de Duncan ($\alpha = 0,05$) indicou que todos os níveis de dano diferem significativamente entre si, formando três grupos distintos: nível 0% (média = 0,000; grupo A), nível 0,5% (média = 2,427; grupo B) e nível 0,12% (média = 1,225; grupo C). Observa-se que o nível intermediário (0,05%) apresenta a maior frequência, enquanto o nível mais alto (0,12%) apresenta frequência inferior ao intermediário, mas ainda superior ao grupo sem danos.

- Análise de variância (ANOVA) e teste de comparações múltiplas de Duncan – **Efeito dos níveis de dano de expansão no amortecimento.**

Tabela B 13: Anova - Efeito do tipo de dano no amortecimento

Fonte de variação	SQ	gl	QM	F	p-valor	F crítico
Entre níveis	0,9090	2	0,454	29,23	< 0,001	5,143
Dentro dos níveis	0,0933	6	0,015			
Total	1,0024	8				

Fonte: Autora (2026)

Tabela B 14: Média e agrupamento – Teste de Duncan

Nível de dano	média	Grupo Duncan
0	1	A
0,05	1,547	B
0,12	1,753	B

Fonte: Autora (2026)

A análise de variância (ANOVA) revelou efeito significativo do nível de dano de expansão sobre o amortecimento ($F(2,6) = 29,23$; $p < 0,001$). O teste de comparações múltiplas de Duncan ($\alpha = 0,05$) indicou que o nível 0% (média = 1,000; grupo A) apresenta amortecimento significativamente menor que os demais níveis. Os níveis 0,05% (média = 1,547; grupo B) e 0,12% (média = 1,753; grupo B) não diferem entre si, sugerindo que a presença do dano de expansão, mesmo em pequena quantidade (0,05%), já é suficiente para aumentar significativamente o amortecimento, sem ganhos adicionais com o aumento do nível para 0,12%.